

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

CLAUDIA CELENE ZAGO NERY

COMPARATIVO ENTRE DEFLEXÕES COM VIGA BENKELMAN, FWD E LWD
NA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO DE
PAVIMENTOS

JOINVILLE

2020

CLAUDIA CELENE ZAGO NERY

**COMPARATIVO ENTRE DEFLEXÕES COM VIGA BENKELMAN, FWD E LWD
NA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO DE
PAVIMENTOS**

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

Orientadora: Dra. Adriana Goulart dos Santos

JOINVILLE

2020

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

Nery, Claudia Celene Zago
Comparativo entre deflexões com viga Benkelman, FWD e
LWD na avaliação estrutural e dimensionamento de reforço de
pavimentos / Claudia Celene Zago Nery. -- 2020.
238 p.

Orientadora: Adriana Goulart dos Santos
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2020.

1. Viga Benkelman. 2. FWD. 3. LWD. 4. Retroanálise. 5.
Método MeDiNa. I. Santos, Adriana Goulart dos. II. Universidade
do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CLAUDIA CELENE ZAGO NERY

**COMPARATIVO ENTRE DEFLEXÕES COM VIGA BENKELMAN, FWD E LWD
NA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO DE
PAVIMENTOS**

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

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Adriana Goulart dos Santos
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membros:

Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Prof. Dr. Edgar Odebrecht
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Joinville, 27 de novembro de 2020.

À minha família, em especial meus pais
Elizabete e Darci Zago, meu marido Edson
Nery e meu querido filho Eduardo (Dudu).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelas oportunidades que me foram concedidas e por estar ao meu lado durante esta caminhada para chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais Elizabete e Darci Zago pelo apoio incondicional, por terem me proporcionado uma boa educação e ensinado a priorizar os estudos como forma de atingir os meus objetivos.

Ao meu marido Edson Rocha Nery, por seu amor e companheirismo. Seu apoio foi fundamental para a conclusão desta dissertação.

Ao meu querido filho Eduardo Zago Nery (Dudu) que soube compreender que a mamãe precisaria ficar afastada em alguns momentos para a finalização da pesquisa.

À professora Dra. Adriana Goulart dos Santos por todo o apoio, ensinamentos, paciência e amizade. Agradeço por estar sempre presente e contribuir com as análises e complementações necessárias à dissertação.

Aos professores Dr. Edgar Odebrecht e Dr. Luciano Pivoto Specht por terem aceitado o convite de participar da banca examinadora, contribuindo com ideias e sugestões para melhoria da minha dissertação.

Agradeço à oportunidade a mim concedida pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UDESC.

Aos colegas de mestrado da turma 2018/02: Ellen, Fabiano, Fernanda, Kairo, Mauren e Patricia, por toda a amizade e companheirismo. À colega Caroline que esteve presente nos ensaios de campo e fez suas contribuições para esta pesquisa. Aos colegas de trabalho, por todo apoio e incentivo.

Às empresas que auxiliaram nas atividades de campo com a disponibilização de equipamentos e pessoal: Pavesys Engenharia de Pavimentos, Azimute Engenheiros Consultores SC Ltda, Geoforma Engenharia Ltda e Infrasul Infraestrutura e Empreendimentos Ltda.

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.” (Ayrton Senna da Silva).

RESUMO

A avaliação estrutural dos pavimentos com a medida das deflexões é comumente realizada no Brasil através do equipamento viga Benkelman. É crescente a utilização do equipamento automatizado *Falling Weight Deflectometer* (FWD) que permite maior agilidade e precisão aos ensaios. De modo similar ao FWD, e com menores custos, o uso do equipamento portátil *Light Weight Deflectometer* (LWD) tem sido considerado promissor na avaliação das deflexões do pavimento. Tendo em vista que cada equipamento fornece respostas diferenciadas em função dos distintos mecanismos de funcionamento, esta dissertação objetivou comparar as leituras de deflexão realizadas por cada equipamento. Da mesma forma, objetivou-se comparar os valores de módulo de elasticidade equivalentes obtidos por retroanálise. A pesquisa foi complementada com a avaliação da vida útil dos pavimentos e cálculo da espessura de reforço, para tanto se empregou o novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) que conta com a abordagem mecanística-empírica para o dimensionamento dos pavimentos asfálticos. Os estudos foram realizados na Estrada Rio do Morro, situada nos municípios de Joinville e Araquari/SC. O pavimento da rodovia conta com estrutura tipicamente empregada no estado de Santa Catarina, com revestimento em concreto asfáltico, base em brita graduada, sub-base em macadame seco e reforço com areia e pedra pulmão. A metodologia empregada envolveu a seleção de 110 pontos de teste ao longo de seis segmentos do pavimento, a realização de ensaios com os três equipamentos, a contagem de tráfego, o processo de retroanálise com o *software* BackMeDiNa, o tratamento estatístico dos dados obtidos e a avaliação mecanística-empírica da estrutura do pavimento por meio do *software* MeDiNa. Com relação aos resultados, para as medidas de deflexão, foram obtidos modelos de regressão significativos ao comparar viga Benkelman *versus* FWD e LWD *versus* FWD. Os valores de módulo retroanalizados com o BackMeDiNa, segundo as considerações de cálculo, mostraram-se coerentes com valores de referência e estudos identificados na bibliografia. Na avaliação da vida útil do pavimento com relação ao critério de fadiga, foram obtidas divergências entre os valores calculados a partir de dados da viga Benkelman e do FWD. A partir da simulação realizada para o cálculo da espessura de reforço com os métodos DNER-PRO 011/79 e MeDiNa, foi identificada a tendência para maiores valores de espessura segundo o último método. Os estudos evidenciaram as vantagens do emprego do FWD e indicaram a clara importância da análise mecanicista na avaliação estrutural do pavimento.

Palavras-chave: Viga Benkelman. FWD. LWD. Retroanálise. Método MeDiNa.

ABSTRACT

Structural evaluation of pavements with deflections measurement is commonly performed in Brazil using the Benkelman beam. The use of automated equipment Falling Weight Deflectometer (FWD) is increasing, which allows greater agility and precision to the tests. Similar to FWD, and at lower costs, the use of the portable Light Weight Deflectometer (LWD) equipment has been considered promising in the evaluation of pavement deflections. As each equipment provides differentiated responses depending on the different operating mechanisms, this study aimed to compare the deflection data performed by each equipment. Also, it aimed to compare the values of equivalent moduli of elasticity obtained by backcalculation process. The research was complemented with the assessment of the useful life of the pavements and the calculation of the overlay asphalt, for which the new National Design Method (MeDiNa) was used, which has a mechanistic-empirical approach for asphaltic pavements design. The studies were carried out on the Rio do Morro Road, located in the cities of Joinville and Araquari/SC. The highway pavement has a structure typically used in the state of Santa Catarina, with asphalt concrete, base and sub-base with granular materials and reinforcement with sand and stone. The methodology used involved the selection of 110 test points along six segments of the pavement, tests with the three equipments, the traffic count, the backcalculation process with the BackMeDiNa software, the statistical treatment of the obtained data and the mechanistic-empirical evaluation of the pavement structure using the MeDiNa software. In the results, for the deflection measures, significant regression models were obtained when comparing Benkelman beam versus FWD and LWD versus FWD. The moduli values obtained with BackMeDiNa, according to the calculation considerations, proved to be consistent with reference values and studies identified in the bibliography. In the analysis the useful life of the pavement in relation to the fatigue standard and using the MeDiNa software, divergences were obtained between the values calculated with the Benkelman beam and with the FWD. From the simulation performed to calculate the overlay asphalt with the DNER-PRO 011/79 method and the MeDiNa method, a trend towards greater thickness values was identified according to the last method. The studies showed the advantages of using the FWD equipment and indicated the clear importance of mechanistic analysis for the evaluation of the pavement structure.

Keywords: Benkelman beam. FWD. LWD. Backcalculation process. MeDiNa method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos de um pavimento asfáltico.....	30
Figura 2 - Representação da bacia de deformação e da deformada.....	31
Figura 3 - Evolução das deflexões ao longo do período de projeto	32
Figura 4 - Representação gráfica da bacia de deflexão e os respectivos índices de forma	34
Figura 5 - Temperatura do ar e do pavimento num dia de verão no Rio de Janeiro (esquemático).....	35
Figura 6 - Variação da temperatura	36
Figura 7 - Variação das deflexões	36
Figura 8 - Fator de correção da deflexão em função da temperatura do revestimento (AASHTO, 1993).....	36
Figura 9 - Fator de correção em função da temperatura do revestimento (DER-SP, 2006).....	37
Figura 10 - Cálculo das distâncias “X” em função das distâncias “x”	42
Figura 11 - Poço de inspeção no pavimento.....	43
Figura 12 - Viga Benkelman posicionada para a medição	44
Figura 13 - Equipamento FWD	46
Figura 14 - Realização de ensaio com o LWD.....	48
Figura 15 - Sensores complementares ao LWD	49
Figura 16 - Regressões obtidas por vários pesquisadores (tipo $Y = aX + b$)	52
Figura 17 - Gráficos comparativos entre deflexões e módulos obtidos com a viga Benkelman e o FWD em oito configurações, segundo a pesquisa de Gomes (2012)	54
Figura 18 - Comparativo elaborado por Salviano (2015) entre valores de módulo determinados em ensaios, retroanalisados com as bacias do FWD e valores utilizados na verificação da estrutura em nota técnica	56
Figura 19 - Deflexões com FWD e LWD em D_0 - 1ª fase da pesquisa de Magalhães (2015) .	57
Figura 20 - Deflexões com FWD e LWD em D_0 - 2ª fase da pesquisa de Magalhães (2015) .	57
Figura 21 - Regressão entre deflexões com FWD e LWD em D_0 segundo Burhani (2016)....	58
Figura 22 - Regressão entre módulos calculados através de deflexões com FWD e LWD segundo Burhani (2016)	59
Figura 23 - Comparação elaborado por Rodrigues (2018) entre deflexões com viga, ensaio de placa e LWD - trecho 2.....	62
Figura 24 - Identificação das regiões geológicas do estado catarinense	78

Figura 25 - Fluxograma das etapas da metodologia	80
Figura 26 - Planta de localização dos municípios de Joinville e Araquari.....	81
Figura 27 - Planta de localização da Estrada Rio do Morro.....	82
Figura 28 - Detalhe das camadas do pavimento	84
Figura 29 - Localização dos segmentos de estudo	85
Figura 30 - Demarcação dos pontos de teste na pista.....	86
Figura 31 - Equipamento FWD durante as medições na Estrada Rio do Morro	87
Figura 32 - Equipamento LWD durante as medições na Estrada Rio do Morro.....	88
Figura 33 - Equipe para a realização dos testes com LWD.....	89
Figura 34 - Viga Benkelman empregada em medições na Estrada Rio do Morro	89
Figura 35 - Pesagem do caminhão e carregamento aplicado.....	90
Figura 36 - Ensaios com a viga Benkelman na Estrada Rio do Morro	91
Figura 37 - Representação da bacia de deformação e da deformada.....	93
Figura 38 - Preenchimento no Excel do arquivo de bacias para dados do FWD	95
Figura 39 - Preenchimento no Excel do arquivo de bacias para dados da viga Benkelman ...	96
Figura 40 - Representação das bacias obtidas segundo o FWD para o segmento 06 no BackMeDiNa	97
Figura 41 - Cálculo do fator de veículo (FV)	100
Figura 42 - Cálculo do número N.....	101
Figura 43 - Comparativo entre deflexões médias com LWD, FWD e viga Benkelman	105
Figura 44 - Diagramas de caixa para as medidas de deflexão realizadas com o FWD.....	107
Figura 45 - Diagramas de caixa para as medidas de deflexão realizadas com o LWD.....	108
Figura 46 - Diagramas de caixa para as medidas de deflexão realizadas com VB	108
Figura 47 - Gráficos de regressão entre medidas de deflexão com LWD e FWD	110
Figura 48 - Gráficos de regressão entre medidas de deflexão com VB e FWD.....	112
Figura 49 - Gráfico de regressão entre as medidas de deflexão de todos os segmentos, exceto o segmento 01, com viga Benkelman e FWD	113
Figura 50 - Gráficos de regressão entre medidas de deflexão com VB e LWD.....	115
Figura 51 - Comparativo entre medidas com LWD, FWD e viga Benkelman - Seg. 01	116
Figura 52 - Comparativo entre medidas com LWD, FWD e viga Benkelman - Seg. 02	117
Figura 53 - Comparativo entre medidas com LWD, FWD e viga Benkelman - Seg. 03	117
Figura 54 - Comparativo entre medidas com LWD, FWD e viga Benkelman - Seg. 04.....	118
Figura 55 - Comparativo entre medidas com LWD, FWD e viga Benkelman - Seg. 05	118
Figura 56 - Comparativo entre medidas com LWD, FWD e viga Benkelman - Seg. 06.....	119

Figura 57 - Comparativo entre parâmetros da bacia de deflexão	120
Figura 58 - Módulos de elasticidade equivalentes para o Seg. 02 a partir dos dados FWD ..	122
Figura 59 - Módulos de elasticidade equivalentes para o Seg. 02 a partir dos dados de VB.	122
Figura 60 - Comparativo entre valores médios de módulo para o revestimento asfáltico	123
Figura 61 - Comparativo entre valores médios de módulo para as camadas granulares.....	123
Figura 62 - Valores médios para as bacias de deflexão - FWD	124
Figura 63 - Valores médios para as bacias de deflexão - viga Benkelman	125
Figura 64 - Diagramas de caixa para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com FWD e viga Benkelman e para o revestimento.....	125
Figura 65 - Valores mínimos, médios e máximos para o módulo do revestimento	126
Figura 66 - Gráficos de regressão entre módulos retroanalizados para a camada de revestimento asfáltico com a viga Benkelman e o FWD.....	128
Figura 67 - Gráficos de regressão entre deflexão e módulos retroanalizados para a camada de revestimento asfáltico com o FWD e a viga Benkelman.....	130
Figura 68 - Diagramas de caixa para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com FWD e viga Benkelman e para a camada de base	131
Figura 69 - Valores mínimos, médios e máximos para o módulo retroanalizado da base	131
Figura 70 - Gráficos de regressão entre módulos retroanalizados para a base com a viga Benkelman e o FWD	133
Figura 71 - Gráficos de regressão entre deflexão e módulos retroanalizados para a camada de base com o FWD e a viga Benkelman.....	135
Figura 72 - Diagramas de caixa para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com FWD e viga Benkelman e para a camada de sub-base..	136
Figura 73 - Valores mínimos, médios e máximos para o módulo da sub-base	137
Figura 74 - Gráficos de regressão entre módulos retroanalizados para a camada de sub-base com a viga Benkelman e o FWD.....	139
Figura 75 - Diagramas de caixa para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com FWD e viga Benkelman e para a camada de subleito...	141
Figura 76 - Valores mínimos, médios e máximos para o módulo retroanalizado do subleito	142
Figura 77 - Gráficos de regressão entre módulos retroanalizados para a camada de subleito com a viga Benkelman e o FWD - por segmento	144
Figura 78 - Gráficos de regressão entre módulos retroanalizados para a camada de subleito com a viga Benkelman e o FWD.....	145
Figura 79 - Comparativo entre deflexões médias com a viga Benkelman	148

Figura 80 - Gráfico comparativo entre a equação de regressão obtida na dissertação para viga Benkelman e FWD e referências pesquisadas	150
Figura 81 - Gráfico comparativo entre a equação de regressão obtida na dissertação para LWD e FWD e referências pesquisadas	154
Figura 82 - Valores médios de módulo retroanalizados com os dados do FWD	155
Figura 83 - Comparativo entre resultados do cálculo de vida útil do pavimento	162
Figura 84 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 01 - FWD	217
Figura 85 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 01 - VB	217
Figura 86 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 03 - FWD	218
Figura 87 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 03 - VB	218
Figura 88 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 04 - FWD	218
Figura 89 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 04 - VB	219
Figura 90 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 05 - FWD	219
Figura 91 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 05 - VB	219
Figura 92 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 06 - FWD	220
Figura 93 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 06 - VB	220
Figura 94 - Modelos de regressão entre deflexão e módulos retroanalizados para a camada de revestimento asfáltico com o FWD e a viga Benkelman.....	221
Figura 95 - Modelos de regressão entre deflexão e módulos retroanalizados para a camada de base com o FWD e a viga Benkelman.....	223
Figura 96 - Modelos de regressão entre deflexão e módulos retroanalizados para a camada de sub-base com o FWD e a viga Benkelman.....	225
Figura 97 - Modelos de regressão entre deflexão e módulos retroanalizados para a camada de subleito com o FWD e a viga Benkelman	227

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de pavimentos com base granular em função das deflexões.....	34
Quadro 2 - Valores típicos para o coeficiente de Poisson segundo DER-SP (2006a).....	40
Quadro 3 - Valores típicos para o coeficiente de Poisson segundo Balbo (2007).....	41
Quadro 4 - Modelos de regressão entre viga e FWD para rodovias catarinenses elaborados por Borges (2001)	51
Quadro 5 - Modelos de regressão entre viga e FWD indicados por Borges (2001).....	52
Quadro 6 - Regressões entre FWD e LWD obtidas por Preussler (2007).....	53
Quadro 7 - Regressões válidas entre viga Benkelman e LWD obtidas por Rodrigues (2018).62	
Quadro 8 - Características das misturas asfálticas teóricas classe 1 a classe 4	68
Quadro 9 - Grau de confiabilidade e critérios de parada do dimensionamento	69
Quadro 10 - Módulos retroanalizados com o BackMeDiNa para rodovia no Paraná em eminência de restauração	72
Quadro 11 - Módulos retroanalizados com o BackMeDiNa e módulos de resiliência obtidos em laboratório	74
Quadro 12 - Módulos retroanalizados com o BackMeDiNa e BAKFAA na condição “não aderida” para vias urbanas de Joinville	75
Quadro 13 - Linhas de tendência para rodovias catarinenses da região geológica 1 segundo Marcon (1996).....	78
Quadro 14 - Linhas de tendência para rodovias catarinenses da região 1, família 2 subfamília1, segundo Oliveira (2007).....	79
Quadro 15 - Características dos segmentos e distribuição dos pontos de teste.....	84
Quadro 16 - Modelos de regressão entre deflexões com viga Benkelman e FWD empregados em análise comparativa	149
Quadro 17 - Modelos de regressão entre deflexões com viga Benkelman e LWD empregados em análise comparativa	151
Quadro 18 - Modelos de regressão entre deflexões com LWD e FWD empregados em análise comparativa	153
Quadro 19 - Condições climáticas no período dos ensaios	229

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo da contagem de tráfego para o período de 16hs e a expansão para o período de 24hs.....	99
Tabela 2 - Veículos comerciais e porcentagem em relação ao total.....	99
Tabela 3 - Cálculo do número N	102
Tabela 4 - Estatística descritiva para os valores de deflexão - FWD	106
Tabela 5 - Estatística descritiva para os valores de deflexão - LWD	106
Tabela 6 - Estatística descritiva para os valores de deflexão - viga Benkelman	107
Tabela 7 - Valores de correlação de Pearson entre LWD e FWD.....	109
Tabela 8 - Análise de significância - regressão entre LWD e FWD	111
Tabela 9 - Valores de correlação de Pearson entre viga Benkelman e FWD.....	111
Tabela 10 - Análise de significância - regressão entre viga Benkelman e FWD	113
Tabela 11 - Valores de correlação de Pearson entre viga Benkelman e LWD.....	115
Tabela 12 - Análise de significância - regressão entre viga Benkelman e LWD	116
Tabela 13 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com o FWD e para a camada de revestimento asfáltico	127
Tabela 14 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com a viga Benkelman e para a camada de revestimento asfáltico.....	127
Tabela 15 - Valores de correlação de Pearson entre módulos retroanalizados para a camada de revestimento asfáltico com a viga Benkelman e o FWD.....	128
Tabela 16 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de revestimento asfáltico com o FWD.....	129
Tabela 17 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de revestimento asfáltico com a viga Benkelman.....	129
Tabela 18 - Análise de significância - módulo para a camada de revestimento.....	130
Tabela 19 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com o FWD e para a camada de base	132
Tabela 20 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com a viga Benkelman e para a camada de base	132
Tabela 21 - Valores de correlação de Pearson entre módulos retroanalizados para a camada de base com a viga Benkelman e o FWD.....	133

Tabela 22 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de base com o FWD.....	134
Tabela 23 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de base com a viga Benkelman.....	135
Tabela 24 - Análise de significância - módulo para a camada de base	136
Tabela 25 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com o FWD e para a camada de sub-base	138
Tabela 26 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com a viga Benkelman e para a camada de sub-base	138
Tabela 27 - Valores de correlação de Pearson entre módulos retroanalizados para a camada de sub-base com a viga Benkelman e o FWD.....	139
Tabela 28 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de sub-base com o FWD.....	140
Tabela 29 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de sub-base com a viga Benkelman.....	140
Tabela 30 - Análise de significância - módulo para a camada de sub-base	141
Tabela 31 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com o FWD e para a camada de subleito.....	143
Tabela 32 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com a viga Benkelman e para a camada de subleito.....	143
Tabela 33 - Valores de correlação de Pearson entre módulos retroanalizados para a camada de subleito com a viga Benkelman e o FWD	144
Tabela 34 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de subleito com o FWD	145
Tabela 35 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de subleito com a viga Benkelman	145
Tabela 36 - Análise de significância - módulo para a camada de subleito.....	146
Tabela 37 - Comparativo entre modelos da dissertação e modelos de Rodrigues (2018).....	152
Tabela 38 - Porcentagem de trincamento ao final do período de projeto - classe 1	158
Tabela 39 - Vida útil do pavimento - classe 1	159
Tabela 40 - Comparativo entre o trincamento ao final do período de projeto e a vida útil estimada - classe 2	160
Tabela 41 - Comparativo entre o trincamento ao final do período de projeto e a vida útil estimada - classe 3	160

Tabela 42 - Comparativo entre o trincamento ao final do período de projeto e a vida útil estimada - classe 4	161
Tabela 43 - Espessura de revestimento (hr) para a vida útil de 10 anos.....	163
Tabela 44 - Previsão da espessura de reforço segundo DNER-PRO 011/79	165
Tabela 45 - Previsão da espessura de reforço segundo o Método MeDiNa.....	165
Tabela 46 - Previsão da espessura de reforço e camada antirreflexão de trincas.....	166
Tabela 47 - Localização dos pontos de teste	179
Tabela 48 - Dados obtidos com o equipamento FWD.....	188
Tabela 49 - Dados obtidos com o equipamento LWD	191
Tabela 50 - Dados obtidos com a viga Benkelman	199
Tabela 51 - Contagem de tráfego na Estrada Rio do Morro realizada em 18/03/2020	202
Tabela 52 - Análise estatística descritiva com as leituras de deflexão convertidas para a temperatura de 25°C e corrigidas em função do carregamento aplicado.....	203
Tabela 53 - Módulos de elasticidade equivalentes retroanalizados através do <i>software</i> BackMeDiNa a partir das deflexões medidas com o equipamento FWD	205
Tabela 54 - Módulos de elasticidade equivalentes retroanalizados através do <i>software</i> BackMeDiNa a partir das deflexões medidas com a viga Benkelman.....	211

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AEMC	Programa de análise elástica de múltiplas camadas
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ANOVA	Análise de variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BC	Bica corrida
BCI	Índice de Curvatura da Base
BDI	Índice de Danos à Base
BGS	Brita graduada simples
BGTC	Brita graduada tratada com cimento
CA	Concreto asfáltico
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CCR	Concreto compactado com rolo
CF	Fator de curvatura
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CREMA	Contratos de Restauração e Manutenção
CV	Coeficiente de variação
D ₀	Deflexão recuperável máxima
Dadm	Deflexão admissível
DAER-RS	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem - RS
DC	Deflexão característica
DCP	<i>Dynamic Cone Penetrometer</i>
DEINFRA-SC	Departamento Estadual de Infraestrutura - SC (alterou para SIE)
DER-SC	Departamento de Estradas de Rodagem - SC (alterou para DEINFRA)
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem - SP
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (atual DNIT)
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Dp	Deflexão de projeto
FC	Fator de equivalência de carga para o eixo padrão de 8,2 tf
FE	Fator de eixos
FT	Função de transferência

FV	Fator de veículo
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
hr	Espessura do revestimento asfáltico
href	Espessura da camada de reforço
IGG	Índice de Gravidade Global
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LDD	<i>Laser Dynamic Deflectometer</i>
LFWD	<i>Light Falling Weight Deflectometer</i>
LWD	<i>Light Weight Deflectometer</i>
ME	Método de ensaio
MH	Macadame hidráulico
Mr	Módulo de deformação resiliente
MS	Macadame seco
N	Número de repetições do eixo padrão de 8,2 tf
NA	Número de repetições do eixo padrão de 8,2 tf, calculado pelo método da AASHTO
PRO	Procedimento
r	Coefficiente de correlação de Pearson
R	Raio de curvatura
R ²	Coefficiente de determinação
RMS	<i>Root mean square</i> - raiz do valor quadrático médio
RT	Resistência à tração
SAMI	<i>Stress absorbing membrane interlayer</i>
SC	Solo cimento
SCA	Solo cal
SCI	Índice de Curvatura da Superfície
SIE-SC	Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade
SGP	Sistema de Gerência de Pavimentos
SMC	Solo melhorado com cimento
TR	Trincamento, em porcentagem
TSD	<i>Traffic-Speed Deflectometer</i>

USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
VB	Viga Benkelman
VMD	Volume médio diário de veículos
X	Média
α	Nível de significância
σ	Desvio padrão
ν	Coefficiente de Poisson

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	JUSTIFICATIVA.....	25
1.2	OBJETIVOS.....	27
1.2.1	Geral	27
1.2.2	Específicos.....	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1	AVALIAÇÃO DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	28
2.2	AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS	29
2.2.1	Análise Mecanicista de Pavimentos	29
2.2.2	Deformabilidade de Pavimentos Asfálticos	30
2.2.2.1	Parâmetros da Bacia de Deflexão.....	32
2.2.2.2	Fatores Climáticos que Influenciam os Valores de Deflexão	34
2.2.3	Módulo Resiliente	37
2.2.4	Retroanálise	39
2.2.4.1	Determinação do Coeficiente de Poisson.....	40
2.2.4.2	Conversão do Carregamento com Eixo Padrão.....	41
2.2.5	Métodos Destrutivos para Avaliação do Pavimento	43
2.2.6	Métodos Semi-Destrutivos	43
2.2.7	Métodos Não Destrutivos.....	43
2.2.7.1	Viga Benkelman	44
2.2.7.2	<i>Falling Weight Deflectometer</i> (FWD).....	46
2.2.7.3	Equivalência entre os Valores de Viga Benkelman e FWD.....	47
2.2.7.4	<i>Light Weight Deflectometer</i> (LWD).....	47
2.2.8	Estudos Comparativos entre os Métodos Não Destrutivos	51
2.3	DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	63

2.4	MÉTODO MEDINA DE DIMENSIONAMENTO	64
2.4.1	Função de Transferência	65
2.4.2	Dimensionamento para a Implantação de Pavimento com o Módulo MeDiNa.....	66
2.4.3	Parâmetros do Tráfego	68
2.4.4	Retroanálise com o BackMeDiNa.....	70
2.4.5	Projeto de Reforço.....	70
2.4.6	AEMC	71
2.4.7	Estudos Realizados com o Método MeDiNa	71
2.5	PROCEDIMENTO DNER- PRO 011/79.....	76
2.6	MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO PARA RODOVIAS CATARINENSES	77
3	METODOLOGIA	80
3.1	ETAPAS DA PESQUISA	80
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA	81
3.3	MÉTODOS.....	83
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	104
4.1	AVALIAÇÃO GERAL DA RODOVIA.....	104
4.2	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS VALORES DE DEFLEXÃO	105
4.2.1	Estatística Descritiva	105
4.2.2	Estudo de Modelos de Regressão	109
4.2.2.1	LWD <i>versus</i> FWD.....	109
4.2.2.2	Viga Benkelman <i>versus</i> FWD.....	111
4.2.2.3	Viga Benkelman <i>versus</i> LWD.....	114
4.2.3	Gráficos Comparativos.....	116
4.2.4	Parâmetros da Bacia de Deflexão.....	119
4.3	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS VALORES DE MÓDULO.....	121
4.3.1	Considerações Gerais	121

4.3.2	Módulos Retroanalizados para a Camada de Revestimento Asfáltico	125
4.3.3	Módulos Retroanalizados para a Camada de Base	130
4.3.4	Módulos Retroanalizados para a Camada de Sub-base	136
4.3.5	Módulos Retroanalizados para a Camada de Subleito	141
4.4	COMPARAÇÃO COM VALORES E EQUAÇÕES DE REFERÊNCIA	147
4.4.1	Medidas de Deflexão	147
4.4.2	Módulo Retroanalizado	155
4.5	AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO	158
4.6	COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO PARA REFORÇO.....	164
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	167
5.1	CONCLUSÕES.....	167
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	170
	REFERÊNCIAS	171
	APÊNDICE A - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE TESTE.....	179
	APÊNDICE B - DADOS OBTIDOS - FWD	188
	APÊNDICE C - DADOS OBTIDOS - LWD.....	191
	APÊNDICE D - DADOS OBTIDOS - VIGA BENKELMAN.....	199
	APÊNDICE E - CONTAGEM DE TRÁFEGO.....	202
	APÊNDICE F - ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA.....	203
	APÊNDICE G - RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM O FWD.....	205
	APÊNDICE H - RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM A VIGA BENKELMAN	211
	APÊNDICE I - DIAGRAMAS - MÓDULO DE ELASTICIDADE EQUIVALENTE	217
	APÊNDICE J - ANÁLISE DE REGRESSÃO - MÓDULO DE ELASTICIDADE EQUIVALENTE	221

ANEXO A - CONDIÇÕES CLIMÁTICAS	229
ANEXO B - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO - FWD.....	231
ANEXO C - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO - LWD	232
ANEXO D - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO - VIGA BENKELMAN	233
ANEXO E - ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA A MISTURA ASFÁLTICA.....	235

1 INTRODUÇÃO

Assim como a implantação de uma nova rodovia é fundamental à integração e desenvolvimento econômico e social de uma região, a manutenção das rodovias em operação é primordial para a continuidade do crescimento e valorização do entorno que é dependente da estrada em questão.

Segundo a Confederação Nacional do Transporte - CNT (2018), o bom desempenho das atividades econômicas e sociais do país depende do adequado dimensionamento e estado de conservação das infraestruturas de transporte, em especial o modal rodoviário, em decorrência de sua grande importância na movimentação de mercadorias e passageiros.

Os insuficientes investimentos na manutenção das rodovias contribuem para a depreciação da malha rodoviária brasileira, causando maiores riscos aos usuários, elevando-se os tempos de viagem, o consumo de combustível, o desgaste dos veículos, entre outros desperdícios (CNT, 2018).

A manutenção rodoviária é definida através do inventário das condições do pavimento: funcionais e estruturais. O inventário funcional é realizado principalmente mediante o estudo dos defeitos da superfície e da irregularidade longitudinal do pavimento. De acordo com Magalhães (2015), a avaliação estrutural do pavimento consiste em analisar sua capacidade de carga de modo principal através das leituras de deflexões, que por sua vez permitem determinar o módulo de elasticidade das camadas do pavimento mediante o processo de retroanálise. Marecos *et al.* (2017) mencionam que a correta aferição das propriedades das camadas do pavimento, em implantações ou restaurações, permitem um correto planejamento das intervenções, promovendo vantagens econômicas, sociais e ambientais.

Balbo (2007) explica que a avaliação estrutural do pavimento implica na determinação dos materiais e espessuras que compõem cada camada do pavimento (incluindo o subleito), bem como na verificação das condições de integridade dos materiais, por meio de parâmetros estruturais, em particular, a medida de deformações. Segundo o autor, a ruptura estrutural ocorre quando as camadas do pavimento, expostas às condições climáticas e ambientais, não mais suportam adequadamente as cargas aplicadas do tráfego e apresentam excessivas deformações.

A viga Benkelman é um equipamento muito utilizado no Brasil para a avaliação estrutural do pavimento com a medição de deflexões. A técnica para o emprego deste equipamento é amplamente conhecida e os métodos tradicionais de dimensionamento

consideram o parâmetro proveniente da viga para a definição do reforço do pavimento (BORGES, 2001).

Entretanto, os processos de inspeção do pavimento vêm sendo aprimorados e outros equipamentos vêm sendo utilizados para fins da avaliação estrutural do pavimento, tais como o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e o *Light Weight Deflectometer* (LWD) sendo, portanto, necessária a busca de comparações entre as medidas realizadas por cada um, tendo em vista que cada equipamento possui diferentes princípios de funcionamento.

1.1 JUSTIFICATIVA

Salviano (2015) informa que a viga Benkelman é o equipamento mais familiar aos engenheiros e projetistas brasileiros, tendo seu uso muito difundido desde os anos de 1970. Acrescenta que é um equipamento barato, entretanto há a necessidade de emprego de caminhão com padronizações específicas para a aplicação de carga estática no pavimento.

Os métodos convencionais de investigação do pavimento permitem uma avaliação indireta das propriedades mecânicas da estrutura do pavimento, muitas vezes insuficientes para determinar a deformabilidade *in situ* dos pavimentos (PREUSSLER, 2007). Ainda, o desempenho de um segmento específico de pavimento de concreto asfáltico pode ser de difícil previsão ao empregar os métodos tradicionais de dimensionamento (LOPES, 2019).

De acordo com Gomes (2012), é crescente o número de pesquisas para o aperfeiçoamento dos processos de avaliação dos pavimentos e para o aumento da eficácia no dimensionamento do reforço estrutural. Na maioria das pesquisas a capacidade estrutural do pavimento é avaliada segundo tensões e deformações geradas em seu interior a partir da solicitação por cargas exteriores.

O FWD é um equipamento mais caro em comparação com a viga Benkelman, entretanto é mais moderno e versátil. Começou a ser empregado no Brasil na década de 1990 e atualmente no mercado nacional são encontrados cerca de 30 equipamentos FWD, sendo a maioria da marca Dynatest e alguns da marca KUAB (SALVIANO, 2015). Horak (2008) menciona que o FWD é empregado principalmente em projetos de restauração e para o monitoramento de extensas malhas viárias em um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP).

As principais vantagens do emprego do FWD em detrimento da viga Benkelman são: maior praticidade, ensaios com maior rapidez e maior precisão dos resultados, principalmente na obtenção da bacia de deflexão de um ponto específico do pavimento e para avaliações deflectométricas em nível de rede. Burhani (2016) cita que o equipamento pode aferir até 60

pontos de teste em uma hora de atuação. Segundo Pinto *et al.* (2013) e Bueno (2016), 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.

O *Light Weight Deflectometer* (LWD) é um equipamento portátil, de fácil manuseio e que fornece o módulo de deformabilidade dinâmico do solo. Tem sido crescente o seu emprego na avaliação das camadas do pavimento devido à simplicidade do ensaio (SANTOS, 2014; RODRIGUES, 2017). Preussler (2007) e Burhani (2016) informam que vem sendo promissora a utilização do LWD para a determinação da deformabilidade, tendo em vista que o equipamento incorpora a evolução tecnológica do FWD com a praticidade de utilização e custo inferior.

Neste contexto, a dissertação se justifica na importância de comparar as medidas de deflexões obtidas com os equipamentos viga Benkelman, FWD e LWD, em pontos coincidentes de uma rodovia, buscando desenvolver modelos de regressão entre os valores. Desta maneira, poderá tornar-se viável a aplicação de um ou outro equipamento, a depender das restrições do estudo, e obter através dos modelos o resultado equivalente.

Segundo Chiarello *et al.* (2019) e Machado (2019), encontra-se em fase final de desenvolvimento o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) que considera a metodologia mecanística-empírica para o dimensionamento dos pavimentos a implantar ou restaurar. Nesta dissertação são realizadas retroanálises a partir dos valores de deflexão obtidos com o FWD e a viga Benkelman e através do *software* BackMeDiNa, de modo a se obter os módulos de elasticidade equivalentes das camadas do pavimento em estudo e colaborando com a consolidação da nova metodologia em desenvolvimento.

Em complemento, a rodovia selecionada para a pesquisa é constituída por estrutura com materiais comumente empregados na pavimentação catarinense sendo: sub-base em macadame seco, base em brita graduada e revestimento em concreto asfáltico. Assim, o estudo realizado fundamenta-se na possibilidade de extensão dos resultados aqui obtidos para a malha rodoviária da região.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Realizar o comparativo entre medidas de deflexão obtidas com viga Benkelman (VB), FWD e LWD, o comparativo entre valores de módulo de elasticidade equivalentes e a aplicação dos dados na avaliação e dimensionamento de reforço de pavimentos.

1.2.2 Específicos

Os objetivos específicos são:

- propor modelos de regressão entre as medidas de deflexão obtidas com os equipamentos viga Benkelman, FWD e LWD;
- propor modelos de regressão entre os valores de módulo de elasticidade equivalentes obtidos com os equipamentos viga Benkelman e FWD;
- comparar os resultados e equações da pesquisa com valores de referência e equações de regressão presentes na literatura;
- estimar a vida útil do pavimento a partir dos módulos retroanalizados com a viga Benkelman e o FWD;
- comparar resultados de dimensionamento de reforço entre o Método MeDiNa e o procedimento DNER-PRO 011/79.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AVALIAÇÃO DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Os pavimentos devem ser avaliados de modo que seja possível se obter informações sobre a sua atual situação, identificação das causas das ocorrências verificadas e seleção das intervenções necessárias para a sua melhoria (TMR, 2012).

O grau de detalhamento dos levantamentos e o número de variáveis a inventariar deverão estar adequados às características dos pavimentos, ao uso da rodovia e aos objetivos pretendidos. Quanto maior o detalhamento dos estudos, maiores serão os custos envolvidos no processo de avaliação (MARCON, 1996).

De acordo com Pinto *et al.* (2013), em um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) as características e objetivos de uma campanha de avaliação depende do enfoque, seja nível de rede ou nível de projeto:

- nível de rede: visa determinar as necessidades atuais e futuras de manutenção para a rede viária, estimar a vida restante dos pavimentos, calcular o custo operacional, determinar os índices de condição dos pavimentos e as obras prioritárias dentro da malha avaliada;
- nível de projeto: relacionado ao projeto de um determinado segmento, visa diagnosticar detalhadamente as condições do pavimento propiciando a melhor utilização possível aos recursos da obra.

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

Deve ser avaliada a capacidade funcional e estrutural, ou seja, como a estrada satisfaz as necessidades dos usuários e como o pavimento responde às cargas atuantes do tráfego, respectivamente (TMR, 2012). No que se refere ao inventário funcional, Pinto e Preussler (2010) destacam a identificação dos defeitos de superfície, o conceito de Serventia e a medição da irregularidade longitudinal. Quanto à avaliação estrutural, os autores citam a medida das deflexões, a identificação das características das camadas do pavimento e a retroanálise dos módulos para as camadas da estrutura em condição *in situ*.

A avaliação estrutural dos pavimentos, objetivo desta dissertação, é mencionada de modo abrangente nos itens subsequentes da revisão bibliográfica.

2.2 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS

Conforme DNIT (2006b) e Pinto e Preussler (2010), o estudo das deflexões ou das condições de deformabilidade dos pavimentos asfálticos é fundamental para a compreensão de seu comportamento, pois refletem as condições estruturais das diversas camadas e do próprio subleito. Os dados de deflexão são empregados na retroanálise a fim de determinar a rigidez do pavimento em termos de módulo de elasticidade (FERRI, 2013; BURHANI, 2016).

Segundo Balbo (2007), a avaliação estrutural permitirá a subdivisão de um trecho de uma rodovia em segmentos homogêneos, apresentando parâmetros pouco variáveis para fins de projeto, sendo determinadas as deflexões características para cada segmento. Na sequência são apresentados os principais conceitos sobre a avaliação estrutural dos pavimentos e as características e equipamentos empregados nesta pesquisa.

2.2.1 Análise Mecanicista de Pavimentos

A mecânica dos pavimentos visa calcular as tensões, deformações e deslocamentos, uma vez conhecidos os parâmetros de deformabilidade dos materiais, geralmente com o emprego de programas computacionais. É verificado o número de repetições de carga que leva o revestimento asfáltico ou a camada cimentada à ruptura por fadiga. A mecânica dos pavimentos também avalia as deformações permanentes e a ruptura plástica nas camadas da estrutura (MEDINA; MOTTA, 2015).

Os parâmetros de deformabilidade podem ser obtidos segundo Medina e Motta (2015) em laboratório através de ensaios dinâmicos ou de cargas repetidas para solos do subleito, misturas asfálticas, misturas cimentadas e materiais granulares. Ainda conforme os autores, ensaios de campo, avaliação de deflexões, medição com sensores de força, deslocamento e temperatura, pesagens de veículos e avaliação de defeitos de superfície completam a relação de dados experimentais necessários para a calibração dos modelos de desempenho estrutural.

A fadiga ocorre quando os materiais, sendo repetidamente solicitados a níveis de tensão 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 (BALBO, 1997).

Os materiais empregados na pavimentação, a cada aplicação de carga, apresentarão uma componente de deformação residual, que, de maneira cumulativa ao longo do tempo, contribuirá para a ocorrência de deformações permanentes, principalmente nas trilhas de roda (BALBO, 1997, 2007).

Franco (2007) e Fritzen (2016) mencionam que a estrutura do pavimento é submetida a um carregamento superficial distribuído em uma área circular e pode ser modelada através da Teoria da Elasticidade, sendo necessário conhecer os módulos de elasticidade e o coeficiente de Poisson de cada material que constitui o pavimento. Franco (2007) complementa que os métodos geralmente empregados nos cálculos consideram os materiais segundo dois distintos comportamentos tensão-deformação, sendo: comportamento elástico linear e elástico-não linear.

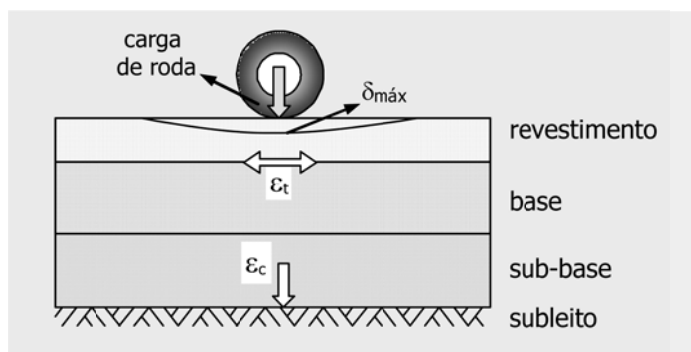
No que se refere à aplicação da Teoria da Elasticidade na análise mecanicista dos pavimentos (FRANCO, 2007, p. 24):

Boussinesq formulou em 1885 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. A partir da teoria de Boussinesq, Burmister apresentou em 1943 um método para determinar tensões e deformações em sistemas de duas e três camadas.

A Figura 1 mostra a configuração básica de um pavimento e as principais deformações e deslocamentos no interior da estrutura em função do carregamento, sendo:

- $\delta_{\text{máx}}$: o deslocamento vertical;
- ϵ_t : a deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento;
- ϵ_c : a deformação vertical de compressão no topo da camada do subleito.

Figura 1 - Esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos de um pavimento asfáltico



Fonte: Franco (2007).

2.2.2 Deformabilidade de Pavimentos Asfálticos

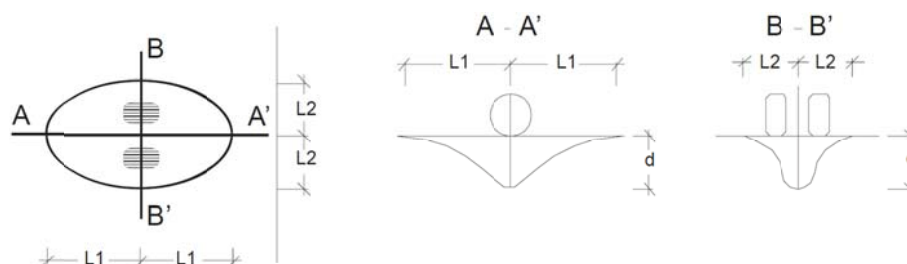
Dois tipos de deformações ocorrem nos pavimentos asfálticos, a cada passagem de roda do tráfego, sendo: deformações permanentes (ou irreversíveis) e recuperáveis (ou transitórias). As deformações permanentes, também chamadas de plásticas, permanecem

mesmo após cessar o efeito da atuação da carga, apresentando caráter residual como, por exemplo, as deformações permanentes geradas nas trilhas de roda. As deformações ou deflexões recuperáveis são aquelas que acontecem ainda no regime elástico do material, deixando de existir após a retirada da carga. As deformações recuperáveis são responsáveis pelo arqueamento das camadas do pavimento e a sua repetição é responsável pelo fenômeno da fadiga (BERNUCCI *et al.*, 2010; PINTO; PREUSSLER, 2010; DNIT, 2006b, 2011; SANTOS, 2014; LOPES, 2019).

Magalhães (2015, p. 1) define a deflexão como a “deformação vertical reversível observada na superfície do pavimento quando da aplicação de uma carga, o que traduz a deformação do conjunto solo de fundação-pavimento.” Segundo DNIT (2006b) e Pinto e Preussler (2010), a magnitude das deformações recuperáveis ou reversíveis é variável e depende de vários fatores tais como: geometria do carregamento, valor da carga, pressão de inflação do pneu, bem como a posição do ponto de medida em relação à posição da carga.

Ainda conforme DNIT (2006b) e Pinto e Preussler (2010), 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 de deformação e é ilustrada pela Figura 2.

Figura 2 - Representação da bacia de deformação e da deformada



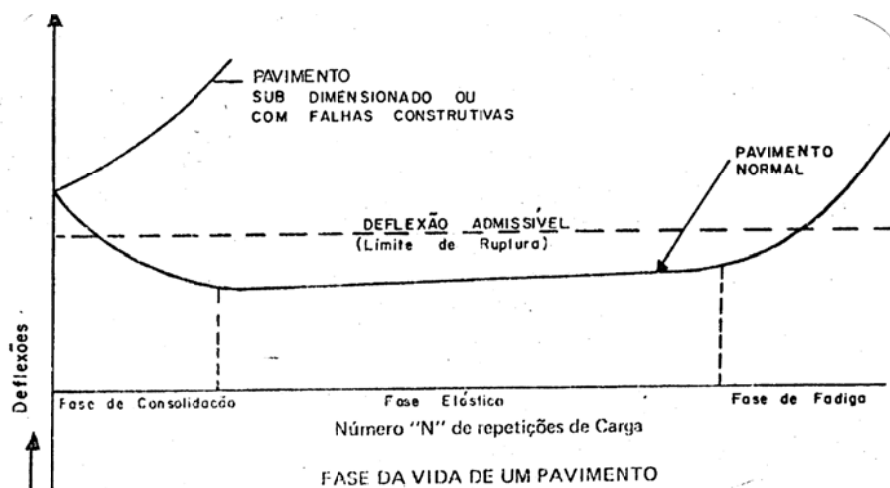
Fonte: DNIT (2006b).

Segundo disposto no Procedimento - B do DNER (1979) e Manual do DNIT (2006b), a evolução das deflexões recuperáveis ao longo da vida de um pavimento pode ocorrer em três fases, como pode ser verificado na Figura 3:

- fase de consolidação: esta fase inicia após a construção do pavimento e é caracterizada pelo decréscimo desacelerado do valor da deflexão, devido à consolidação adicional proporcionada pelo tráfego na estrutura do pavimento;
- fase elástica: a deflexão permanece com valor constante ou discreto crescimento;

- fase de fadiga: caracterizada por um acelerado crescimento do valor da deflexão devido à perda de capacidade estrutural das camadas do pavimento.

Figura 3 - Evolução das deflexões ao longo do período de projeto



Fonte: DNER (1979).

2.2.2.1 Parâmetros da Bacia de Deflexão

Bernucci *et al.* (2010, p. 445) comentam que: “Quando se mede o deslocamento elástico em vários pontos a partir da carga tem-se a denominada bacia de deflexão ou linha de influência da carga sobre um ponto do pavimento.” A deflexão recuperável máxima (D_0) é a medida de deflexão no ponto de aplicação da carga ao pavimento (FERRI, 2013).

Quanto maior o valor da deflexão D_0 , mais elástica ou resiliente é a estrutura e, por consequência, maior é o seu comprometimento estrutural. No entanto, estruturas distintas podem apresentar a mesma deflexão máxima, porém com arqueamento diferenciado da bacia de deflexão, sendo necessário considerar a forma da bacia na avaliação estrutural do pavimento (DNIT, 2006b; BALBO, 2007; PINTO; PREUSSLER, 2010; FRANCO *et al.*, 2019).

Segundo DNER (1979) 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.

Raio de Curvatura (R)

“O raio de curvatura é um parâmetro indicativo do arqueamento da bacia de deformações na sua porção mais crítica, em geral considerada a 25cm do centro da carga.”

(FERRI, 2013, p. 120). Segundo DNIT (2006b), são considerados críticos valores de raios de curvatura inferiores a 100m.

Os parâmetros deflexão recuperável máxima (D_0) e raio de curvatura (R) são grandezas inversamente proporcionais, por exemplo, deflexão com resultado baixo e raio de curvatura com valor alto, indica que existe boa qualidade estrutural do pavimento e subleito (SANTOS, 2014).

Franco *et al.* (2019) explicam que a curvatura da bacia se reflete em módulos elásticos distintos em função da condição em que os materiais do pavimento se encontram. Dessa forma, analisar a bacia completa permite um diagnóstico mais preciso da condição do pavimento e a definição mais assertiva da solução de restauração a empregar.

Fatores de Forma da Bacia de Deflexão

São indicados alguns parâmetros adicionais no que se refere à forma da bacia de deflexão (ZHENG; ZHANG; LIU, 2019):

- Fator área: é proporcional à resistência do pavimento e do subleito, sendo calculado pela Equação 1:

$$\text{Área} = 6 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{D_{30}}{D_0} + 2 \cdot \frac{D_{45}}{D_0} + \frac{D_{60}}{D_0} \right) \quad (1)$$

- Coeficiente ($F - 1$): é a representação do valor da curvatura da bacia de deflexão, sendo inversamente proporcional à resistência do pavimento e resistência do subleito, calculado pela Equação 2:

$$F - 1 = \frac{D_0 - D_{45}}{D_{30}} \quad (2)$$

- Índice de Curvatura da Superfície (SCI): parâmetro mais sensível à variação de temperatura e é definido como a diferença entre as deflexões D_{30} e a deflexão D_0 .

Além dos fatores mencionados, Ferri (2013) apresenta três índices complementares:

- Índice de Danos à Base (BDI): diferença entre as deflexões D_{60} e D_{30} , sendo um bom indicador da condição da base.

- Índice de Curvatura da Base (BCI): diferença entre as deflexões D_{90} e D_{60} , sendo um bom indicador da condição do subleito.

- Fator de Curvatura (CF): diferença entre as deflexões D_{20} e D_0 , sendo o melhor parâmetro para estimar a probabilidade de fissuração do revestimento asfáltico.

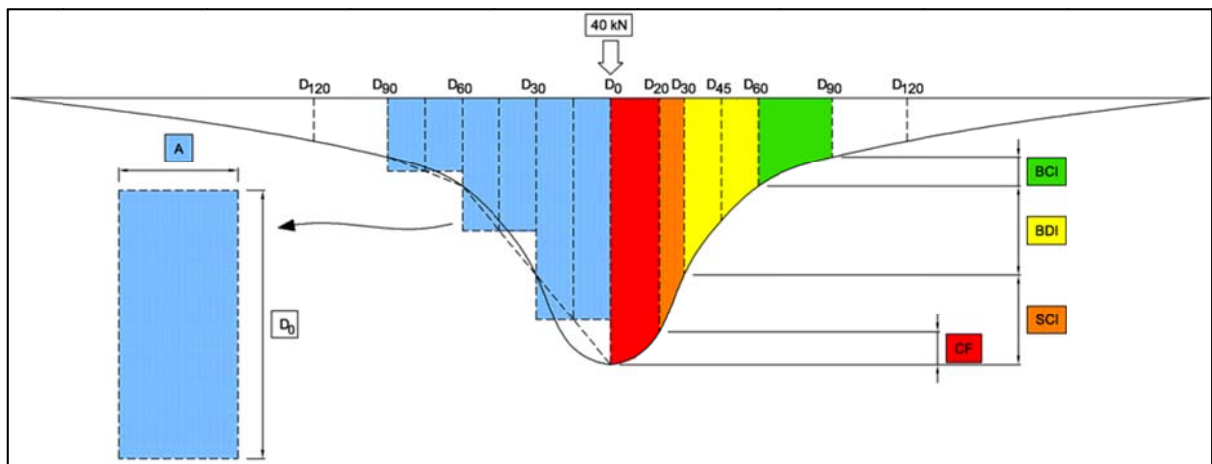
Onde:

D_0 , D_{20} , D_{30} , D_{45} , D_{60} e D_{90} = deflexões para as distâncias de 0, 20, 30, 45, 60 e 90 cm, respectivamente, expressas em 0,01 mm.

Souza Júnior (2018) identificou em sua pesquisa bibliográfica que os parâmetros SCI, BDI e BCI são calculados a partir das bacias deflectométricas medidas com o FWD, com a aplicação de uma carga de roda de aproximadamente 4,1 tf.

Através da Figura 4 são representados esquematicamente os principais fatores de forma da bacia de deflexão. Horak (2008) apresentou, conforme Quadro 1, intervalos para a classificação dos pavimentos conforme os valores calculados para os parâmetros das bacias deflectométricas.

Figura 4 - Representação gráfica da bacia de deflexão e os respectivos índices de forma



Fonte: Ferri (2013).

Quadro 1 - Classificação de pavimentos com base granular em função das deflexões

Estado do pavimento	D_0 (0,01 mm)	R (m)	SCI (0,01 mm)	BDI (0,01 mm)	BCI (0,01 mm)
Seguro	< 50	> 100	< 20	< 10	< 5
Em alarme	50 – 75	50 – 100	20 – 40	10 – 20	5 – 10
Severo	> 75	< 50	> 40	> 20	> 10

Fonte: Adaptado de Horak (2008) e Rocha (2020).

2.2.2.2 Fatores Climáticos que Influenciam os Valores de Deflexão

De acordo com Obazee-Igbinedion e Owolabi (2018), a intensidade e a forma das deflexões no pavimento são função dos fatores que causam a deterioração de sua estrutura, entre eles: cargas por eixo dos veículos, temperatura, umidade e seção estrutural.

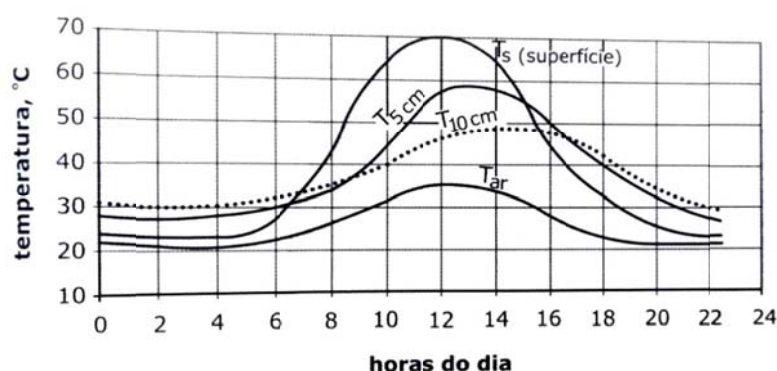
O teor de umidade do subleito pode aumentar em dias ou estações chuvosas, diminuindo assim sua capacidade de suporte. Como esses períodos variam ao longo do ano, o

valor da deflexão medida no pavimento não será constante, sendo dependente do período em que forem realizados os levantamentos (SOUZA JÚNIOR, 2018).

“A temperatura do ar atua diretamente nas propriedades resilientes dos materiais asfálticos devido à natureza viscosa dos ligantes asfálticos. Essa influência da temperatura, no entanto, não é muito observada nos demais materiais utilizados em pavimentação.” (FRANCO, 2007, p. 131).

Medina e Motta (2015) também mencionam que as variações diárias e sazonais da temperatura causam variações na rigidez dos revestimentos asfálticos, logo a deformabilidade do pavimento é condicionada pelas variações da temperatura do ar ou das condições meteorológicas de um modo geral. Os autores mostram, esquematicamente a partir da Figura 5, as medidas de temperatura do ar e de um pavimento a várias profundidades e num dia de verão. Percebe-se que os pontos máximos de temperatura das curvas se deslocam no sentido do tempo crescente quando as profundidades aumentam.

Figura 5 - Temperatura do ar e do pavimento num dia de verão no Rio de Janeiro (esquemático)



Fonte: Medina e Motta (2015).

Zheng, Zhang e Liu (2019) realizaram pesquisa sobre a influência da temperatura nos fatores de forma da bacia de deflexão do pavimento. Foram selecionados três pavimentos semirrígidos, cada um com distintas espessuras de revestimento asfáltico: sendo 7, 15 e 25 cm. Os testes foram realizados em intervalos de 01 hora, das 7hs às 7hs do dia seguinte, em diferentes períodos de um ano. Conforme Figura 6, a temperatura do pavimento varia em função da temperatura do ar e em função da espessura do revestimento asfáltico, tendo sido encontrados modelos de regressão entre estas variáveis com coeficiente de correlação (r) superior a 0,97. Destaca-se que a deflexão máxima D_0 variou significativamente com a temperatura do pavimento. Em complemento, foi identificado que, quanto maior a espessura

do revestimento asfáltico, maior é a influência da temperatura nas medidas de deflexão, segundo Figura 7.

Figura 6 - Variação da temperatura

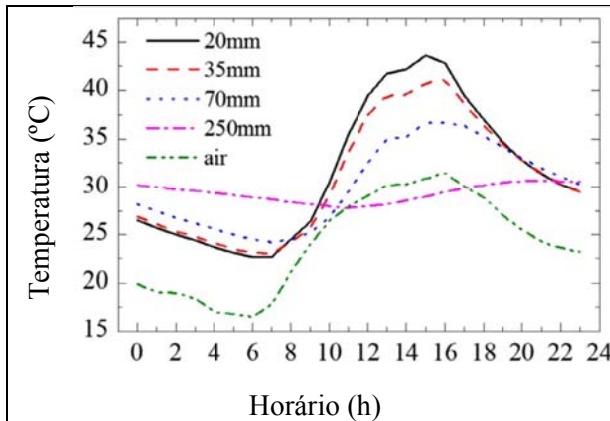
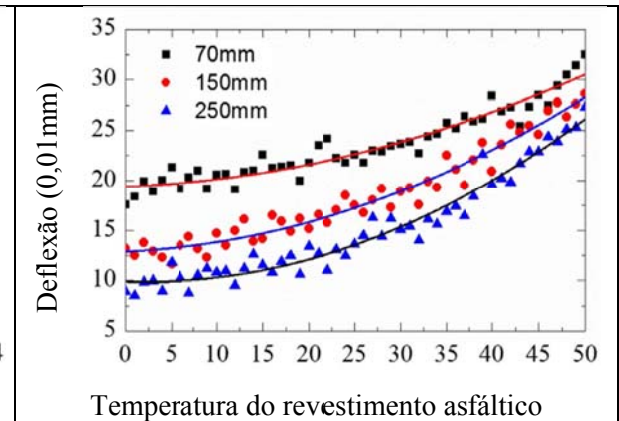


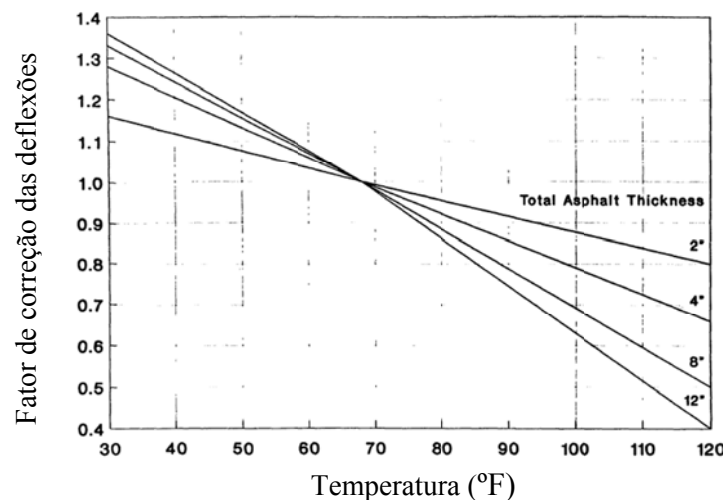
Figura 7 - Variação das deflexões



Fonte: Adaptado de Zheng, Zhang e Liu (2019).

No Guia da AASHTO (1993) para dimensionamento de pavimentos, consta ábaco que permite a correção das deflexões para uma temperatura padrão, convencionada como 20°C (ou 68°F). O fator de correção é obtido com base no valor da temperatura do revestimento asfáltico quando da aferição das deflexões (em °F) e a espessura da camada asfáltica (em polegadas). O ábaco está disposto na Figura 8 e refere-se a pavimentos com base granular.

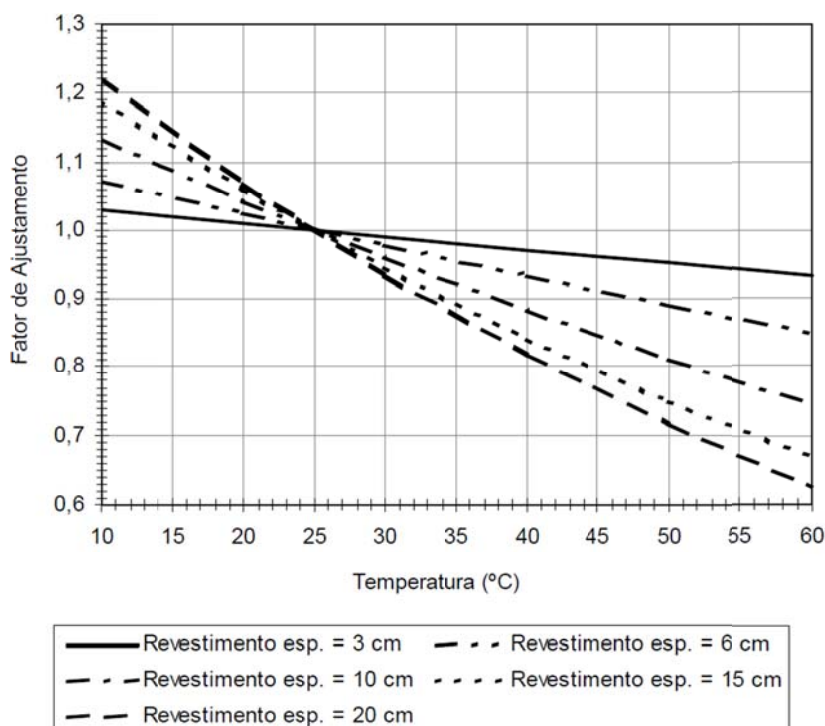
Figura 8 - Fator de correção da deflexão em função da temperatura do revestimento (AASHTO, 1993)



Fonte: Adaptado de AASHTO (1993).

O DER-SP (2006b) recomenda a correção das deflexões em função da temperatura do revestimento asfáltico, padronizando as medidas para a temperatura referência de 25°C. Para tanto, recomenda o modelo apresentado por Andreatini, conforme Figura 9.

Figura 9 - Fator de correção em função da temperatura do revestimento (DER-SP, 2006)



Fonte: DER-SP (2006b).

Bueno (2016) indicou a Equação 3, adaptada do ábaco proposto pelo DER-SP (2006b), que permite calcular a deflexão para a temperatura de referência de 25°C em função da temperatura da superfície e espessura do revestimento asfáltico.

$$D_{25^{\circ}\text{C}} = \frac{D}{\{ [(h_{CA} / 1000) \cdot (T - 25)] + 1 \}} \quad (3)$$

Onde:

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

D = deflexão medida (0,01mm);

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

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

2.2.3 Módulo Resiliente

De acordo com Pinto e Preussler (2010), convencionou-se designar de deformação resiliente, a deformação elástica ou recuperável de solos e de estruturas de pavimentos sob a

ação de carregamentos repetidos. Resiliência é classicamente definida como a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, sendo devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações.

Santos (2003) menciona que, a partir da década de 60, a mecânica dos pavimentos teve um grande desenvolvimento com a aplicação de métodos numéricos de análise e o emprego de ferramentas computacionais. As análises mecanísticas do pavimento empregam, na maioria das vezes, a teoria da elasticidade e consideram o pavimento como um sistema de várias camadas.

Conforme Salviano (2015, p. 16), “a análise mecanística de um pavimento tem como objetivo a compatibilização dos níveis de tensão, deformação e deflexão gerados pelo tráfego solicitante com as características dos materiais empregados.” O autor complementa que, para o emprego do método mecanístico-empírico de dimensionamento do pavimento, é necessário o conhecimento das características de cada um dos materiais utilizados presentes nas camadas do pavimento.

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, assim como seus respectivos coeficientes de Poisson. O valor do módulo pode ser obtido em laboratório ou em campo (retroanálise das deflexões). Bernucci *et al.* (2010) explica que o termo “módulo de resiliência” é empregado ao valor determinado em laboratório através de ensaio de carga repetida e o termo “módulo de elasticidade” é empregado para o módulo obtido segundo o processo de retroanálise. Também se verifica na bibliografia que, como os módulos retroanalizados não necessariamente representam os módulos reais das camadas, são também denominados “módulos equivalentes”. Os autores Medina e Motta (2015) citam a norma ASTM D5858, a qual menciona a determinação do “módulo elástico equivalente” quando da realização do processo de retroanálise.

O módulo de resiliência pode ser obtido através de ensaios de laboratório como por exemplo: compressão diametral, ensaio de viga e triaxial cíclico, sendo este último o de maior utilização. Os ensaios de laboratório apresentam a vantagem de permitir maior controle das condições da amostra, dos sistemas de aplicações do carregamento e de medida dos deslocamentos (SANTOS, 2003).

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 e Preussler (2010) informam que o valor do módulo de resiliência é definido em laboratório através do ensaio triaxial de cargas repetidas, resultante da relação entre tensão aplicada (σ_d) e a respectiva deformação (ϵ_R) sofrida, conforme Equação 4:

$$Mr = \sigma_d / \epsilon_R \quad (4)$$

Onde:

Mr = módulo de deformação resiliente;

σ_d = tensão desvio aplicada repetidamente;

ϵ_R = deformação específica axial resiliente, correspondente a um número particular de repetição da tensão desvio.

2.2.4 Retroanálise

A retroanálise é um procedimento de avaliação mecânica e emprega como base as análises lineares elásticas das deflexões na superfície do pavimento. As deflexões aferidas em campo são comparadas com as deflexões calculadas e os módulos necessários para esta aproximação são determinados, caracterizando o processo de retroanálise (LOPES, 2019).

Segundo DNIT (2006b), busca-se determinar através de processo iterativo, com auxílio de programa computacional que permita o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos em pavimentos, os valores de módulo para cada camada do pavimento que reproduza a bacia de deflexão levantada em campo.

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).

O processo de retroanálise se justifica por permitir (BERNUCCI *et al.*, 2010):

- determinar os módulos de elasticidade nas condições *in situ*;
- eliminar ou minimizar a coleta de amostras;
- caracterizar com rapidez as camadas em termos de elasticidade;
- verificar a condição estrutural de cada camada do pavimento e subleito.

Bernucci *et al.* (2010, p. 455) também indica algumas desvantagens do processo, destacando-se: “o conjunto de módulos retroanalizados não é único, depende do programa utilizado para obtê-los, das hipóteses simplificadoras, dos níveis de ajustes atingidos etc.”

Encontram-se disponíveis inúmeros programas 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. Mais recentemente, o *software* de retroanálise que integra o novo método de

dimensionamento a ser implantado no Brasil, é denominado BackMeDiNa (SOUZA JÚNIOR, 2018).

Na pesquisa desenvolvida por Souza Júnior (2018), os módulos de elasticidade foram determinados através de retroanálise das bacias de deflexão com o emprego do *software* BackMeDiNa. No estudo elaborado por Lopes (2019), foram utilizados três programas de retroanálise: o PITRA-BACK, o ELMOD e o BackMeDiNa, sendo possível concluir que o BackMeDiNa e o ELMOD, quando bem calibrado, fornecem módulos aproximados.

Conforme Vieira (2020), no processo de retroanálise deve ser estabelecido um critério de parada, definindo o momento em que o ajuste das bacias deflectométricas seja satisfatório. Cita-se o critério da raiz média quadrática (RMS), que é determinado a partir das diferenças entre as deflexões calculadas e as deflexões medidas, conforme Equação 5.

$$RMS = \left[\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{100 \times (d_c - d_m)}{d_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Onde:

d_c = deflexão calculada (0,01mm);

d_m = deflexão medida (0,01mm);

n = número de deflexões aferidas na superfície do pavimento.

2.2.4.1 Determinação do Coeficiente de Poisson

Conforme DER-SP (2006a) e Balbo (2007), 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. Os Quadros 2 e 3 indicam faixas de variação para o coeficiente de Poisson, devendo ser considerado um valor constante para cada camada do pavimento no processo de retroanálise.

Quadro 2 - Valores típicos para o coeficiente de Poisson segundo DER-SP (2006a)

Material	Faixa de variação	Valor recomendado
Concreto de cimento Portland	0,10 – 0,20	0,15
Materiais estabilizados com cimento	0,15 – 0,30	0,20
Misturas asfálticas	0,15 – 0,45	0,30
Materiais granulares	0,30 – 0,40	0,35
Solos do subleito	0,30 – 0,50	0,40

Fonte: Adaptado de DER-SP (2006a).

Quadro 3 - Valores típicos para o coeficiente de Poisson segundo Balbo (2007)

Material	Faixa de variação
Misturas asfálticas	0,32 – 0,38
Concreto de cimento Portland	0,15 – 0,20
Brita graduada simples (BGS) Macadame hidráulico (MH) Bica corrida (BC)	0,35 – 0,40
Concreto compactado com rolo (CCR) Brita graduada tratada com cimento (BGTC)	0,15 – 0,20
Solo cimento (SC) Solo melhorado com cimento (SMC)	0,20 – 0,30
Solo cal (SCA)	0,25 – 0,30
Solos arenosos	0,30 – 0,35
Areias compactadas	0,35 – 0,40
Solos finos	0,40 – 0,45

Fonte: Adaptado de Balbo (2007).

No módulo de retroanálise BackMeDiNa, versão 1.1.0 (abril/2018), ao inserir as camadas do pavimento, 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.

2.2.4.2 Conversão do Carregamento com Eixo Padrão

Vários *softwares* empregados para a realização da retroanálise, estando incluso o BackMeDiNa, estão configurados para a inserção de bacias de deflexão obtidas com o equipamento FWD, informando-se o raio da placa circular e o carregamento aplicado. Theisen *et al.* (2009) mencionam que, no caso dos levantamentos deflectométricos realizados com a viga Benkelman, há a atuação da carga de eixo simples de rodas duplas (8,2 tf) e neste caso os *softwares* adaptados para o FWD não simulam o carregamento real no pavimento, visto que agora há a atuação de duas cargas (pneus) no pavimento e no ponto de estudo.

Theisen *et al.* (2009) propuseram uma metodologia para o emprego dos dados coletados com a viga Benkelman e a utilização dos programas para retroanálise de bacias obtidas via FWD. A base para a metodologia é o princípio da sobreposição de efeitos, sendo que cada uma das cargas (rodas duplas) é responsável por metade da deflexão do pavimento. Dessa forma, pode ser considerada na retroanálise a atuação de apenas uma carga, entretanto

novas distâncias “X” com relação ao centro geométrico da carga em questão devem ser calculadas em função das distâncias “x” entre os pontos da bacia de deflexão, utilizando-se a Equação 6. A Figura 10 ilustra a adequação necessária para as distâncias da bacia de deflexão.

$$X_i = [(x_i)^2 + (0,5dcg)^2]^{1/2} \quad (6)$$

Onde:

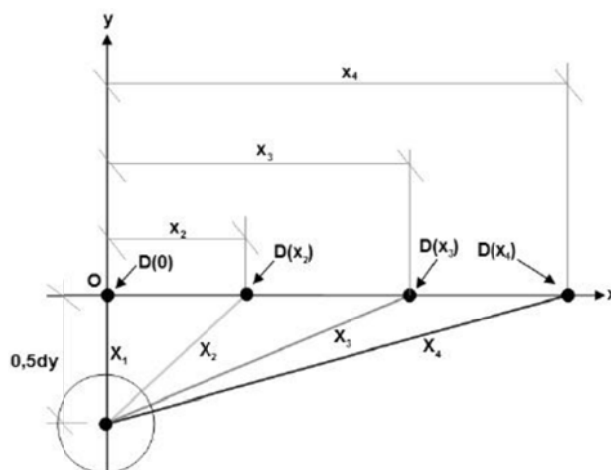
X_i = distância calculada;

x_i = distância entre os pontos da bacia de deflexão;

dcg = distância entre o centro geométrico das placas carregadas.

Segundo Theisen *et al.* (2009, p. 4), “(...) se para cada x_i há uma deflexão associada D_i , o método simplesmente se trata da substituição de x_i por X_i e de D_i por $0,5D_i$ na Retroanálise de um dado conjunto de bacias deflectométricas (...).”

Figura 10 - Cálculo das distâncias “X” em função das distâncias “x”



Fonte: Adaptado de Theisen *et al.* (2009).

Medina e Motta (2015) detalham o cálculo do diâmetro de uma roda do semieixo padrão. Para a carga por roda de 20 kN e a pressão de inflação do pneu de 55 N/cm² (5,6 kgf/cm² ou 80 lb/pol²), considerada igual à pressão de contato com o pavimento, temos o cálculo da área circular de contato (A) e diâmetro (d) segundo Equações 7 e 8, respectivamente:

$$A = (2 \cdot 104) / 55 = 363 \text{ cm}^2 \quad (7)$$

$$D = 2 \cdot (A / \pi)^{1/2} = 2 \cdot (363 / \pi)^{1/2} = 21,4 \text{ cm} \quad (8)$$

Dessa forma é obtido o raio de aproximadamente 10,8 cm, o qual é comumente utilizado em cálculos de tensões e deformações.

2.2.5 Métodos Destrutivos para Avaliação do Pavimento

Conforme Bernucci *et al.* (2010) e Moraes (2015), os métodos destrutivos (Figura 11) caracterizam-se pela abertura de poços de sondagem ou trincheiras no pavimento da rodovia em avaliação. O procedimento destina-se à identificação dos materiais componentes da estrutura do pavimento, medição das espessuras das camadas, ensaios *in situ* (densidade e umidade) e coleta de amostras para ensaios de laboratório: granulometria, compactação, ISC, módulo resiliente, equivalente de areia, extração do teor de ligante, entre outros.

As desvantagens do método são de fácil percepção, tendo em vista a necessidade de intervenção no tráfego, atenção à sinalização de obras, treinamento do pessoal designado para a tarefa, necessidade de várias pessoas para o trabalho, ritmo lento, desestruturação pontual do pavimento (mesmo que recomposto), entre outros.

Figura 11 - Poço de inspeção no pavimento



Fonte: A autora (2012).

2.2.6 Métodos Semi-Destrutivos

Segundo Moraes (2015), as avaliações semi-destrutivas são realizadas com a utilização de equipamentos portáteis de pequenas dimensões e são ocasionadas menores aberturas no pavimento para as inspeções. Como exemplo é citado o *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP), aparelho que mede a capacidade de suporte do solo *in situ*, em estado natural ou compactado.

2.2.7 Métodos Não Destrutivos

Com fins de determinação das deflexões no pavimento asfáltico, são realizadas medições através de métodos não destrutivos, os quais podem ser executados através de três tipos de equipamentos, conforme DNIT (2006b):

- vigas de deflexão - medem a deflexão no pavimento submetido a uma carga estática ou uma carga em movimento vagaroso - exemplos: viga Benkelman e vigas de deflexão automatizadas;

- equipamentos dinâmicos de vibração - medem a resposta do pavimento quando submetido a uma carga vibratória ou cíclica - exemplo: Dynaflect;

- equipamentos dinâmicos de impacto - transferem ao pavimento uma carga dinâmica de impacto - chamados *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

Será enfatizado de modo detalhado o uso da viga Benkelman e do FWD, que são os equipamentos mais conhecidos e utilizados no Brasil. Ainda, são acrescentadas informações sobre o equipamento LWD, cujo emprego é pouco difundido na região de estudo da presente dissertação de mestrado.

2.2.7.1 Viga Benkelman

A viga Benkelman (Figura 12) é um equipamento associado à grande experiência do meio técnico brasileiro (GOMES; ALBERNAZ; FERNANDES JÚNIOR, 2014) empregada tanto para levantamento das deflexões para projeto assim como em obras para liberação das camadas do pavimento em execução.

É um equipamento de baixo custo, operado manualmente, podendo testar tanto a trilha interna como a trilha externa do pavimento, geralmente sendo empregado para projetos específicos e não recomendado para avaliação de rede devido à demora de execução do ensaio (TMR, 2012).

Figura 12 - Viga Benkelman posicionada para a medição



Fonte: A autora (2013).

No Brasil, o método de ensaio é padronizado pela especificação 024-ME (DNER, 1994) que resume o posicionamento da ponta de prova da viga entre os pneus da roda dupla

de um caminhão calibrado com 8,2 tf de carga no eixo traseiro (eixo simples e com roda dupla). Estando o caminhão parado, através do extensômetro da viga é realizada leitura inicial (L_o), posteriormente o caminhão é deslocado adiante (em distância que não influencie a leitura das deflexões) sendo realizada nova leitura denominada final (L_f).

As deflexões são então calculas a partir da Equação 9:

$$D_o = (L_o - L_f) \cdot a / b \quad (9)$$

Onde:

D_o = deflexão real ou verdadeira, em centésimos de milímetro (0,01 mm);

L_o = leitura inicial (0,01 mm);

L_f = leitura final (0,01 mm);

a / b = relação entre a parte maior e a menor do braço de prova (também chamada constante da viga Benkelman).

Ainda de acordo com DNER (1994) para fins de determinação do raio de curvatura da bacia de deflexão, é necessário realizar uma leitura adicional, após o deslocamento do caminhão 25cm a frente do ponto de prova do pavimento. O cálculo do parâmetro é efetuado com base na Equação 10:

$$R = \frac{6250}{2 \cdot (D_o - D_{25})} \quad (10)$$

Onde:

R = raio de curvatura (m);

D_o = deflexão real ou verdadeira (0,01mm);

D_{25} = deflexão a 25cm do ponto de prova (0,01mm).

Para fins de determinação da bacia de deflexão, deve ser empregada a norma 133-ME (DNIT, 2010a), sendo necessárias leituras intermediárias após o deslocamento do caminhão e em sucessivas paradas, conforme distâncias especificadas na normativa.

Borges (2001) relacionou algumas dificuldades acerca da operação com a viga Benkelman, sendo:

- dificuldade em determinar o raio de curvatura e a bacia de deflexão;
- dispersão elevada das leituras;
- não se pode assegurar que as bases de apoio da viga estejam fora da deformada;
- o sensor mede a deflexão estacionária;
- morosidade do teste.

A viga Benkelman foi projetada considerando-se que a área deformada do pavimento, ou seja, a área de influência da carga, não atinja os pés de apoio da viga (BORGES, 2001),

fato que causaria distorções nas leituras. A viga geralmente empregada nas leituras, com relação a/b igual a 2/1, sendo 2 metros o comprimento da ponta de prova à articulação, pode ser adquirida com a relação 3/1 ou 4/1, garantindo maior distanciamento da ponta de prova ao apoio dianteiro.

2.2.7.2 *Falling Weight Deflectometer* (FWD)

O equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD) utiliza um peso em queda para carregamento do pavimento através de uma placa circular. A carga do pavimento pode ser variada e são utilizados geofones para a medição das deformações em pontos específicos a partir do ponto de aplicação da carga, garantindo mais precisão para a determinação das bacias de deflexão (TMR, 2012).

A forma do pulso de carga gerada pelo equipamento é semelhante à obtida a partir de uma carga de roda em movimento, logo o FWD reproduz com maior precisão as deformações reais produzidas pela movimentação de cargas (PINTO *et al.*, 2013).

O FWD é normalmente rebocado por um caminhão que abriga um sistema de controle do sistema hidráulico, de dados e geração de energia, para recarga das baterias instaladas no reboque. O controle do sistema hidráulico, que aplica as cargas no pavimento, é realizado por computador e digitador de sinais instalados no veículo (DNER, 1996).

Na Figura 13 são identificados os principais componentes do FWD: os geofones dispostos ao longo de uma barra de sustentação, conjunto de peso e placa de apoio na superfície. A barra de sustentação e a placa de apoio são suspensas quando o equipamento não está em uso.

Figura 13 - Equipamento FWD



Fonte: A autora (2015).

O DNIT estabeleceu o procedimento para determinação das deflexões com uso do FWD através da norma 273-PRO (DNER, 1996). Conforme esta especificação a carga normalmente aplicada ao pavimento é de 40 kN, regulada também através da altura de carga. Citamos ainda que a calibração do FWD é padronizada no Brasil através da normativa 132-PRO (DNIT, 2010b): Pavimentos - Calibração da célula de carga e de sensores de deflexão dos deflectômetros do tipo “*Falling Weight Deflectometer (FWD)*” - Procedimento.

2.2.7.3 Equivalência entre os Valores de Viga Benkelman e FWD

De acordo com Gomes, Albernaz e Fernandes Júnior (2014) são diferentes os valores de deflexões obtidos com viga Benkelman e FWD em um mesmo local do pavimento, sendo que geralmente os valores de viga são superiores aos obtidos com FWD. Esta divergência pode ocorrer por muitos fatores e não somente pelo tipo de carregamento aplicado.

Sendo cada vez mais difundido o emprego do FWD nas avaliações estruturais, têm sido crescentes as pesquisas em busca de modelos de regressão entre os dois equipamentos (BORGES, 2001). Ainda segundo Gomes, Albernaz e Fernandes Júnior (2014), não há equações para a aplicação generalizada, inclusive algumas publicações ressaltam a grande divergência de valores que pode ser observada em pavimentos com estruturas diferentes.

Segundo Bueno (2016), apesar de se buscar correlações entre viga Benkelman e FWD na prática de engenharia, entende-se como adequado o emprego dos dados provenientes de ensaios com o FWD, pois permitem a elaboração de projetos mais refinados de reforço dos pavimentos, através de rotinas mecanicista-empíricas. As rotinas mencionadas estão em evidência no atual estado da arte da pavimentação nacional.

2.2.7.4 *Light Weight Deflectometer (LWD)*

O *Light Weight Deflectometer (LWD)* foi desenvolvido na Alemanha e com o objetivo de obter o módulo dinâmico do solo *in situ*. Este parâmetro é comumente utilizado para a definição do grau de compactação do solo em rodovias e em aterros (ELHAKIM; ELBAZ; AMER, 2014). Ayyanchira (2014) complementa que, através de modelos de regressão com o módulo dinâmico, é possível determinar o Índice de Suporte Califórnia do solo (ISC ou CBR). A Figura 14 ilustra o equipamento durante testes para a obtenção do grau de compactação em um determinado subleito (PREUSSLER, 2007).

“O modo de operação do LWD é semelhante ao do *Falling Weight Deflectometer (FWD)*. O LWD aplica uma carga de impulso sobre uma placa circular e calcula a rigidez do

subleito sob a placa.” (FERRI, 2013, p. 111). Segundo Ayyanchira (2014), são ajustadas a magnitude da carga, altura de queda e a área de impacto de modo a simular cargas dinâmicas.

Figura 14 - Realização de ensaio com o LWD.



Fonte: Preussler (2007).

Magalhães (2015) informa que o emprego do LWD pretende tornar mais rápido o processo de análise de capacidade de carga de pavimentos e solos e, por ser um equipamento mais leve e compacto, pode chegar a locais inacessíveis com o FWD.

Ferri (2013, p. 111) menciona as partes componentes do equipamento LWD:

O LWD consiste de três seções principais: uma base com uma placa de carga, célula de carga, e transdutor de velocidade, um conjunto de massa deslizante, e um quadro superior que consiste em uma haste guia, um mecanismo de liberação de bloqueio e amortecedores de borracha.

O LWD permite a avaliação da deflexão recuperável através do golpe de uma massa de 10, 15 ou 20 kg, a depender do modelo do equipamento. O tempo médio da execução de cada ensaio é de 3 minutos e a influência humana na execução e transmissão dos resultados é pequena. O equipamento pode incluir GPS, o qual permite identificar o ponto de realização de cada ensaio (SANTOS, 2014).

São citadas algumas vantagens para o emprego do LWD (RODRIGUES, 2017):

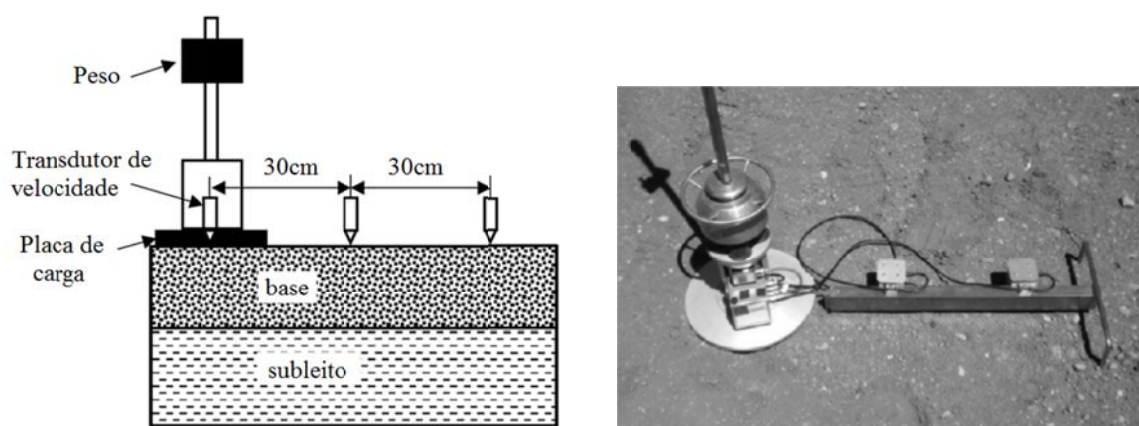
- tempo mínimo para a realização do ensaio, na ordem de 2 minutos por ponto de teste;
- não é necessário veículo pesado para o emprego de carregamento ao pavimento;
- formato ergonômico, fácil transporte e operação;
- resultado apresentado imediatamente após a realização do ensaio;
- dados podem ser impressos ou armazenados de modo digital;

- aplicação diversa em obras de engenharia: construção de rodovias e ferrovias, terraplenagem, controle de compactação de valas e canais, inspeção de qualidade de reaterro de fundação e em perfurações.

Machado (2012) menciona que uma das desvantagens do LWD é o limite de carga máxima aplicável, que não ultrapassa o valor de 20 kN. A autora ainda destaca que, o fato do operador ter que segurar o equipamento, garantir a estabilidade, impulsionar a carga e travar o peso no seu retorno após a aplicação, torna-o sujeito a erros.

Marecos *et al.* (2017) comentam que a profundidade de medição do LWD (normalmente duas vezes o diâmetro da placa) e as cargas incidentes são inferiores em relação ao FWD. O LWD realiza a medida de deflexão no ponto de aplicação da carga e pode ser complementado por um módulo extra, permitindo a obtenção de leituras a 30cm e 60cm do centro, conforme pode ser visualizado na Figura 15. Em comparação, os autores mencionam que o FWD pode realizar medições em até nove pontos e com distância máxima de 2,10 m da aplicação da carga.

Figura 15 - Sensores complementares ao LWD



Fonte: Adaptado de Grasmick *et al.* (2015).

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%.

Fleming, Frost e Lambert (2007) indicam a Equação 11 para o cálculo do módulo de deformabilidade a partir do ensaio com o equipamento LWD:

$$E = \frac{A \cdot P \cdot r \cdot (1 - v^2)}{d} \quad (11)$$

Onde:

E = módulo de deformabilidade (MPa);

A = fator de rigidez da placa ($A = 2$ para placa flexível e $A = \pi/2$ para placa rígida);

P = pressão máxima de contato (kPa);

r = raio da placa (m);

ν = coeficiente de Poisson (usualmente entre 0,30 e 0,45);

d = deflexão de pico (mm).

Segundo Rodrigues (2017), além do valor do módulo de deformabilidade e valor de deflexão, o LWD também fornece o valor do grau de compatibilidade (s/v), que é um valor empírico que indica a relação entre a deflexão e a velocidade de aplicação da força.

Na pesquisa desenvolvida por Ferri (2013), foram identificados alguns fabricantes e modelos de LWD, sendo:

- Dynatest 3031 LWD: fabricado por empresa da Dinamarca, conjunto de massa de 10kg (padrão), 15kg, ou 20kg e o diâmetro do prato de carga pode ser alternado entre 300 ou 150mm;

- ZORN ZFG 3000: fabricado por empresa alemã, conjunto de massa nas versões 10kg e 15kg, diâmetro da placa de 300 ou 150mm e intervalo de medidas de 5 a 70MN/m² (versão 10kg) ou de 70 a 105 MN/m² (versão 15kg);

- CARL BRO Prima 100 LWD: equipamento do grupo europeu Grontmij S/A, peso de massa de 10 a 15kg e prato de carga nas dimensões 100, 200 ou 300mm;

- LOADMAN: fabricado pelo grupo finlandês AL-Engineering Oy, com peso da carga de queda de 10kg e diâmetro do prato de carga 132, 200 ou 300mm;

- TML Small: fabricado pelo grupo japonês Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltda., mencionando ensaio em pavimento asfáltico delgado com prato de carga de 300mm e carga de queda de massa de 25kg.

Para a execução do ensaio, Rodrigues (2017, p. 61) indica o emprego de “uma camada uniforme de areia fina para melhorar a aderência da placa de carga com a superfície a fim de proporcionar uma superfície nivelada para distribuir o impacto de maneira uniforme.”

O LWD, apesar do carregamento inferior realizado ao pavimento em comparação ao FWD, vem sendo utilizado principalmente em camadas de solo, camadas granulares e para controle tecnológico da pavimentação, entretanto foram identificadas pesquisas para pavimentos asfálticos (conforme item 2.2.8 apresentado sequencialmente) alcançando resultados satisfatórios nas correlações entre LWD e FWD, principalmente ao se empregar

baixos carregamentos com o FWD, camadas asfálticas delgadas, estradas locais ou em estruturas de pavimentos com menor profundidade.

2.2.8 Estudos Comparativos entre os Métodos Não Destrutivos

Diversos autores têm desenvolvido estudos comparando resultados de medições através de equipamentos para avaliação estrutural do pavimento. Na sequência são apresentados os principais estudos identificados na bibliografia consultada.

O estudo realizado por Borges (2001) abrangeu leituras de viga Benkelman e FWD (modelo KUAB) em 56 segmentos de rodovias distribuídas pelo estado de Santa Catarina, sendo cada segmento com um quilômetro de extensão. Os segmentos englobam as três regiões geológicas do estado, três níveis de condição defletoométrica e oito tipos de estruturas do pavimento. A pesquisa demonstrou comportamentos distintos na relação entre medidas de deflexão com a viga Benkelman e o FWD, a depender da estrutura do pavimento, tipo de material e espessura, indicando os modelos de regressão dispostos no Quadro 4 para emprego em situações em que não se tenha disponibilidade de um modelo próprio.

Quadro 4 - Modelos de regressão entre viga e FWD para rodovias catarinenses elaborados por Borges (2001)

Estudos realizados com valores de:	Modelos de Regressão	
	$Y = a X + b$	$Y = \alpha X$
Deflexões características de cada segmento	$D_{VB} = 1,343 D_{FWD} - 5,814$ $R^2 = 0,84$	$D_{VB} = 1,248 D_{FWD}$ $R^2 = 0,83$
Deflexões de todos os segmentos	$D_{VB} = 1,251 D_{FWD} - 2,412$ $R^2 = 0,75$	$D_{VB} = 1,205 D_{FWD}$ $R^2 = 0,74$
Deflexões médias de cada segmento	$D_{VB} = 1,339 D_{FWD} - 6,243$ $R^2 = 0,80$	$D_{VB} = 1,210 D_{FWD}$ $R^2 = 0,79$
Deflexões - espessura 5,0cm de revestimento	$D_{VB} = 1,180 D_{FWD} - 0,710$ $R^2 = 0,73$	$D_{VB} = 1,193 D_{FWD}$ $R^2 = 0,73$
Deflexões - espessura 10,0cm de revestimento	$D_{VB} = 1,486 D_{FWD} - 11,144$ $R^2 = 0,77$	$D_{VB} = 1,237 D_{FWD}$ $R^2 = 0,74$

Fonte: Adaptado de Borges (2001).

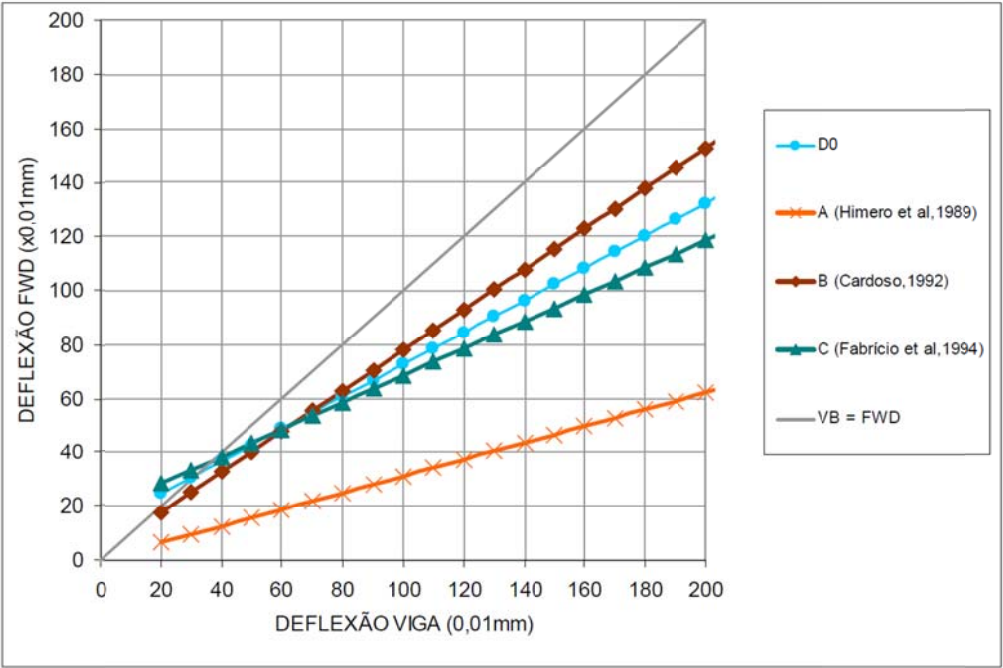
Borges (2001) apresentou vários modelos de regressão identificados na literatura, os quais estão dispostos no Quadro 5. A partir da Figura 16 são visualizadas as diferenças de comportamento entre os principais modelos de regressão para os quais Borges (2001) estabeleceu comparações, sendo a linha identificada por D_0 corresponde à equação de sua autoria.

Quadro 5 - Modelos de regressão entre viga e FWD indicados por Borges (2001)

Autor	Local dos estudos	Tipo de pavimento	Modelo de regressão	R²
Himero <i>et al.</i> (1989)	Japão	-	$D_{FWD} = 0,309 D_{VB} + 0,28$ (FWD: carga de 49 kN)	0,57
Pinto (1991)	BR-040/RJ BR-101/RJ	10 cm - CA 15 a 37 cm - BGS 0 a 51 cm - sub-base argila - subleito	$D_{VB} = -5,73 + 1,396 D_{FWD}$ (FWD: carga de 38,4 kN) (intervalo de deflexões com FWD 48,4 a 147,4 . 10 ⁻² mm)	0,94
Cardoso (1992)	Aeroporto de São José dos Campos	-	$D_{FWD} = 0,7502 D_{VB} + 2,8281$	0,64
Fabício <i>et al.</i> (1994)	BR-101/RS	várias estruturas de pavimentos	$D_{FWD} = 0,5 D_{VB} + 18,5$	0,37
Fabício <i>et al.</i> (1996)	BR-101/RS e outros estudos	várias estruturas de pavimentos	$D_{VB} = 20,645 (D_{FWD} - 19)^{0,351}$ (p/ D_{FWD} caract. < 85.10 ⁻² mm);	0,95
			$D_{VB} = 8,964 (D_{FWD} - 60)^{0,715}$ (p/ D_{FWD} caract. > 85.10 ⁻² mm)	0,93
Rocha Filho (1996)	Pavimentos de rodovias e aeroportos	5 cm - CA 7,5 cm - CA 10 cm - CA 15 cm - CA	$D_{FWD} = 0,91 D_{VB}$ (5 cm de CA) $D_{FWD} = 0,84 D_{VB}$ (7,5 cm de CA) $D_{FWD} = 0,68 D_{VB}$ (10 cm de CA) $D_{FWD} = 0,62 D_{VB}$ (15 cm de CA)	0,94
Sestini <i>et al.</i> (1998)	Rodovias em SP	várias estruturas de pavimentos	$D_{VB} = 0,64 D_{FWD}$	0,87
Pinto e Domingues (2001)	Av. das Américas no RJ (7,5 km)	-	$D_{VB} = 1,2062 D_{FWD} - 5,3016$	0,81

Fonte: Adaptado de Borges (2001).

Figura 16 - Regressões obtidas por vários pesquisadores (tipo Y = a X + b)



Fonte: Borges (2001).

Fleming, Frost e Lambert (2007) apresentam equações desenvolvidas por vários autores na comparação entre módulos obtidos com o FWD e o LWD no centro de aplicação das cargas. Os coeficientes de determinação (R^2) das equações são variáveis, o que pode ser devido ao peso próprio e às diversas taxas de carregamento aplicadas para os dois equipamentos. Em complemento, é provável que as variações sejam justificadas em função do local e estrutura para a qual os testes foram realizados. Dessa maneira, concluíram que o emprego do LWD como ferramenta de controle, necessita de estudos prévios e desenvolvimento de modelos aceitáveis com o FWD, para cada configuração de equipamento a empregar e características divergentes da estrutura em análise.

Preussler (2007) elaborou testes com os equipamentos LWD e FWD (modelo Dynatest) durante as obras de pavimentação do trevo da Rodovia SP-330 (Anhanguera), no km 62. Os testes foram realizados na camada de base em brita graduada simples (BGS, espessura de 15 cm), nas camadas de sub-base dos tipos BGTC (18 cm) e rachão (25 cm) e em material selecionado do subleito. As deflexões máximas no centro da aplicação de carga (D_0) apresentaram as relações indicadas no Quadro 6 com os equipamentos FWD e LWD.

Quadro 6 - Regressões entre FWD e LWD obtidas por Preussler (2007)

Ramo	Material	Deflexão	Ramo	Material	Deflexão
800	Subleito	$D_{FWD} = 3,59 D_{LWD}$	1000 B	Subleito+BGTC	$D_{FWD} = 6,74 D_{LWD}$
200 A	Subleito+BGS	$D_{FWD} = 3,41 D_{LWD}$	200 B	Subleito+BGTC+BGS	$D_{FWD} = 3,04 D_{LWD}$
1000 A	Subleito+Rachão	$D_{FWD} = 3,48 D_{LWD}$	-	-	-

Fonte: Adaptado de Preussler (2007).

Horak *et al.* (2008) elaboraram correlações entre os equipamentos LWD e FWD para camada de areia tratada com emulsão na espessura de 7,5 a 10 cm. Os testes foram realizados em um campo experimental de Moçambique, África do Sul. O LWD empregado permitiu, além da medição da deflexão máxima D_0 , a determinação de leituras situadas a 30 e 60 cm do ponto de aplicação da carga. Os resultados obtidos estão indicados nas Equações 12, 13 e 14.

$$D_0: D_{FWD} = 0,3617 (D_{LWD})^{0,9831}, \text{ com } R^2 = 0,62 \quad (12)$$

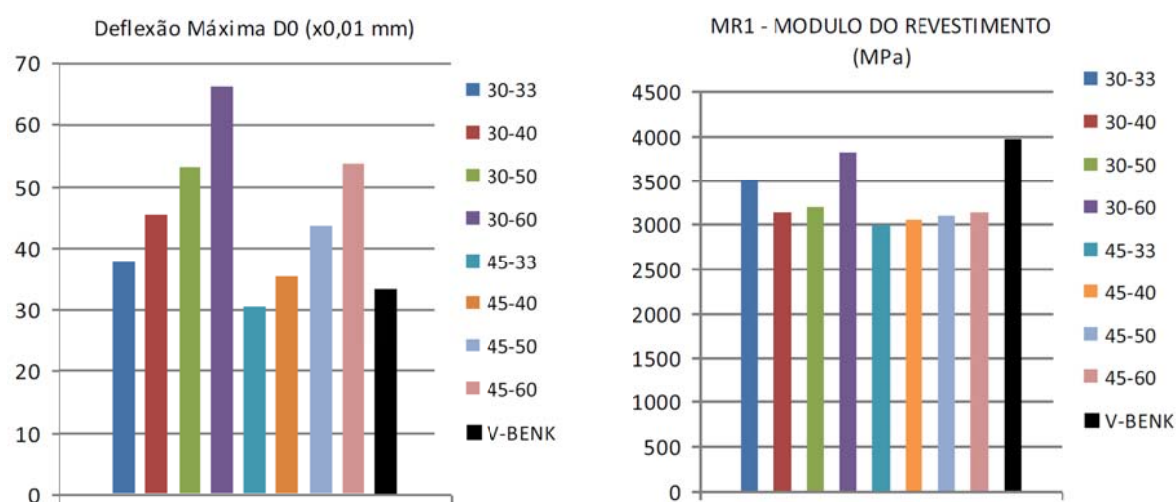
$$D_{30}: D_{FWD} = 0,1586 (D_{LWD})^{0,9281}, \text{ com } R^2 = 0,82 \quad (13)$$

$$D_{60}: D_{FWD} = 0,2353 (D_{LWD})^{0,7421}, \text{ com } R^2 = 0,67 \quad (14)$$

Possíveis correlações entre medidas de deflexões com o emprego da viga Benkelman e do FWD modelo Dynatest foram avaliadas por Gomes (2012). O estudo foi realizado em um

segmento de 1,2 km (61 estações) na cidade de Ouro Branco/MG, composto por revestimento asfáltico na espessura de 3 e 4 cm, base e sub-base em canga de minério de ferro, sendo a espessura de 15 cm para ambas as camadas. Na obtenção das medidas de deflexão, foram realizadas oito configurações diferentes do equipamento FWD, resultado de combinações entre diferentes níveis de carregamento (33, 40, 50 e 60 kN) e diferentes áreas de aplicação de carga (placa com diâmetro de 0,30 e 0,45 m). Nenhuma das configurações de FWD reproduziu todos os resultados obtidos com a viga Benkelman, dadas as particularidades dos métodos de ensaio. Conforme Figura 17, para a obtenção de deflexões máximas semelhantes às da viga Benkelman, o FWD necessita ser configurado com a placa de 0,45 m de diâmetro e carga de 40 kN. Ao contrário, para a obtenção de módulos retroanalizados do revestimento (utilizou-se o programa Retran5-L) com maior proximidade à viga Benkelman, as configurações mais adequadas foram com placa de 0,30 m, propiciando a maior concentração de tensões. Concluiu-se “[...] que não existe uma correlação universal entre os dois equipamentos e que as melhores correlações possíveis devem ser feitas considerando-se os fatores que melhor caracterizam a individualidade de cada rodovia em estudo.” (GOMES, 2012, p. 6).

Figura 17 - Gráficos comparativos entre deflexões e módulos obtidos com a viga Benkelman e o FWD em oito configurações, segundo a pesquisa de Gomes (2012)



Fonte: Gomes (2012).

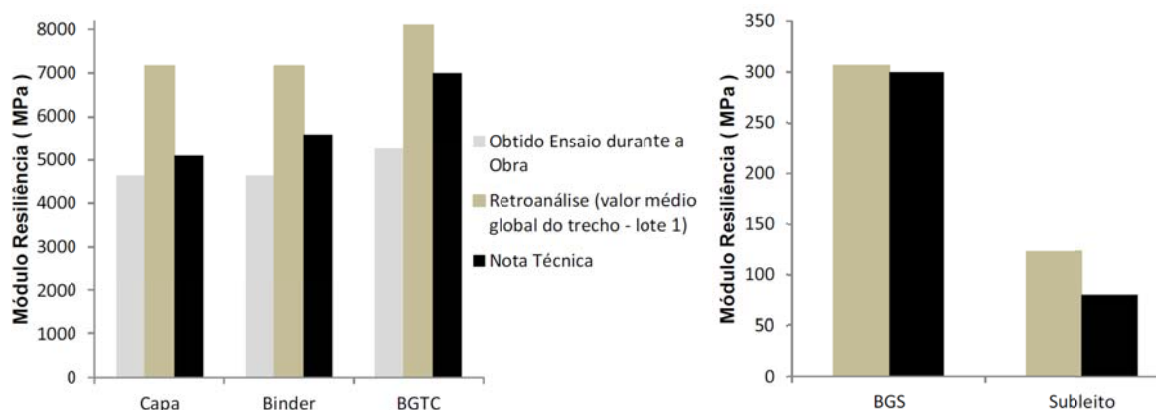
Machado (2012) realizou ensaios com o LWD e o FWD para quatro estruturas de pavimentos flexíveis, uma em material granular e outras três em estruturas betuminosas, com diferentes espessuras de camadas. Da comparação entre os valores obtidos com os dois

equipamentos concluiu-se que poderá ser utilizado o primeiro, em substituição ao FWD, no caso em que o acesso do mesmo 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.

A análise de bacias deflectométricas obtidas mediante o emprego de 4 (quatro) equipamentos do tipo FWD 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. Foram empregados 3 (três) equipamentos da marca Kuab e do mesmo modelo e 1 (um) equipamento da marca Dynatest. Entre as principais conclusões destacam-se: as divergências entre bacias de deflexão de um FWD para outro; a necessidade da periódica calibração dos FWDs e comparação entre os diferentes equipamentos; a verificação de que um sensor descalibrado afeta significativamente a bacia de deflexão registrada; e os valores de temperatura registrados pelos equipamentos também foram divergentes.

Salviano (2015) avaliou leituras de deflexão realizadas durante a execução e sobre a camada final do pavimento semirrígido executado no trecho “C” do Arco Metropolitano do Rio de Janeiro, com extensão total de 70,9 km. Foram efetuadas leituras com viga Benkelman (D_0) em todas as camadas do pavimento para fins de controle executivo e liberação para a realização da próxima camada. Em complemento, foi realizada avaliação com o FWD sobre a camada final do pavimento e a determinação das bacias de deflexão. O controle efetuado com viga Benkelman na execução das camadas do pavimento mostrou-se satisfatório, no entanto o autor recomenda que as normas de controle de cada camada sejam aperfeiçoadas, definindo a amostragem mínima, critérios para limites pontuais, ações corretivas, entre outros. Os dados do FWD permitiram a avaliação dos módulos elásticos de cada camada do pavimento através da retroanálise com o *software* BAKFAA. Concluiu-se que os resultados da retroanálise foram, em geral, superiores aos valores utilizados no dimensionamento da estrutura (nota técnica) e valores obtidos em ensaios de laboratório, conforme exemplo da Figura 18. Por fim, foi possível determinar a vida útil do pavimento executado com base no emprego dos critérios de dimensionamento do projeto e o *software* ELSYM5.

Figura 18 - Comparativo elaborado por Salviano (2015) entre valores de módulo determinados em ensaios, retroanalísados com as bacias do FWD e valores utilizados na verificação da estrutura em nota técnica

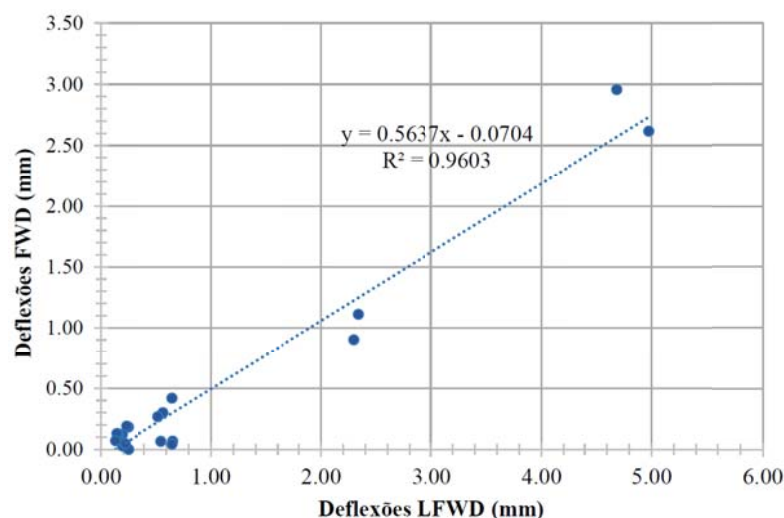


Fonte: Salviano (2015).

A comparação entre as medições com os equipamentos FWD e LWD foi realizada por Grasmick *et al.* (2015) para três distintas seções. Os estudos compreenderam medições realizadas no centro da aplicação da carga, em distância radial de 30 cm e distância de 60 cm em relação ao sensor principal. Os resultados demonstraram que, enquanto as medições de deflexão central exibiram uma relação específica para cada local de realização dos testes, as medidas de deflexão radial em 30 e 60 cm revelaram uma relação consistente entre as medições de ambos os equipamentos e que vale para todos os locais de teste.

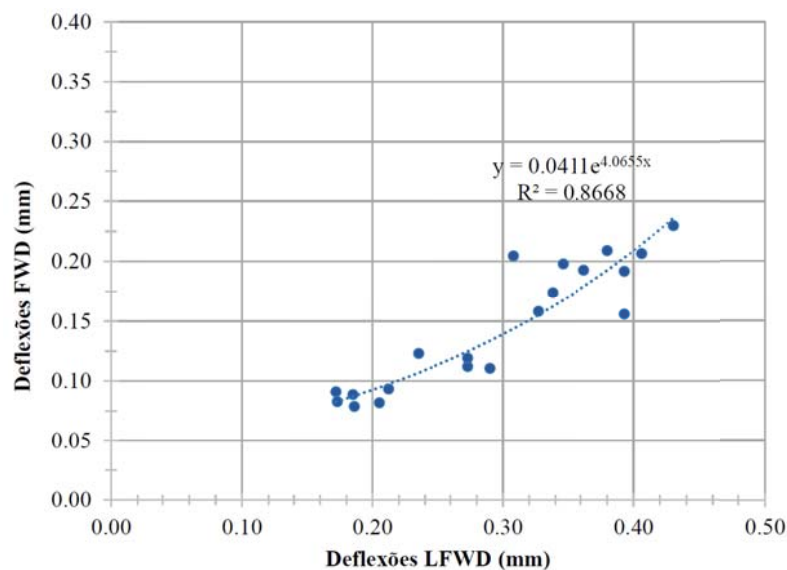
Magalhães (2015) realizou ensaios com o LFWD (ou LWD) e com o FWD sobre vários tipos de solo/pavimento e houve variabilidade nos resultados obtidos. Dessa forma, foi desenvolvida uma segunda fase de ensaios deflectométricos sobre uma mesma estrutura granular (estrada não pavimentada) e a curva de ajuste que melhor se adaptou aos dados obtidos segundo o LWD e o FWD foi exponencial, resultando em um coeficiente $R^2 = 0,8668$. Em complemento, foram determinados os módulos de deformabilidade para cada ponto da segunda etapa e obteve-se uma curva de tendência exponencial com $R^2 = 0,821$ na comparação entre os resultados dos dois equipamentos. As Figuras 19 e 20 ilustram as equações que relacionam deflexões com o LWD e o FWD na primeira e segunda fase da pesquisa mencionada.

Figura 19 - Deflexões com FWD e LWD em D₀ - 1ª fase da pesquisa de Magalhães (2015)



Fonte: Magalhães (2015).

Figura 20 - Deflexões com FWD e LWD em D₀ - 2ª fase da pesquisa de Magalhães (2015)



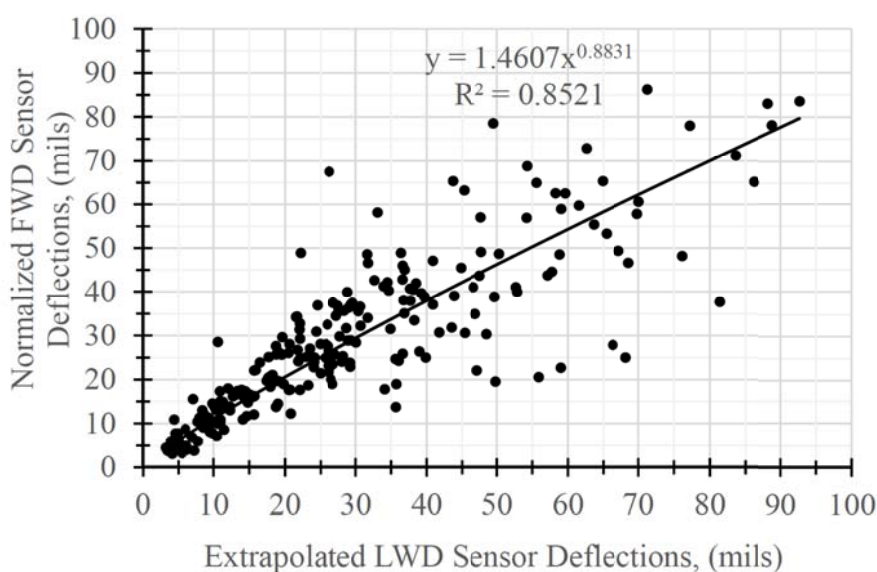
Fonte: Magalhães (2015).

Burhani (2016) estudou o emprego do FWD e LWD em estradas de baixo volume de tráfego no estado de Ohio. Os testes foram realizados em pavimentos com revestimento asfáltico (espessura de 7,5 a 12,7 cm) assente sobre base tratada com cimento. Foram coletados dados de deflexão em 99 seções de teste, localizados em oito municípios do estado de Ohio. Os dados de deflexão obtidos com o FWD e o LWD foram utilizados para estimar os módulos de camada e o número estrutural efetivo. O LWD empregado é do modelo Prima 100, com dois sensores radiais distantes a 30 e 60 cm do centro de aplicação da carga, peso de 10 kg e placa com 30cm de diâmetro. O FWD é modelo Dynatest 8000, placa com diâmetro

de 30 cm e foram empregados três diferentes carregamentos (26,7 kN, 40 kN e 53,4 kN). Para as comparações realizadas entre os dois equipamentos, primeiramente todos os dados de deflexão foram normalizados para o carregamento de 40 kN, empregando-se o procedimento de extrapolação linear.

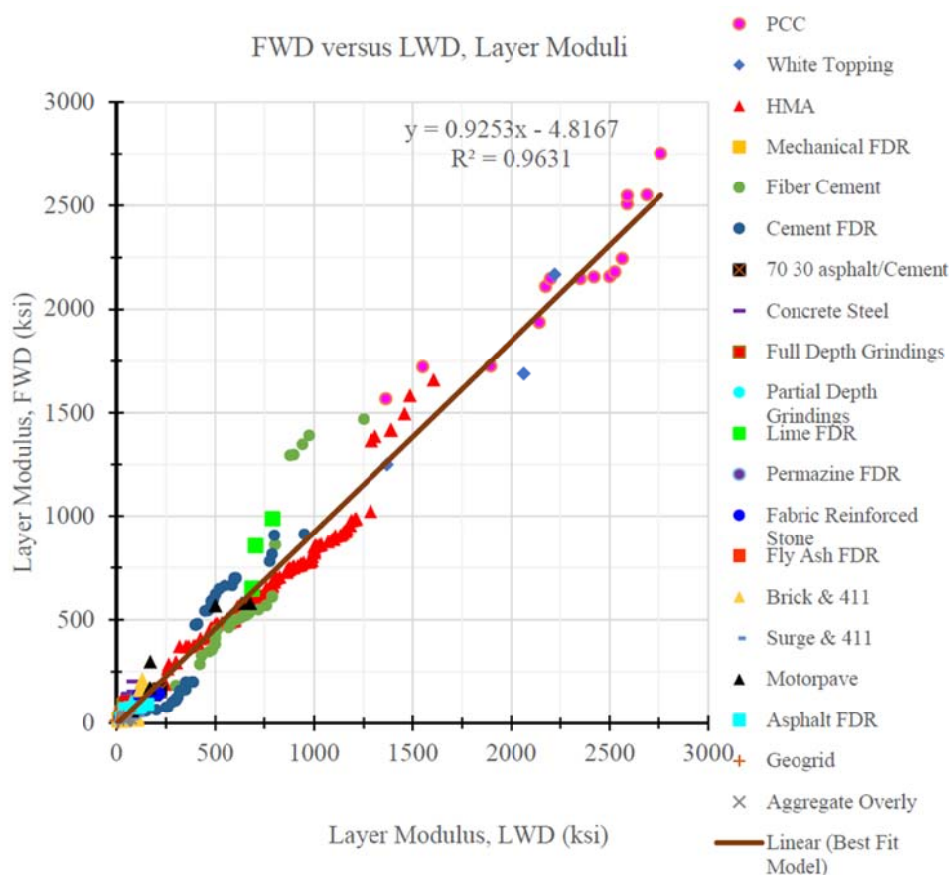
Como resultados, Burhani (2016) obteve modelos de regressão entre valores obtidos com o LWD e o FWD, conforme gráfico da Figura 21, o qual relaciona as deflexões medidas no ponto de aplicação da carga D_0 . Como o estudo contemplou em sua maioria pavimentos semirrígidos e com menor profundidade, houve uma tendência para fortes correlações entre as variáveis em estudo. Em complemento, as medições foram realizadas para um amplo intervalo de deflexões, fator que contribuiu para o ajuste da linha de tendência. Na Figura 22 é apresentada a comparação entre os módulos retroanalizados para os dois equipamentos e também foi verificada uma forte relação entre as variáveis.

Figura 21 - Regressão entre deflexões com FWD e LWD em D_0 segundo Burhani (2016)



Fonte: Burhani (2016).

Figura 22 - Regressão entre módulos calculados através de deflexões com FWD e LWD segundo Burhani (2016)



Fonte: Burhani (2016).

Bueno (2016) realizou levantamentos de deflexão com o emprego de FWD e viga Benkelman em três trechos situados em Santa Maria/RS. A Avenida Hélivio Basso compõe o primeiro trecho e é constituída por 5 cm de revestimento asfáltico, 20 cm em base de brita graduada, 40 cm de sub-base em macadame seco e subleito argiloso. O segundo trecho situa-se na BR-158 e apresenta 7,5 cm de revestimento, 15 cm de base em brita graduada, 15 cm de sub-base em macadame seco, 40 cm de reforço em pedra detonada e subleito em solo argiloso. O terceiro trecho está localizado na Avenida Roraima e foi restaurado com camada asfáltica de 5 cm sobre o revestimento de 5 cm preexistente, 17 cm de brita graduada e subleito argiloso. Para cada trecho foram realizados levantamentos semestrais das deflexões, totalizando quatro campanhas de ensaios com cada equipamento de avaliação. Os levantamentos com FWD e viga Benkelman foram realizados sequencialmente, para as mesmas condições de temperatura e umidade do pavimento. De forma geral, as deflexões determinadas com a viga Benkelman foram maiores do que aquelas medidas com o equipamento FWD. O autor elaborou a Equação 15 para relacionar as deflexões aferidas com

a viga Benkelman e o FWD, a partir dos dados coletados nos três trechos monitorados em Santa Maria (RS):

$$D_{VB} = 1,355 D_{FWD}, \text{ com } R^2 = 0,50 \quad (15)$$

Bueno (2016) empregou três diferentes *softwares* (BAKFAA, BackSisPav e MnLayer) para a retroanálise dos módulos de elasticidade equivalentes, obtendo-se valores consideravelmente parecidos para as camadas que compõem as estruturas do primeiro e segundo trecho. Concluiu-se também que os valores de módulo, quando calculados a partir de estruturas com camadas totalmente aderidas, foram significativamente menores, principalmente para as camadas granulares, do que aqueles obtidos na consideração de interfaces não aderidas no sistema de camadas.

Rodrigues (2017) estudou 20 trechos de ruas não pavimentadas distribuídas na área urbana de Campina Grande, e para cada trecho realizou um ponto de inspeção, em uma área de 1,0 m por 1,0 m. Nesta área foram coletadas amostras de solo para ensaios de laboratório e foram realizados os seguintes ensaios *in situ*: três medidas de módulo de deformabilidade com LWD, três ensaios de CBR, um ensaio de peso específico e um ensaio de umidade. Ao correlacionar os módulos de deformabilidade com os resultados de CBR *in situ*, foi observada uma tendência de comportamento linear entre os fatores. A análise de regressão entre os dois parâmetros para todos os solos ensaiados resultou em um coeficiente $R^2 = 0,4106$. Os solos avaliados eram predominantemente granulares, logo foram realizadas análises complementares considerando apenas os solos do tipo A-2-4 e tipo SM, resultando em R^2 de 0,4085 e 0,4489, respectivamente. Por fim, como os parâmetros apresentaram-se diretamente proporcionais, ou seja, para solos com altos valores de módulo de deformabilidade, também foram encontrados maiores valores para o CBR *in situ*, foi realizada nova análise de regressão excluindo-se 5 solos que apresentaram comportamento distinto, obtendo-se $R^2 = 0,7918$.

O subleito argiloso de uma seção teste experimental foi avaliado por Marecos *et al.* (2017) com o objetivo de detectar deficiências em sua estrutura. Para tanto, foram realizadas medições através de dois sistemas GPR e testes de deflexão com emprego do FWD e LWD. Combinando os métodos não destrutivos foi verificada correlação entre as variações das deflexões e as mudanças das reflexões do GPR quando da identificação de defeitos na superfície tais como o trincamento. Concluiu-se que o LWD é mais apropriado na avaliação da camada superficial e na detecção de heterogeneidades locais, enquanto o FWD fornece informações mais aprofundadas da estrutura do subleito.

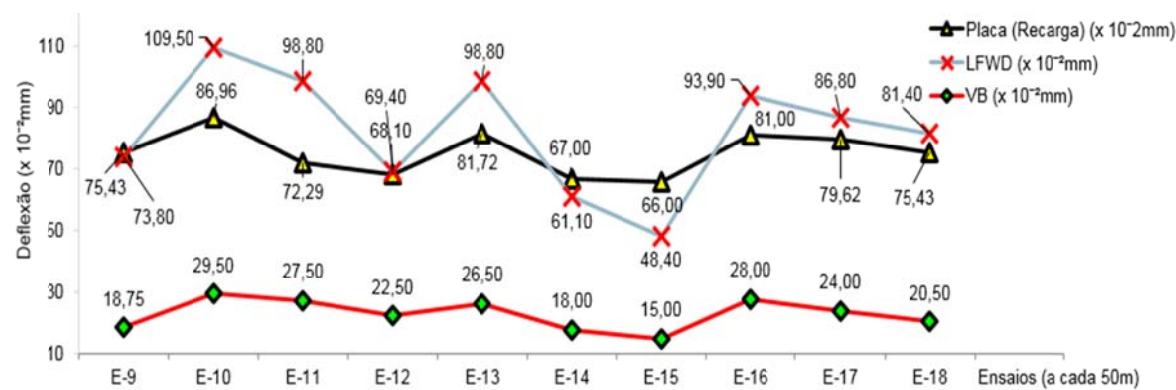
Segundo He *et al.* (2017), o equipamento FWD vem sendo empregado na medição de deflexões na maioria dos países, entretanto o equipamento necessita parar sobre a pista para a

execução das leituras. Através do desenvolvimento de avançados sensores a *laser*, ao medir as velocidades de deflexão de várias posições na bacia de deflexão, o valor de deflexão pode ser calculado na velocidade de deslocamento do tráfego. Os equipamentos denominados TSD (*traffic-speed deflectometer*) o LDD (*laser dynamic deflectometer*) são considerados os mais avançados entre todos os dispositivos para a medição não destrutiva contínua das condições estruturais do pavimento rodoviário. Os autores apresentaram dois métodos para a medição da velocidade de deflexão do pavimento sob cargas dinâmicas e, ao comparar os valores de deflexão medidos através do LDD, viga Benkelman e FWD, a eficácia da velocidade de deflexão do pavimento medida pelo LDD pode ser validada indiretamente.

Rodrigues (2018) realizou estudo comparativo entre medidas de deflexão realizadas com viga Benkelman, ensaio de carga com placa e com o LWD modelo HMP-LFG4, em quatro trechos de pavimentos asfálticos urbanos, no município de Joinville. Segundo o autor, verificou-se que a deflexão obtida com o LWD proporciona valor superior quando comparado à deflexão medida com a Viga Benkelman. Os resultados indicaram que não houve boas relações lineares em estruturas compostas por camadas de revestimento asfáltico mais espessas, como também em estruturas com revestimento asfáltico sobre paralelepípedos. Houve boa relação linear em estruturas compostas por revestimento asfáltico delgado. A Figura 23 indica o comportamento das deflexões para o trecho 2, sendo o pavimento constituído por revestimento asfáltico (5 cm), base em brita graduada (15 cm) e sub-base em macadame seco (30 cm de espessura), em que se verifica maior variabilidade nas leituras de deflexão para o equipamento LWD.

No Quadro 7 estão dispostos os modelos de regressão entre viga Benkelman e LWD considerados válidos por Rodrigues (2018) através dos dados de sua pesquisa. São indicadas as características do pavimento e o intervalo de deflexões obtido com a viga Benkelman para cada segmento avaliado. Os pavimentos são compostos por revestimento asfáltico, base em brita graduada, sub-base em macadame seco (exceto o quarto segmento, composto por saibro bruto). O único segmento reforçado foi o S1a, sendo uma camada de pedra pulmão de 30 cm assente sobre camada drenante em areia.

Figura 23 - Comparação elaborado por Rodrigues (2018) entre deflexões com viga, ensaio de placa e LWD - trecho 2



Fonte: Rodrigues (2018).

Quadro 7 - Regressões válidas entre viga Benkelman e LWD obtidas por Rodrigues (2018)

Local	Pavimento				Intervalo de deflexões (VB)	Modelo	r
	Revest.	Base	Sub-base	Reforço			
Seg. 1a Av. Stos Dumont	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	10,5 a 24.10 ⁻² mm	$D_{VB} = 0,5757 D_{LWD} + 7,0855$	0,73
Seg. 2 Rua Otto Boehm	5 cm	15 cm	30 cm	-	15 a 29,5.10 ⁻² mm	$D_{VB} = 0,2421 D_{LWD} + 3,1279$	0,95
Seg. 4 Rua São Borja	5 cm	15 cm	38 cm	-	25,5 a 54.10 ⁻² mm	$D_{VB} = 1,1745 D_{LWD} + 4,4213$	0,92

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2018).

2.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Franco (2007) e Fritzen (2016) enfatizam a necessidade de dimensionar estruturas de pavimento assegurando que a ação repetitiva do tráfego não cause o trincamento excessivo da camada de revestimento por fadiga dentro do período de projeto previsto e também garantindo que as espessuras das camadas de sua estrutura, bem como suas características, sejam capazes de suportar os efeitos da deformação permanente (afundamento da trilha de roda) causados pela passagem dos veículos, principalmente pelo excesso de carga.

“O reforço por meio de camada asfáltica adicional ou recapeamento é o procedimento mais utilizado na reabilitação de pavimentos. Este tipo de intervenção pode ser aplicado tanto para corrigir defeitos estruturais como funcionais.” (PINTO; PREUSSLER, 2010, p. 149).

Os métodos empíricos para o dimensionamento do pavimento se baseiam em regras desenvolvidas a partir de observações e experiências com certos tipos de pavimentos, para determinados materiais de pavimentação e condições climáticas específicas, que não são necessariamente as da região do projeto a desenvolver (SANTOS, 2003; FRANCO, 2007; MACHADO, 2019).

Medina e Motta (2015, p. 335) mencionam que os pavimentos asfálticos implantados no Brasil têm sido dimensionados empiricamente pelo Método do DNER, “com base no ensaio CBR, curvas de dimensionamento do Corpo de Engenheiros Militares dos EUA (USACE) e dados obtidos da pista experimental do AASHO, do fim da década de 1950, adaptados pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza.”

Segundo 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 mecanísticos com certa dose de empirismo. O método é dito mecanístico quando utiliza a teoria 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.

Os métodos empíricos DNER-PRO 011/79 e PRO 269/94 são os mais empregados para o projeto de reforço dos pavimentos, ambos baseados no valor da deflexão característica do segmento como elemento principal para a definição da espessura de reforço (FRANCO *et al.*, 2019). De modo diverso, o novo método de dimensionamento mecanístico-empírico MeDiNa, proposto pelo DNIT, realiza o dimensionamento do reforço do pavimento com base na deformabilidade dos materiais, curva de fadiga do material de reforço e na previsão de trincamento (SOUZA JÚNIOR, 2018).

2.4 MÉTODO MEDINA DE DIMENSIONAMENTO

O MeDiNa é definido como Método de Dimensionamento Nacional, recebendo esta denominação em homenagem ao Professor Jacques de Medina em função de sua notável contribuição para a pavimentação brasileira.

De acordo com Lopes (2019, p. 71), o método MeDiNa “(...) é o resultado de mais de 20 anos de pesquisas acadêmicas da COPPE e de outras instituições de ensino e órgãos brasileiros, atualmente, em fase de teste público, para se tornar o novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos do Brasil.”

Este método de dimensionamento é mecanístico-empírico, ou seja, objetiva o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos da estrutura a partir da atuação do tráfego e das características dos materiais empregados, utilizando como base os resultados de ensaios de laboratório (KNABBEN; CARPIO, 2020).

Segundo Chiarello *et al.* (2019) e Knabben e Carpio (2020), o *software* MeDiNa busca calcular os esforços na estrutura e verificar se o número de aplicações de carga levará ao trincamento excessivo do revestimento asfáltico ou das camadas cimentadas, ou ocasionará o afundamento na trilha de roda em magnitude superior ao limite estabelecido. Por fim, o *software* verifica as espessuras das camadas e analisa se estas satisfazem as condições impostas no dimensionamento.

Franco e Motta (2018) acrescentam que a verificação e o dimensionamento mecanístico-empírico são realizados por meio da rotina AEMC de Análise Elástica de Múltiplas Camadas. Esta rotina foi desenvolvida na tese de doutorado de Franco (2007).

Franco e Motta (2018) detalham as hipóteses fundamentais da solução computacional do Método MeDiNa:

- os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos (a modelagem elástica não linear é feita por iterações elásticas lineares);
- a lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- as camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- a superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- a carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;

- a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

O *software* MeDiNa está disponibilizado no *website* do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), em sua versão 1.1.4.0 (junho de 2020). O MeDiNa pode ser empregado no dimensionamento de novos pavimentos (nível A) e dimensionamento de reforço de pavimentos. O *software* compreende 2 módulos adicionais, sendo:

- BackMeDiNa - versão 1.2.0 (junho de 2020): empregado para a retroanálise e determinação dos módulos de elasticidade equivalentes das camadas do pavimento;
- AEMC - versão 2.4.2 (junho de 2020): módulo destinado à análise elástica de múltiplas camadas.

2.4.1 Função de Transferência

Fritzen (2016) 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.

Na tese de doutorado elaborada por Fritzen (2016) foi desenvolvida e validada a Função de Transferência para a previsão de desempenho de misturas asfálticas frente aos danos de fadiga. A pesquisa compreendeu a avaliação de 6 misturas asfálticas distribuídas em 45 trechos de pavimentos construídos em diferentes condições estruturais e níveis de tráfego, situados na Cidade Universitária do Rio de Janeiro, também conhecida como Ilha do Fundão. O desenvolvimento da função para a previsão do dano por fadiga foi baseada em ensaios de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de cargas repetidas das misturas asfálticas e contou com a análise dos trechos experimentais citados e monitoramento anual desde 2006, verificando-se a porcentagem de área trincada ao longo do tempo.

A Função de Transferência foi validada na tese de Fritzen (2016) através de 13 segmentos experimentais construídos e monitorados por universidades pertencentes à Rede Temática de Asfaltos em diferentes regiões do país. Na região sul, as verificações foram realizadas em um trecho experimental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) situado na Avenida Hélyvio Basso e também em segmento experimental monitorado pela

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) na BR-290/RS. As previsões de área trincada calculadas através da Função de Transferência foram muito próximas das áreas trincadas observadas nos segmentos.

Segundo Franco e Motta (2018), 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 sigmoideal 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 ($D_{\text{médio}}$), através da Equação 16, obtendo-se um coeficiente R^2 de 0,8743:

$$fs = 1.993,7 \cdot (D_{\text{médio}})^{0,3737} \quad (16)$$

Onde:

fs = fator de deslocamento;

$D_{\text{médio}}$ = dano médio por fadiga em 20 pontos da área trincada prevista.

Ainda, a comparação entre a área trincada observada e a área trincada prevista, permitiu calcular o erro da função de transferência, conforme Equação 17, sendo $R^2 = 0,9761$:
 Erro padrão = $0,138 \cdot (\text{área trincada prevista})^{0,3263}$ (17)

2.4.2 Dimensionamento para a Implantação de Pavimento com o Módulo MeDiNa

O dimensionamento de um “Pavimento Novo” conforme designação no *software* MeDiNa refere-se ao dimensionamento para a implantação da pavimentação, ou seja, a construção de um pavimento asfáltico. Na tela inicial do módulo MeDiNa, canto superior direito, é possível definir o “Modo” de projeto entre duas opções: “Pavimento Novo (Nível A)” ou “Projeto de Reforço”.

A proposta nacional de dimensionamento mecanístico-empírico para pavimentos novos vem sendo desenvolvida em dois níveis, denominados “A” e “B”, entretanto apenas o “Nível A” está disponível na versão 1.1.4.0 do *software* MeDiNa. De acordo com Fritzen (2016), a diferenciação entre os níveis está na forma de caracterizar as misturas asfálticas:

- nível A: considera o revestimento asfáltico elástico, caracterizado pelos ensaios de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de carga repetida;
- nível B: considerará o comportamento viscoelástico da mistura asfáltica, a velocidade dos veículos e as variações de temperatura da camada; o revestimento asfáltico será caracterizado pelos ensaios mecânicos de módulo dinâmico e fadiga por tração direta com tensão controlada.

O dimensionamento do novo pavimento é iniciado com a definição das características dos materiais e espessuras que vão compor a estrutura, inserindo as informações no programa. Franco e Motta (2018) informam que são permitidas no mínimo três e no máximo oito camadas para o pavimento, contando com o subleito. Segundo os autores, para as camadas de subleito, reforço do subleito, sub-base e base, devem ser realizados os ensaios laboratoriais para obtenção de módulo de resiliência e deformação permanente. No entanto, caso no projeto esteja prevista a produção de materiais em usinas ou centrais, o programa pré-estabelece parâmetros mínimos que devem ser exigidos quando da execução da obra, citando-se como exemplo as misturas asfálticas e os materiais estabilizados com cimento.

Segundo Franco e Motta (2020, p. 62), “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.” O *software* MeDiNa permite a seguinte relação, conforme Equação 18:

$$N_{fad} = k_1 \cdot \epsilon_t^{k_2} \quad (18)$$

Onde:

N_{fad} = número de ciclos;

ϵ_t = 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, nomeadas como 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 5764 MPa na Classe 1 até 10492 MPa na Classe 4. As características das misturas asfálticas teóricas estão indicadas no Quadro 8.

Quadro 8 - Características das misturas asfálticas teóricas classe 1 a classe 4

Classe	Módulo de Resiliência (MPa)	Parâmetro k1	Parâmetro k2	Tráfego
1	5764	$5,496.10^{-11}$	-3,253	$4,5.10^6$ a $6,0.10^6$
2	6743	$1,11.10^{-13}$	-3,979	$6,0.10^6$ a $7,5.10^6$
3	8000	1.10^{-12}	-3,75	$7,5.10^6$ a $1,0.10^7$
4	10492	$1,91.10^{-5}$	-1,9	superior a $1,0.10^7$

Fonte: Adaptado de Franco e Motta (2020) e com base no *software* MeDiNa (2020).

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):

- camada asfáltica sobre outra camada asfáltica;
- camada asfáltica sobre camada antirreflexão de trincas;
- tratamento superficial sobre camadas asfálticas.

2.4.3 Parâmetros do Tráfego

O Número Equivalente “N” é definido como o número de repetições equivalentes do eixo padrão de 8,2 tf (80 kN) durante o período de projeto (DNIT, 2006a, 2006b; PINTO; PREUSSLER, 2010). De acordo com Balbo (2007) o conceito de equivalência entre cargas surge da simples observação de que, para uma mesma estrutura de pavimento, são desiguais os efeitos destrutivos ocasionados por veículos distintos, sendo necessário empregar um critério comparativo. Segundo DNIT (2006b, p. 113), os fatores de equivalência de cargas (FC) “(...) permitem converter uma aplicação de um eixo solicitado por uma determinada carga em um número de aplicações do eixo padrão que deverá produzir um efeito equivalente.” Os trechos experimentais da AASHTO e do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) forneceram subsídios para o desenvolvimento das expressões para o cálculo do fator de carga.

O número N é calculado a partir da Equação 19 (DNIT, 2006b):

$$N = 365 \cdot \text{VMD} \cdot \text{FV} \quad (19)$$

Onde:

N = número de repetições da carga do eixo padrão de 8,2 tf por ano considerado equivalente aos eixos dos veículos comerciais da frota circulante;

VMD = volume médio diário dos veículos comerciais por ano em um só sentido;

FV = fator de veículo.

Consta nos Manuais do DNIT (2006b, 2006c) que o cálculo do VMD é realizado ano a ano com base na composição percentual média da frota circulante no segmento. Pinto e Preussler (2010) indicam o cálculo do fator de veículo (FV) através da Equação 20:

$$FV = FE \cdot FC \quad (20)$$

Onde:

FE = fator de eixos, que é a média ponderada das quantidades percentuais dos diversos tipos de eixos que atuam no pavimento;

FC = fator de equivalência de carga para o eixo padrão de 8,2 tf.

O *software* MeDiNa permite a definição dos parâmetros de tráfego através de sua tela inicial, canto inferior direito. O *software* realiza o cálculo do número N ou permite a entrada com o valor pré-calculado pelo projetista. No primeiro caso devem ser inseridos os seguintes dados: VMD em ambos os sentidos da pista, porcentagem de veículos na faixa de projeto, taxa de crescimento do tráfego e período de projeto (KNABBEN; CARPIO, 2020).

Para o cálculo do fator de veículo (FV), o *software* dispõe de uma tela adicional, com a listagem de eixos que podem ser selecionados pelo projetista e inseridos na planilha de cálculo deste parâmetro. Além da seleção das configurações de eixo, devem ser informados os fatores de eixo (FE) correspondentes. Na medida em que os dados são lançados, o programa atualiza os fatores de carga (FC) conforme a metodologia USACE e calcula os fatores de veículo (FVi) individuais e o fator de veículo (FV) total (MACHADO, 2019).

Segundo 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, conforme pode ser verificado no Quadro 9, não influenciando no cálculo de valor do número N. Franco e Motta (2018) destacam que os parâmetros do tráfego são de extrema importância para o correto funcionamento do *software* MeDiNa, visto que os modelos utilizados se mostram sensíveis a pequenas variações do número de repetições do eixo padrão de 8,2 tf, o número N.

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

Tipo de via	Confiabilidade	Área Trincada	Def. 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: Franco e Motta (2018).

2.4.4 Retroanálise com o BackMeDiNa

A retroanálise é uma rotina que antecede o projeto de reforço do pavimento. Conforme Franco *et al.* (2019), o uso de deflexões aferidas com o FWD, mais eficiente do que a viga Benkelman, abriu a possibilidade de um melhor diagnóstico da condição estrutural do pavimento e, por consequência, um projeto de reforço mais adequado. A retroanálise com o BackMeDiNa permite avaliar todas as bacias deflectométricas levantadas em um mesmo segmento homogêneo de uma rodovia e, a partir desta análise, realizar o diagnóstico da estrutura e o projeto de reforço quando necessário.

Segundo Camarini, Silva Junior e Fontenele (2019) o programa BackMeDiNa pode vir a retroanalisar pavimentos com até 5 camadas, além do subleito, a partir de dados de bacias de deflexão obtidas com o FWD com até 9 pontos de medidas por seção.

Para efetuar a retroanálise no BackMeDiNa é necessário introduzir as medidas das bacias de deflexão, espessura das camadas, valores de Poisson e estimativas iniciais dos módulos para cada camada (CAMARINI; SILVA JUNIOR; FONTENELE, 2019). Em complemento, é necessário informar o tipo de material para cada camada do pavimento, as distâncias entre os sensores do FWD, as condições de aderência, o carregamento aplicado, a temperatura do ar e a temperatura na superfície da pista.

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 (FRANCO; MOTTA, 2018).

2.4.5 Projeto de Reforço

O projeto de reforço de um pavimento é elaborado quanto este não mais está atendendo os objetivos para os quais foi construído. O *software* MeDiNa contém uma ferramenta própria para este tipo de análise, ainda pouco utilizada (FRANCO *et al.*, 2019).

Na tela inicial do módulo MeDiNa, canto superior direito, é possível definir o “Modo” para “Projeto de Reforço”. Na sequência, através da aba “Projeto” e a opção “Reforço”, é possível criar um projeto de reforço de duas maneiras: através da inserção de dados iniciais pelo próprio projetista, na opção “dados novos”; ou a partir da opção “importar retroanálise”,

selecionando um arquivo de bacias deflectométricas pré-calculadas pelo BackMeDiNa (FRANCO; MOTTA, 2018; FRANCO *et al.*, 2019).

Deverão ser inseridas as informações da estrutura do pavimento, como o número de camadas, espessuras, materiais, módulos retroanalizados e coeficientes de Poisson. Para a camada asfáltica existente deverá ser informado o percentual de área trincada, índice de irregularidade longitudinal, espessura de fresagem e idade do pavimento (MACHADO, 2019).

2.4.6 AEMC

Durante a pesquisa de Franco (2007), um programa específico para o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, com rotinas para entrada de dados e apresentação de resultados, denominado AEMC (Programa de análise elástica de múltiplas camadas), foi elaborado, sendo este um dos módulos que compõe o método MeDiNa (LOPES, 2019).

O que diferencia este *software* é que os valores de módulo são utilizados no início do processo e, como resultado, são obtidas as bacias de deflexão teóricas. Assim, o AEMC pode ser utilizado para a verificação dos módulos retroanalizados (VIEIRA, 2020).

2.4.7 Estudos Realizados com o Método MeDiNa

Na pesquisa realizada por Camarini, Silva Junior e Fontenele (2019), foram empregados dados de bacias deflectométricas medidas com o FWD no pavimento da BR-153, no estado do Paraná, para dois subtrechos homogêneos, em estado de eminente necessidade de restauração. No subtrecho A foram obtidas 20 bacias de deflexão, espaçadas a cada 40 metros, em pavimento composto por revestimento em concreto asfáltico (9 cm), base em brita graduada (14 cm) e sub-base em solo estabilizado granulometricamente (30 cm), sendo um solo selecionado, sem correção granulométrica e estabilizado por compactação. No subtrecho B foram medidas 10 bacias de deflexão, segundo o mesmo espaçamento e sobre pavimento composto pelos mesmos materiais e espessuras, excetuando-se o revestimento asfáltico que apresentava 11 cm de espessura. Os valores de deflexão no ponto de aplicação da carga aproximada de 40 kN variaram entre 17,1 e 60,5 (0,01 mm) para o subtrecho A e entre 40,5 e 59,3 (0,01 mm) para o subtrecho B. O Quadro 10 apresenta um resumo dos valores dos módulos retroanalizados no programa BackMeDiNa para os dois subtrechos. Os máximos valores individuais de módulo calculados foram:

- revestimento em concreto asfáltico: 6498 MPa;
- base em brita graduada: 746 MPa;

- sub-base em solo estabilizado granulometricamente: 561 MPa;
- subleito: 411 MPa.

Em complemento, os autores testaram a sensibilidade dos módulos retroanalizados em função dos módulos iniciais informados ao programa, sendo observada baixa sensibilidade. Por fim, foram realizadas análises de múltiplas camadas para as bacias de deflexão em estudo por meio do *software* WESLEA (com os mesmos módulos obtidos no BackMeDiNa) e foi possível concluir que o componente de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) do BackMeDiNa apresenta valores de respostas estruturais similares aos calculados com o WESLEA.

Quadro 10 - Módulos retroanalizados com o BackMeDiNa para rodovia no Paraná em eminência de restauração

Subtrecho	Parâmetro	Módulo retroanalizado (MPa)				RMS (μm)
		Revestimento (CA)	Base (BGS)	Sub-base (solo estab.)	Subleito	
A	Média	3132,35	358,95	163,60	313,25	4,30
	Coef. Variação (%)	52,39	54,24	64,96	19,48	37,02
B	Média	2165,10	168,00	124,00	184,70	5,54
	Coef. Variação (%)	29,91	50,30	38,66	14,36	19,04

Fonte: Adaptado de Camarini, Silva Junior e Fontenele (2019).

Franco *et al.* (2019) desenvolveram um estudo de projeto de reforço para quatro segmentos de uma rodovia federal de médio a alto volume de tráfego. Todos os segmentos são revestidos em concreto asfáltico, sendo as espessuras de 10, 14, 12 e 19 cm para os segmentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Os segmentos 1, 2 e 3 são compostos por base e sub-base em brita graduada, totalizando espessuras de 31, 16 e 35 cm, respectivamente. Os segmentos 1 e 3 apresentaram reforço do subleito em solo. O segmento 4 é composto por uma camada de base em solo de 33cm, assente sobre o subleito em solo. A avaliação deflectométrica dos segmentos foi realizada com o equipamento FWD e os valores de deflexão máxima média foram de 60,1, 48,2, 46,2 e 20,9 (0,01 mm), respectivamente para os segmentos 1, 2, 3 e 4. A porcentagem de área trincada variou entre 15 e 25% e a irregularidade longitudinal situou-se entre 3,0 e 4,5 m/km.

De acordo com os autores, foram coletados materiais das camadas granulares e do revestimento asfáltico para a realização em laboratório de ensaios de módulo de resiliência. Os valores de módulo retroanalizados com o BackMeDiNa foram comparados com os valores

obtidos em laboratório e foi identificada uma mesma ordem de grandeza na comparação entre os resultados para os materiais granulares. Para as camadas em solo, o módulo de resiliência esteve no intervalo entre 81 e 468 MPa e os módulos retroanalizados, entre 52 e 490 MPa. Os resultados encontrados em laboratório para a brita graduada estiveram compreendidos entre 146 e 744 MPa; através da retroanálise, entre 78 e 774 MPa. Os módulos do revestimento asfáltico divergiram, pois os valores de módulos dos corpos de prova ensaiados (M_r variou entre 6.869 e 25.880 MPa) são influenciados pelo envelhecimento e a retroanálise (variação entre 3.188 e 15.327 MPa) é influenciada pelo alto grau de trincamento.

Franco *et al.* (2019) simularam os resultados do projeto de reforço pelos procedimentos do DNER PRO 011 e PRO 269. Através do PRO 011, a espessura de reforço variou entre 3 e 4 cm para os segmentos 1, 2 e 3 e não foi necessária para o segmento 4. Com o método PRO 269, nenhum dos quatro segmentos necessitou de reforço. Na solução de projeto indicada pelo *software* MeDiNa (outras poderiam ser testadas a critério do projetista) o tipo de mistura asfáltica a empregar no reforço foi testada entre as Classes 1 a 4 (em função do fator de fadiga), foram indicadas as espessuras do revestimento asfáltico para fresagem (entre 5 e 12 cm), a necessidade de remoção da camada de base, a estimativa de área trincada ao final do período de projeto e a identificação da espessura da nova camada de reforço (variando entre 5 e 13 cm).

Na pesquisa realizada por Machado (2019), foi avaliado o pavimento flexível do anel viário da Universidade Federal de Juiz de Fora, através da avaliação de 98 pontos de teste, subdivididos em 8 segmentos homogêneos. A construção do pavimento ocorreu na década de 1960 e, desde então, apenas uma restauração foi realizada, no ano de 1991, com a execução de um recapeamento com aproximadamente 4 cm de espessura. Atualmente, a estrutura do pavimento é composta por 8 cm de revestimento asfáltico, 10 cm de base, 20 cm de sub-base e 40 cm de reforço do subleito, sendo as três últimas camadas compostas por solo. O autor realizou a avaliação funcional do pavimento com o inventário de defeitos e a medição da irregularidade longitudinal. Para a avaliação estrutural, foram realizadas medidas de deflexão com o FWD modelo KUAB e a abertura de um poço de sondagem para a coleta de materiais e a realização de ensaios de laboratório: módulo de resiliência, granulometria e compactação. A área trincada característica variou entre 13,24 e 54,37% e as medidas de irregularidade longitudinal, variaram entre 1,87 e 4,31 m/km. A deflexão característica nos segmentos homogêneos esteve compreendida no intervalo entre 40,49 e 88,59 (0,01 mm).

Na sequência, o autor realizou a retroanálise através do BackMeDiNa. O processo de retroanálise foi repetido até que o erro calculado pelo programa parasse de variar. Notou-se

que os segmentos com módulos mais elevados foram os que apresentaram as deflexões mais baixas e vice-versa. No Quadro 11 são apresentados os valores calculados e o comparativo com os resultados de laboratório para o módulo de resiliência, sendo encontradas substanciais diferenças. Segundo o autor, para se atingir baixos erros na retroanálise, foi necessária a execução do processo em média 4 vezes para cada bacia, fato que permite a compreensão das divergências constatadas.

No complemento de sua pesquisa, Machado (2019) realizou o dimensionamento do reforço do pavimento através do MeDiNa, concluindo que a melhor solução de projeto é o recapeamento de toda a extensão com mistura asfáltica na espessura de 5 cm, contando com a aplicação de uma camada antirreflexão de trincas em alguns trechos.

Quadro 11 - Módulos retroanalizados com o BackMeDiNa e módulos de resiliência obtidos em laboratório

Procedimento	Local	Revestimento	Base	Sub-base	Reforço	Subleito
Retroanálise	Seg. 01	6023	343	341	399	302
	Seg. 02	4910	252	304	368	297
	Seg. 03	7099	480	466	478	368
	Seg. 04	4733	262	220	225	202
	Seg. 05	5174	364	426	509	335
	Seg. 06	4523	240	202	279	270
	Seg. 07	5595	324	427	369	247
	Seg. 08	4898	241	243	258	183
Laboratório	Poço de sondagem	6447	261	212	163	126

Vieira (2020) empregou as deflexões obtidas com a viga Benkelman na pesquisa de Rodrigues (2018) para três trechos de pavimentos asfálticos urbanos do município de Joinville e por meio da retroanálise com os *softwares* BackMeDiNa e BAKFAA realizou comparativos entre os valores de módulo de elasticidade calculados. O primeiro trecho localiza-se na Avenida Santos Dumont e a estrutura do pavimento é composta por duas camadas de revestimento asfáltico (5 cm de espessura para cada camada), base em brita graduada (15 cm), sub-base em macadame seco (20 cm) e reforço em pedra pulmão (30 cm). O segundo trecho engloba a Rua Otto Boehm e o pavimento conta com revestimento asfáltico (5 cm), base em brita graduada (15 cm) e sub-base em macadame seco (30 cm). A Rua São Borja compõe o terceiro trecho e apresenta 5 cm de revestimento asfáltico, 15 cm de base em brita graduada e 38cm de saibro bruto. Nos trechos avaliados, as deflexões variaram entre 9 e 54 (0,01 mm).

O autor empregou a metodologia de Theisen *et al.* (2019) para a adaptação das deflexões obtidas com a viga Benkelman e o emprego nos *softwares* de retroanálise. Buscou-se obter os menores valores possíveis de erro de retroanálise, porém com a cautela de não se obter valores de módulos incoerentes. Conforme esperado, nos pontos com maiores deslocamento verticais, os processos iterativos de retroanálise resultaram em módulos menores e vice-versa. O Quadro 12 indica os valores de módulo retroanalizados na condição de camadas não aderidas e sem a prévia correção da temperatura para as leituras de deflexão.

Ao final do estudo, Vieira (2020) concluiu que, o *software* BackMeDiNa inferiu menores valores de módulo às camadas do pavimento em comparação ao BAKFAA, apresentando retroanálises com menores erros. Na avaliação entre retroanálises na condição “aderida” e “não aderida”, os dois *softwares* mostraram que a consideração de interfaces “não aderidas” inferiu maiores rigidezes às camadas, causando um maior estado de tensões na estrutura do pavimento e ocasionando a redução da sua vida de fadiga.

Quadro 12 - Módulos retroanalizados com o BackMeDiNa e BAKFAA na condição “não aderida” para vias urbanas de Joinville

Trecho	Software	Módulo retroanalizado (MPa)			RMS (μm)
		Revestimento	Camadas granulares	Subleito	
1	BackMeDiNa	9182,7	774,4 / 768,2	290,2	16,7
	BAKFAA	10720,5	857,7	318,9	12,5
2	BackMeDiNa	7713,8	739,3	259,7	18,9
	BAKFAA	8710,7	692,4	261,6	20,0
3	BackMeDiNa	7453,2	587,4 / 555,8	142,3	15,5
	BAKFAA	8797,2	536,6	138	19,2

Fonte: Adaptado de Vieira (2020).

2.5 PROCEDIMENTO DNER- PRO 011/79

Nesta seção é abordado o procedimento DNER-PRO 011/79, também denominado Método B, o qual é empregado nas análises subsequentes da dissertação para o cálculo do reforço dos pavimentos. Conforme DNIT (2006b), a norma PRO 011/79 tem sido muito empregada no Brasil em virtude de sua grande simplicidade.

Franco *et al.* (2019) mencionam que o método considera o valor da deflexão característica do segmento como elemento principal para a definição da espessura de reforço. Em DNER (1979) consta a explicação de que existe uma correlação entre o valor das deflexões e o aparecimento de defeitos nos pavimentos flexíveis.

O método fundamenta-se na hipótese de que a deflexão máxima admissível (D_{adm}) para um pavimento é função exclusiva da repetição de cargas ao longo do tempo (DNER, 2006b; BALBO, 2007). De acordo com Pinto e Preussler (2010, p. 161), “o critério da deflexão admissível contido na PRO 11/79 foi extraído do “Asphalt Institute”, para pavimentos flexíveis constituídos de base granular e revestidos com concreto betuminoso.” A deflexão admissível é calculada pela Equação 21.

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \cdot \log N \quad (21)$$

Onde:

D_{adm} = deflexão admissível (0,01 mm);

N = número de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 tf.

O valor de N a considerar nos cálculos da espessura do pavimento é o que corresponde às cargas por eixo a serem suportadas pelo reforço do pavimento, desde a liberação ao tráfego até o final do período de projeto arbitrado para o reforço (DNER, 1979).

Constam na Tabela III da referida norma os critérios para a avaliação estrutural do pavimento com base nos dados deflectométricos obtidos: deflexão admissível (D_{adm}), deflexão de projeto (D_p) e raio de curvatura (R). O dimensionamento do reforço do pavimento por meio do critério deflectométrico segue a Equação 22.

$$h = K \cdot \log (D_p / D_{adm}) \quad (22)$$

Onde:

h = espessura do reforço do pavimento (cm);

K = fator de redução de deflexão, próprio do material usado no reforço ($K = 40$ para o concreto asfáltico);

D_p = deflexão característica ou deflexão de projeto (0,01 mm);

D_{adm} = deflexão admissível após a execução do reforço do pavimento (0,01 mm).

2.6 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO PARA RODOVIAS CATARINENSES

A Gerência de Pavimentos visa determinar o modo mais eficaz da aplicação dos recursos disponíveis na malha rodoviária, atendendo as necessidades dos usuários e dentro de um plano estratégico que garanta o melhor custo *versus* benefício (DNIT, 2011). As avaliações dependem dos modelos de previsão de desempenho aplicáveis para a malha rodoviária em estudo, permitindo estimar a deterioração das rodovias de acordo com o seu estágio atual, cargas atuantes, volume de tráfego, estrutura do pavimento, método construtivo, meio ambiente, entre outros (PATERSON, 1987).

Em Santa Catarina, o estudo dos modelos de comportamento das rodovias estaduais pavimentadas foi realizado, até o presente momento, por Antonio Fortunato Marcon (1996) em sua tese de doutorado e Alexandre de Oliveira (2007) através de sua dissertação de mestrado. Ambos os autores classificaram as rodovias em estudo com base nas regiões geológicas do estado de Santa Catarina, conforme divisão estabelecida pelo Departamento Nacional de Produção Mineral e Coordenadoria de Recursos Minerais DNPM/CRM em 1987. A Figura 24 identifica as divisões geológicas do estado de Santa Catarina, sejam:

- 1 - Rochas de Embasamento Cristalino: solos originados principalmente de gnaisses, granulitos e granitos;
- 2 - Rochas Gonduânicas Sedimentares: solos oriundos de rochas sedimentares: argilitos, siltitos e arenitos;
- 3 - Rochas Gonduânicas Vulcânicas: onde os solos resultaram da decomposição de basaltos.

Os estudos desenvolvidos por Marcon (1996) abrangeram todo o estado catarinense, subdividindo as rodovias estaduais nas três regiões geológicas mencionadas, abrangendo uma malha pavimentada de 2.482,50 km. Foram obtidas equações de desempenho para os parâmetros: deflexão máxima média, Índice de Gravidade Global (IGG), irregularidade longitudinal, trincamento e afundamento da trilha de roda. Para cada parâmetro foram desenvolvidas duas equações, a primeira em função da variável “idade” (idade do pavimento desde a construção, em anos) e a segunda em função de “NA” (número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 toneladas-força, calculado pelo método da AASHTO). O intervalo de valores avaliado para a variável “idade” foi de 1 a 20 anos e para o número “NA”, de $1,4 \cdot 10^4$ a $7,7 \cdot 10^6$. As equações desenvolvidas para a região 1, para a qual pertence a

rodovia em estudo na presente dissertação, e os respectivos valores de coeficiente R^2 são apresentadas no Quadro 13.

Figura 24 - Identificação das regiões geológicas do estado catarinense



Fonte: Adaptado de Oliveira (2007).

Quadro 13 - Linhas de tendência para rodovias catarinenses da região geológica 1 segundo Marcon (1996)

Equação e coeficiente R^2 (variável IDADE)		Equação e coeficiente R^2 (variável NA)	
$DEFM = 60,235 \times IDADE^{0,2002}$ (23)	0,14	$DEFM = 26,097 \times NA^{0,0954}$ (24)	0,19
$IGG = 0,51 \times IDADE^2 - 3,24 \times IDADE + 16,86$	0,54	$IGG = 0,0082 \times NA^{0,6011}$	0,44
$QI = 21,891 \times e^{0,0339 \times IDADE}$	0,43	$QI = 25,798 + 6.10^{-6} \times NA - 3.10^{-13} \times NA^2$	0,69
$TR = 0,0039 \times IDADE^{3,1215}$	0,48	$TR = 3.10^{-8} \times NA^{1,3981}$	0,53
$ATR = 1,5739 + 0,1766 \times IDADE$	0,24	$ATR = 0,1262 \times NA^{0,2397}$	0,28

Fonte: Adaptado de Marcon (1996).

Onde:

DEFM = Deflexão máxima média da viga Benkelman, em 0,01mm;

IGG = Índice de Gravidade Global;

QI = Quociente de irregularidade, em contagens/km;

TR = Trincamento, em porcentagem;

ATR = Afundamento da trilha de roda, em mm;

IDADE = Idade do pavimento desde a construção, em anos;

NA = Número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 toneladas-força, calculado pelo método da AASHTO.

Oliveira (2007) estudou especificamente as rodovias estaduais situadas na região geológica 1, perfazendo um total 867,20km. Sua pesquisa objetivou a obtenção de linhas de tendência, antes e após as intervenções de restauração, para a previsão da evolução da deflexão, do trincamento total e da irregularidade longitudinal. O autor agrupou em duas famílias os trechos de rodovias com o mesmo tipo de pavimento, uso e classificação. Cada família também foi dividida em duas subfamílias, nomeadas:

- família 1: subfamília F1S1 e subfamília F1S2;
- família 2: subfamília F2S1 e subfamília F2S2.

No Quadro 14 são resumidas as equações obtidas por Oliveira (2007) para a família 2 subfamília 1 (F2S1) que compreende a maior quantidade de trechos avaliados ($n = 53$). O intervalo de valores avaliado para a variável “idade” foi de 1 a 27 anos (para pavimentos não restaurados) e de 1 a 8 anos (para pavimentos restaurados); para o número “NA” foram avaliados tráfegos de 2.10^4 a 4.10^6 , para pavimentos restaurados e não restaurados.

Quadro 14 - Linhas de tendência para rodovias catarinenses da região 1, família 2 subfamília1, segundo Oliveira (2007)

Restauração	Equação	R ²
Deflexões		
Antes	$DEFM = 1,201.10^{-5} \times NA + 80,863$ (25)	0,14
Depois	$DEFM = 8,927.10^{-6} \times NA + 73,579$	0,01
Antes	$DEFM = 1,529 \times IDADE + 71,116$ (26)	0,12
Depois	$DEFM = 3,446 \times IDADE + 57,784$	0,06
Trincamento		
Antes	$TR = 1,508.10^{-5} \times NA + 1,022$	0,49
Depois	$TR = 2,378.10^{-6} \times NA + 0,678$	0,51
Antes	$TR = 1,583 \times IDADE - 6,671$	0,30
Depois	$TR = 1,667 \times IDADE - 2,824$	0,37

Fonte: Adaptado de Oliveira (2007).

Onde:

DEFM = Deflexão máxima média da viga Benkelman, em 0,01mm;

TR = Trincamento, em porcentagem;

IDADE = Idade do pavimento desde a construção, em anos;

NA = Número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 toneladas-força, calculado pelo método da AASHTO.

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada envolveu a realização de ensaios em campo com os equipamentos FWD, LWD e viga Benkelman, a análise e o tratamento estatístico dos dados obtidos através dos três diferentes equipamentos para 110 pontos de teste, visando 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.

3.1 ETAPAS DA PESQUISA

O fluxograma apresentado na Figura 25 indica as oito etapas da pesquisa, necessárias ao atendimento dos objetivos propostos para a dissertação.

Figura 25 - Fluxograma das etapas da metodologia

(continua)

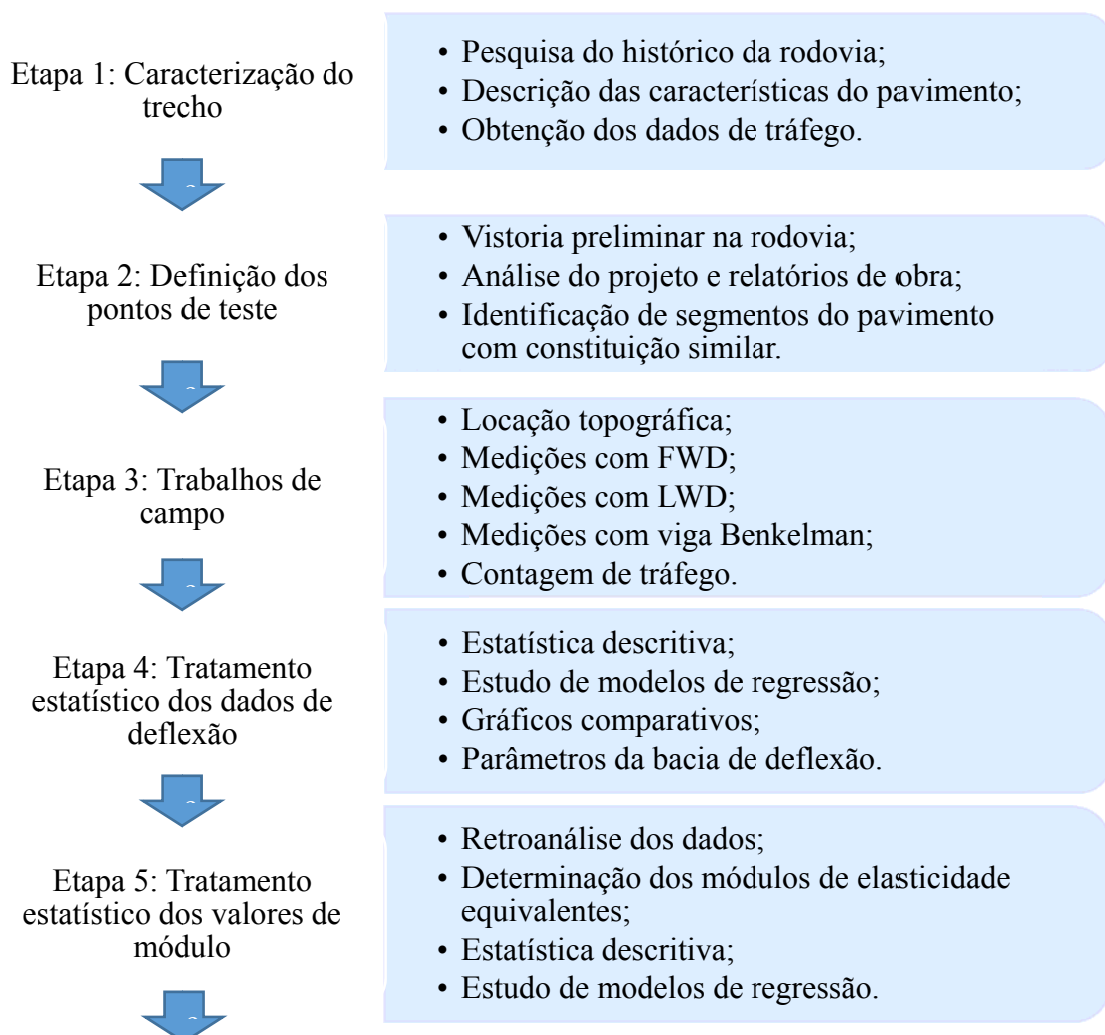
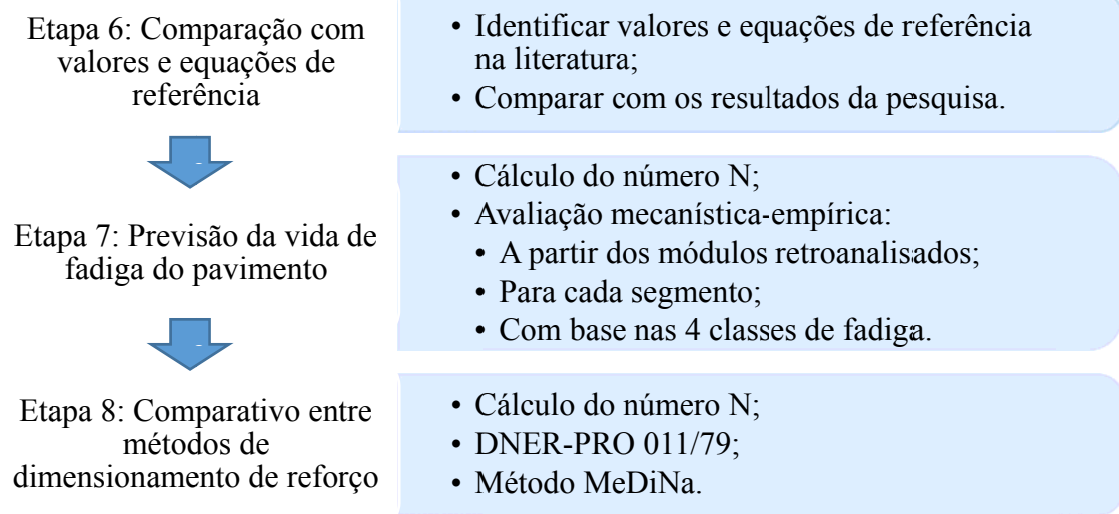


Figura 25 - Fluxograma das etapas da metodologia

(conclusão)



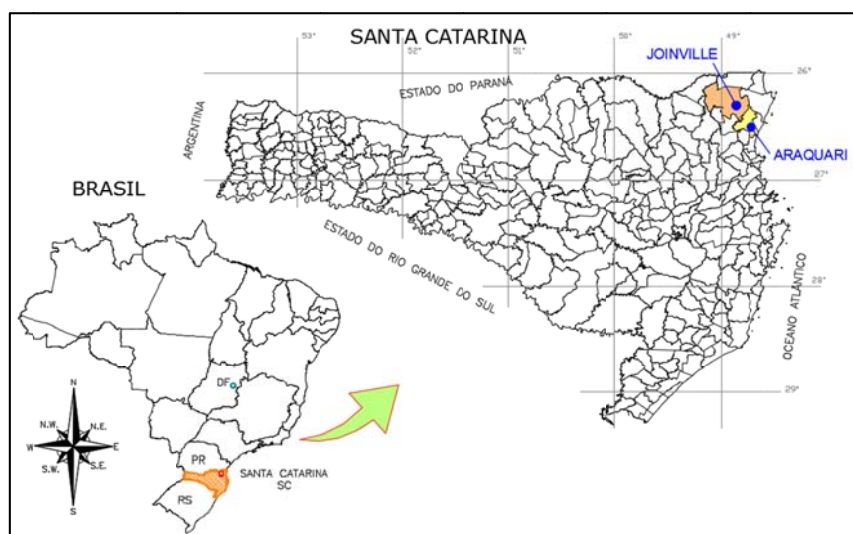
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na sequência é identificada a rodovia onde foram realizados os ensaios para a dissertação e a descrição detalhada dos métodos da pesquisa.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA

A rodovia selecionada para a pesquisa é denominada Estrada Rio do Morro, está situada nos municípios de Joinville e Araquari, na região norte do estado de Santa Catarina. A Figura 26 indica a localização geográfica dos municípios mencionados.

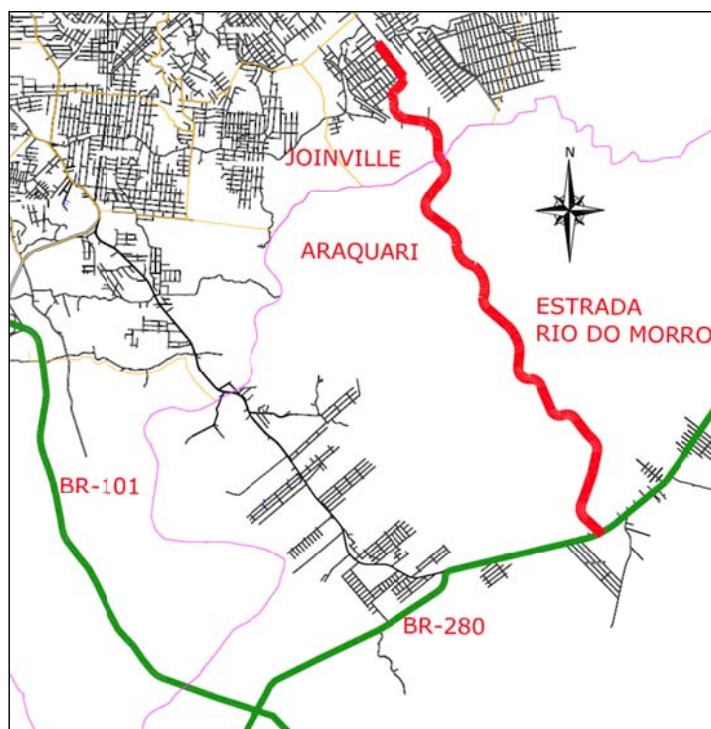
Figura 26 - Planta de localização dos municípios de Joinville e Araquari



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A Estrada Rio do Morro é uma rodovia municipal com 9,4 km de extensão. Conforme Figura 27, inicia-se na área urbana situada ao sul do município de Joinville (bairro Paranaguamirim), desenvolve-se por área predominantemente rural no município de Araquari e tem como ponto final o entroncamento com a BR-280, km 31 (próximo ao bairro Colégio Agrícola, em Araquari).

Figura 27 - Planta de localização da Estrada Rio do Morro



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Conforme Projeto de Implantação, DEINFRA-SC (2009), o segmento em estudo situa-se em área com relevo plano/ondulado e foi projetado com os parâmetros:

- velocidade diretriz: 60 - 70 km/h;
- rampa máxima: 3% por extensão de 760 m;
- pista de rolamento: 7,50 m;
- acostamento: 1,50 m para cada lado da pista;
- largura da plataforma de terraplenagem: 13,00 m;
- superelevação: 3 a 8%;
- tráfego para o período de projeto: $N (USACE) = 2,3 \times 10^6$.

As obras de pavimentação foram iniciadas no ano de 2013. Os serviços foram interrompidos no ano de 2015, tendo sido retomados em 2018 e finalizados em dezembro de

2019. Destaca-se que houve a atuação de duas empresas executoras nas obras da Estrada Rio do Morro, sendo uma empresa responsável pelos trabalhos no período de 2013 até 2015 e outra empresa após a retomada dos trabalhos em 2018 e finalização em 2019.

Durante o período de interrupção a estrada foi utilizada pelo tráfego local, inclusive com caminhões de empresa mineradora e empresa do ramo metalúrgico localizadas ao longo do trajeto.

3.3 MÉTODOS

Cada uma das oito etapas da pesquisa é sequencialmente detalhada, com a identificação da forma de execução, normativas utilizadas, considerações e demais informações que esclareçam ao leitor os procedimentos empregados na pesquisa.

Etapa 1 - Caracterização do trecho

Para o trecho em estudo foram identificadas as seguintes características: ano de implantação da pavimentação, características geométricas da rodovia, dados de tráfego, espessuras e materiais das camadas do pavimento. A obtenção destas informações envolveu a consulta aos projetos de implantação e relatórios mensais das obras, disponibilizados no Setor de Arquivo do DEINFRA-SC em Florianópolis e no escritório regional do Departamento situado no município de Joinville.

Etapa 2 - Definição dos pontos de teste

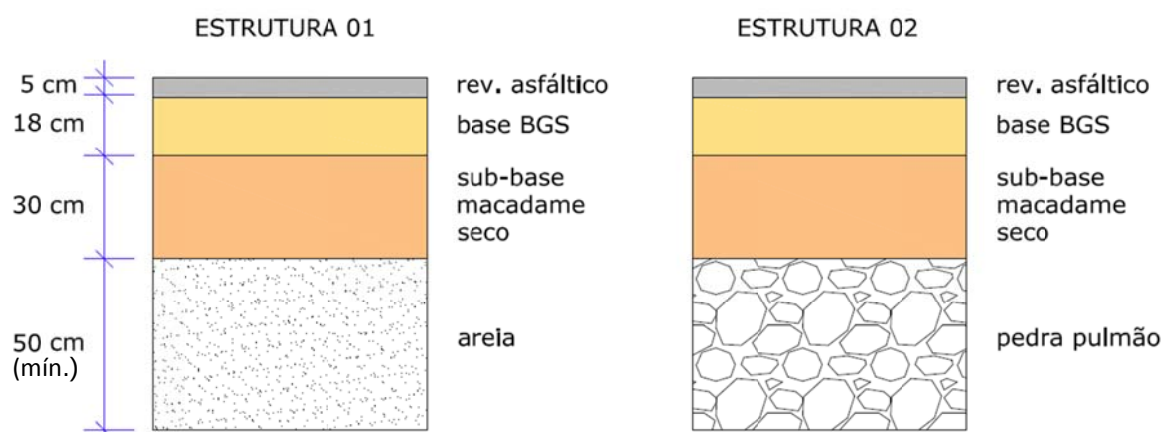
Foi realizada uma vistoria preliminar a campo de maneira a se ter contato com a área de estudo, materiais disponíveis, tráfego, clima, identificação do estado de conservação do pavimento, da geometria e relevo. Esta vistoria norteou o planejamento dos próximos trabalhos de campo realizados e das medidas de segurança necessárias.

Através da análise do Projeto de Implantação (DEINFRA-SC, 2009) da rodovia e Relatórios Mensais de Obra (DEINFRA-SC, 2014, 2019) foi possível identificar a estrutura do pavimento executado com relação aos materiais e espessuras, assim como o ano de pavimentação para cada intervalo do estaqueamento. Dessa forma, foi possível identificar segmentos com características construtivas similares do pavimento e realizar a seleção dos pontos de ensaio.

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, conforme Figura 28. As demais camadas do pavimento são semelhantes, sendo: 30 cm em sub-base com macadame seco, 18 cm em base de brita graduada simples e 5 cm de revestimento asfáltico composto pela mistura entre agregados e cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70) convencional de acordo com a granulometria especificada pela faixa VI do DEINFRA-SC (2016).

Figura 28 - Detalhe das camadas do pavimento



Fonte: Adaptado de DEINFRA-SC (2009, 2014, 2019).

Ao todo, foram identificados seis segmentos com características similares, para os quais foi realizada a distribuição dos pontos de teste. No Quadro 15 está demonstrada a disposição dos segmentos de acordo com o tipo de região (urbana ou rural), estrutura (reforço do subleito em areia ou pedra) e ano de pavimentação (2014 e 2019).

Quadro 15 - Características dos segmentos e distribuição dos pontos de teste

Segmento	Tipo	Identificação dos pontos	Quantidade de pontos	Estrutura (reforço)	Ano de pavimentação
01	Urbano	01 ao 21	21	02 (pedra)	2014
02	Rural	22 ao 40	19	01 (areia)	2014
03	Rural	41 ao 48	8	01 (areia)	2019
04	Rural	49 ao 70	22	01 (areia)	2019
05	Rural	71 ao 100	30	01 (areia)	2014
06	Rural	101 ao 110	10	02 (pedra)	2019

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Na Figura 29 estão indicadas as principais características de cada segmento e a sua localização ao longo do trecho da Estrada Rio do Morro.

Tendo em vista o cunho acadêmico desta pesquisa de mestrado, assim como Salviano (2015), o espaçamento entre cada ponto de teste não seguiu rigorosamente as prescrições das normas. O objetivo principal foi realizar a avaliação estrutural do maior número de pontos possíveis de modo a caracterizar os segmentos, logo os espaçamentos variaram entre 10 e 50 m. Quando o ponto coincidia com bueiros, o mesmo foi afastado para evitar interferências nas leituras.

Figura 29 - Localização dos segmentos de estudo



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Etapa 3 - Trabalhos de campo

Os trabalhos em campo foram subdivididos em cinco atividades principais: locação topográfica, medição de deflexões com os equipamentos: FWD, LWD e viga Benkelman e contagem de tráfego. Os trabalhos foram realizados pela autora, com o apoio de equipe auxiliar, entre os meses de maio de 2019 e março de 2020.

Para todos os dias com medição de deflexão e dias que antecederam estas medições, foi realizada consulta das condições climáticas (precipitação e temperatura) aferidas pela estação do bairro Itaum em Joinville, tendo sido a estação meteorológica mais próxima identificada à região da Estrada Rio do Morro. Os dados coletados estão dispostos no ANEXO A desta dissertação.

Os certificados de calibração dos equipamentos empregados na pesquisa estão disponibilizados nos ANEXOS B, C e D, sendo referentes ao FWD, LWD e viga Benkelman, respectivamente.

Locação topográfica

Foi realizado o deslocamento com o acompanhamento de topógrafo e auxiliar para a demarcação em pista dos exatos pontos a realizar as medições. Esta fase foi realizada no mês de maio de 2019, abrangendo dois dias de trabalho. Previamente foi elaborada planilha com as coordenadas para locação e definição dos pontos de partida, disposta no APÊNDICE A desta dissertação. As coordenadas dos pontos estão georreferenciadas ao Datum SIRGAS 2000 e foram posicionados na trilha de rodas externa conforme preconizado pelo DNER (1994, 1996). A demarcação realizada em campo é ilustrada através da Figura 30.

Figura 30 - Demarcação dos pontos de teste na pista



Fonte: A autora (2019).

Medição de deflexões com o FWD

Os testes com o FWD foram realizados no dia 06 de junho de 2019, em boas condições climáticas, entretanto houve precipitação nos dias anteriores, conforme se verifica no ANEXO A da dissertação. A temperatura ambiente esteve em média 22°C e a temperatura do pavimento 25°C. Ambas as temperaturas foram registradas pelo equipamento FWD. O procedimento realizado é descrito pela norma 273-PRO (DNER, 1996) e, conforme esta especificação, a carga aplicada ao pavimento foi de aproximadamente 40 kN. O equipamento utilizado é da marca KUAB, fabricado na Suécia, com número de série FV112, equipado com placa de 30 cm de diâmetro para a transferência do carregamento e sete geofones para a leitura das deflexões, sendo posicionados a 0, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 cm do centro da carga aplicada ao pavimento. Detalhes do equipamento empregado podem ser verificados na Figura 31. Os dados medidos com o FWD (temperatura, carregamento e deflexões) estão dispostos no APÊNDICE B.

Figura 31 - Equipamento FWD durante as medições na Estrada Rio do Morro



Fonte: A autora (2019).

Medição de deflexões com o LWD

O equipamento LWD empregado nos testes é de fabricação alemã, marca/modelo HMP-LFGpro. Conforme fabricante, o equipamento conta com um peso de queda de 10 kg, altura de queda de 72 cm, diâmetro e espessura da placa de 30 cm e 2 cm, respectivamente, e intervalo de temperatura para utilização de 0 a 40°C. A Figura 32 ilustra o equipamento HMP-LFGpro durante as medições na Estrada Rio do Morro. Verifica-se que a pasta é composta por equipamento de comando (interligado por cabo ao LWD), GPS e impressora (os dados podem ser impressos logo após a realização dos testes ou descarregados em computador). O LWD apresenta bolha de nível para a referência da haste, peso, sistema de amortecimento e placa.

Figura 32 - Equipamento LWD durante as medições na Estrada Rio do Morro



Fonte: A autora (2019).

Na sequência é descrito o procedimento de ensaio realizado para cada ponto de teste com o equipamento LWD, tendo como orientação a norma ASTM E2835-11 (2015):

- execução de uma fina camada de areia para garantir uma superfície plana;
- assentamento e rotação da placa sobre a superfície de areia;
- nivelamento do equipamento;
- realização de três quedas do peso para a pré-compactação da base;
- realização de três quedas adicionais para o registro de dados;

O procedimento mencionado foi repetido três vezes em cada ponto de teste, de modo a obter três leituras de deflexão e módulo, efetuando a posterior média entre as leituras. A temperatura da superfície da pista e temperatura ambiente foram medidas com termômetro digital infravermelho. Os dados obtidos neste ensaio encontram-se no APÊNDICE C.

A etapa para determinação de deflexões através do LWD desenvolveu-se em nove dias, sempre no período da manhã e em boas condições climáticas, com temperaturas muito próximas às temperaturas da data dos testes com o FWD. Os testes ocorreram entre 26/08/2019 e 13/09/2019, com equipe composta por cinco pessoas e veículo de apoio, conforme ilustrado na Figura 33.

Figura 33 - Equipe para a realização dos testes com LWD



Fonte: A autora (2019).

Viga Benkelman

Os ensaios com a viga Benkelman foram realizados nos dias 03/12/2019 e 06/12/2019, ambos em boas condições climáticas. Muito embora as medições tenham ocorrido no mês de dezembro (próximo à estação do verão), a temperatura ambiente verificada nos dias dos ensaios chegou a atingir o mínimo de 23°C. De modo similar aos ensaios realizados com o LWD, as temperaturas ambiente e da superfície da pista foram aferidas com termômetro digital infravermelho.

Foi empregada viga Benkelman com relação 2/1 entre a parte maior e a parte menor do braço de prova, com certificado de calibração vigente n. 1909-01, com data de calibração em 02/09/2019. A Figura 34 apresenta detalhes do equipamento utilizado.

Figura 34 - Viga Benkelman empregada em medições na Estrada Rio do Morro



Fonte: A autora (2019).

Para o carregamento do pavimento foi empregado caminhão padronizado por norma, com eixo traseiro simples e rodas duplas, disponibilizado pela empresa executora dos trabalhos de pavimentação na Estrada Rio do Morro. O caminhão foi previamente pesado em balança situada na pedreira de propriedade da mesma empresa, totalizando 80 kN em seu eixo traseiro, buscando-se distribuir a carga igualmente entre as duas rodas duplas. A Figura 35 permite visualizar detalhes da pesagem eixo traseiro do caminhão e a carga de bica corrida que foi disposta sobre a caçamba para atingir o referido peso.

Figura 35 - Pesagem do caminhão e carregamento aplicado



Fonte: A autora (2019).

O procedimento de teste com a viga Benkelman seguiu o descrito nas normas DNER-ME 024/94 e DNIT 133/2010 - ME. Em todos os pontos de teste foi realizado o delineamento da bacia de deformação, entretanto alterou-se o distanciamento entre as leituras de deflexão, seguindo a mesma configuração adotada nos ensaios com o equipamento FWD: 0, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 cm. Os valores de deflexão medidos estão tabulados e apresentados no APÊNDICE D. Os trabalhos foram realizados com a participação de um motorista de caminhão, dois auxiliares de laboratório e duas pessoas para a sinalização do trânsito. Na Figura 36 são dispostas imagens dos ensaios com a viga Benkelman realizados na pesquisa.

Figura 36 - Ensaaios com a viga Benkelman na Estrada Rio do Morro



Fonte: A autora (2019).

Contagem de tráfego

A definição para o dia da semana e também o número de horas para a contagem do tráfego seguiu o disposto na Instrução de Serviço para Estudos e Projetos CREMA do DAER-RS (2017) onde se define que os volumes de tráfego devem ser totalizados a cada hora e terão frequência de um dia (mínimo de 16 horas), devendo ocorrer em uma 3ª, 4ª ou 5ª feira.

A contagem de tráfego foi realizada no dia 18/03/2020, em uma quarta-feira, na véspera do fechamento das escolas e paralisação do transporte coletivo no estado de Santa Catarina, fato ocorrido em 19/03 em virtude do início do enfrentamento da pandemia do Covid-19. O local determinado para a contagem situou-se na Estrada Rio do Morro, defronte para a empresa metalúrgica localizada no intervalo entre o Segmento 02 e o Segmento 03.

A contagem foi realizada entre 6:00 e 20:00 hs, sendo divididos os períodos de contagem a cada uma hora. O volume de tráfego obtido considera a soma do tráfego em ambos os sentidos de circulação na Estrada Rio do Morro. A planilha empregada na contagem foi extraída do Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006c), denominada como “ficha de contagem volumétrica I” e apresentada à página 104 do referido manual. A planilha faz a distinção entre veículos leves (automóveis e camionetas), ônibus (tipo 2CB e 3CB conforme classificação do DNIT), caminhões (diversas configurações de eixos conforme classificação do DNIT) e outros.

A contagem foi realizada pela autora de modo manual e com o auxílio de duas pessoas. Os dados foram contabilizados e estão dispostos no APÊNDICE E da dissertação.

Etapa 4 - Tratamento estatístico dos dados de deflexão

As medidas de deflexão realizadas no ponto de aplicação de carga (D_0) com os equipamentos FWD, LWD e viga Benkelman foram inicialmente convertidas para a temperatura de referência 25°C, segundo Equação 3, com o propósito de padronizar os valores e possibilitar o comparativo entre eles. Conforme mencionado por Moraes (2015), foi também realizada a correção das deflexões em função do carregamento aplicado. A correção foi realizada através de interpolação linear, em função da razão entre a carga pré-estabelecida e a carga realmente aplicada.

Foi realizada a estatística descritiva, para cada segmento e para as leituras realizadas com cada equipamento, com a determinação da média ($\bar{X}$), desvio padrão (σ), valores máximos ($D_{\max}$) e mínimos ($D_{\min}$), deflexões características (DC) e coeficiente de variação (CV). Os dados foram interpretados através de diagramas de caixa e diagramas lineares. Os diagramas de caixa permitiram a identificação dos pontos distantes da mediana da amostra, denominados *outlier*, os quais foram excluídos das análises estatísticas.

Foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson (r) para a determinação da relação da linearidade entre medidas de deflexão:

- LWD *versus* FWD;
- viga Benkelman *versus* FWD;
- viga Benkelman *versus* LWD,

Conforme Montgomery e Runger (2018), o coeficiente de correlação (r) é utilizado para quantificar a força da relação linear entre duas variáveis e assume valores no intervalo de $-1 \leq r \leq 1$, onde -1 significa uma correlação perfeita negativa entre as duas variáveis e 1 significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis.

Foi utilizada a análise de regressão linear simples (conforme Equação 27) para modelar empiricamente as medidas de deflexão entre o LWD e FWD, entre viga e FWD e entre viga e LWD, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e as probabilidades de significância observadas a partir dos valores P . Para julgamento foi comparado o valor P com o nível de significância adotado de 0,05.

$$y = C_1 \cdot x + C_2 \quad (27)$$

Onde:

C_1 = coeficiente angular da reta de regressão;

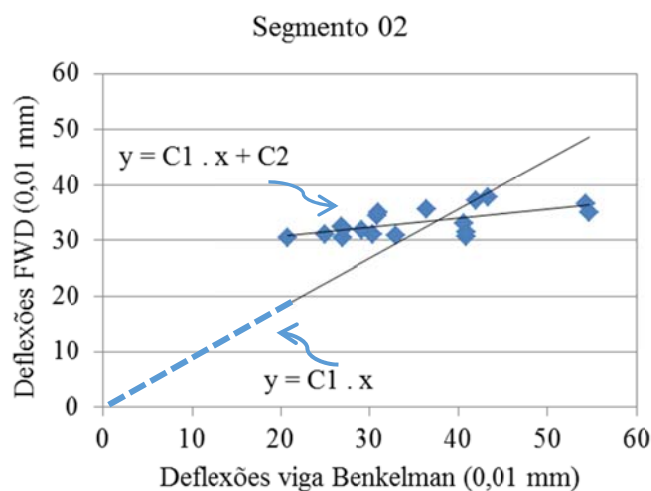
C_2 = coeficiente linear.

Na bibliografia são também encontrados modelos de regressão entre deflexões com a eliminação do coeficiente linear C_2 , também denominado intercepto ou constante da equação.

Neste caso, a linha de tendência cruza o eixo y no valor “0” e é representada pela Equação 28. Com os dados da dissertação, também se buscou elaborar modelos com a eliminação do intercepto, entretanto não foram obtidos resultados satisfatórios para a maior parte dos conjuntos de valores. Primeiramente porque o valor “zero” está fora do intervalo de deflexões observadas. Também o intervalo de deflexões medidas é considerado inferior a outros intervalos de modelos identificados na literatura com a eliminação do intercepto. Dessa maneira, ao eliminar a constante e a partir dos dados da pesquisa, houve uma tendência para a redução de R^2 e parte dos modelos de regressão e previsões foram viesadas, conforme exemplo da Figura 37. Ao se optar pela permanência do intercepto nas proposições da dissertação, fica evidente que os modelos devem ser empregados para o intervalo de dados que deu origem à regressão, caso contrário em uma suposta deflexão “zero” no eixo x, não seria obtido “zero” para a deflexão no eixo y.

$$y = C_1 \cdot x \quad (28)$$

Figura 37 - Representação da bacia de deformação e da deformada



Montgomery e Runger (2018) mencionam que o método denominado “análise de variância” (frequentemente abreviada por ANOVA) pode ser utilizado para testar a significância da regressão. No método, são realizados testes estatísticos de hipóteses sendo que a hipótese nula $H_0: \beta_1 = 0$ indica que não há relação linear entre as variáveis x e y e, ao contrário, a hipótese alternativa $H_1: \beta_1 \neq 0$ implica em dizer que a variável x é importante para explicar a variabilidade de y . A hipótese nula $H_0: \beta_1 = 0$ é rejeitada quando a partir da distribuição estatística F , verifica-se que $F_{\text{calculado}}$ é superior ao F_{tabelado} ($F_{\alpha; 1; n-2}$, sendo $\alpha = 0,05$ e n o número de observações).

Todas as análises estatísticas indicadas na Etapa 4 foram realizadas através do *software* Excel. No caso da análise de significância, além de informar o $F_{\text{calculado}}$, o *software* também informa o valor F de significância, sendo que valores inferiores a $\alpha = 0,05$ indicam a rejeição da hipótese nula e, desta forma, é possível concluir que o modelo de regressão é significativo.

A Etapa 4 foi finalizada com o cálculo dos seguintes parâmetros da bacia de deflexão: raio de curvatura (R), Índice de Curvatura da Superfície (SCI), Índice de Danos à Base (BDI) e Índice de Curvatura da Base (BCI). Os cálculos foram realizados com os dados de deflexão medidos com o FWD e de modo a comparar os resultados encontrados para cada segmento da Estrada Rio do Morro. Foram apresentados os valores médios obtidos e destaca-se que, para o cálculo do raio de curvatura, onde é necessário empregar o valor de D_{25} , foi necessário interpolar os valores de deflexão medidos nos pontos D_{20} e D_{30} .

Etapa 5 - Tratamento estatístico dos valores de módulo

As bacias de deflexão determinadas em campo através do FWD e da viga Benkelman foram retroanalizadas, de modo a se obter, para cada equipamento, os módulos de elasticidade equivalentes para cada camada do pavimento e para cada segmento. A retroanálise foi realizada através do *software* BackMeDiNa, versão 1.1.0 (abril/2018). Está disponível no site do DNIT a versão atualizada 1.2.0 (junho/2020), entretanto ela foi disponibilizada no segundo semestre do ano de 2020, quando as retroanálises desta dissertação encontravam-se concluídas e em período avançado da presente pesquisa, logo estão sendo apresentados os resultados alcançados com a versão anterior. Este processo não foi realizado para as leituras de deflexão com o LWD, pois as mesmas foram realizadas somente para o ponto de aplicação da carga (D_0).

Nos procedimentos de retroanálise, assim como realizado na pesquisa de Bueno (2016), a camada de reforço do subleito foi considerada como parte conjunta de um “sistema subleito”, o qual consiste em solo natural do terreno e o seu reforço. Dessa forma foi determinado um valor único de módulo para os materiais abaixo da sub-base.

A retroanálise partiu da inserção dos dados das bacias de deflexão obtidas com o FWD e a viga Benkelman em uma planilha do *software* Excel em formato “csv” (valores separados por vírgulas). O modelo da planilha a ser preenchida é disponibilizado no *software* BackMeDiNa através da aba “projeto” e opção “modelo de arquivo de bacias”. A Figura 38 apresenta o arquivo formato “csv” preenchido no Excel para os dados de FWD relacionados ao Segmento 01 em estudo. As informações a preencher são: o número da seção, raio da placa

de aplicação de carga do FWD, data dos ensaios, temperatura do ar e temperatura do pavimento, carga (na unidade “kgf”), número da estaca e complementos (caso seja necessário) e os valores aferidos de deflexão (na unidade “ μm ”).

Figura 38 - Preenchimento no Excel do arquivo de bacias para dados do FWD

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	BACKMEDINA														
2	SEÇÃO:		1												
3	RAIO (cm):		15												
4	Data de Execução	Temp. Do Ar	Temp. Do Pavimento	Carga	Estaca – Número	Estaca – Descola	Estaca – Faixa	Estaca – Trilha	d0	d20	d30	d45	d60	d90	d120
5	06/06/2019	21	22	4160	1	0	0	0	458	343	280	208	165	115	85
6	06/06/2019	21	22	4138	2	0	0	0	265	196	159	117	97	74	60
7	06/06/2019	21	22	4023	3	0	0	0	268	199	158	114	90	62	48
8	06/06/2019	21	22	4060	4	0	0	0	395	291	227	159	121	83	62
9	06/06/2019	21	22	4038	5	0	0	0	422	292	215	146	109	76	60

Fonte: Elaborada pela autora (2020), com base no *software* BackMeDiNa (2018).

Conforme explicado anteriormente no item 2.2.4.2, o BackMeDiNa está configurado para a inserção de bacias de deflexão obtidas com o equipamento FWD, logo para a utilização com os dados provenientes da viga Benkelman, é necessário realizar a conversão do carregamento do eixo padrão (eixo simples de rodas duplas), sendo que nesta dissertação foi empregada a metodologia proposta por Theisen *et al.* (2009). Foi considerado o carregamento efetuado por apenas uma das rodas do semieixo, as deflexões foram divididas por 2 (representando o efeito de apenas uma das rodas) e as distâncias entre as medidas de deflexões foram recalculadas conforme a Equação 6 oriunda do método. Através da Figura 39 é visualizada a forma de preenchimento com os dados de viga Benkelman do Segmento 01.

Os dados de deflexão inseridos nas planilhas não foram previamente convertidos para a temperatura de referência 25°C, pois tanto a temperatura como o carregamento são fatores considerados pelos *softwares* de retroanálise nos processos iterativos de cálculo.

Figura 39 - Preenchimento no Excel do arquivo de bacias para dados da viga Benkelman

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	BACKMEDINA														
2	SEÇÃO: 1														
3	RAIO (cm): 10,79														
4	Data de Execução	Temp. Do Ar	Temp. Do Pavimento	Carga	Estaca – Número	Estaca – Descola	Estaca – Faixa	Estaca – Trilha	d15	d25	d33	d47	d61	d91	d120
5	06/12/2019	31	44	2050	1	0	0	0	236,5	216	185	133,5	103	72	41
6	06/12/2019	31	44	2050	2	0	0	0	421,5	411	370	267,5	195,5	164,5	154
7	06/12/2019	32	44,5	2050	3	0	0	0	133,5	92,5	72	51,5	41	31	20,5
8	06/12/2019	32	45	2050	4	0	0	0	195,5	175	133,5	92,5	72	51,5	41
9	06/12/2019	32	45	2050	5	0	0	0	205,5	133,5	103	72	41	20,5	10,5

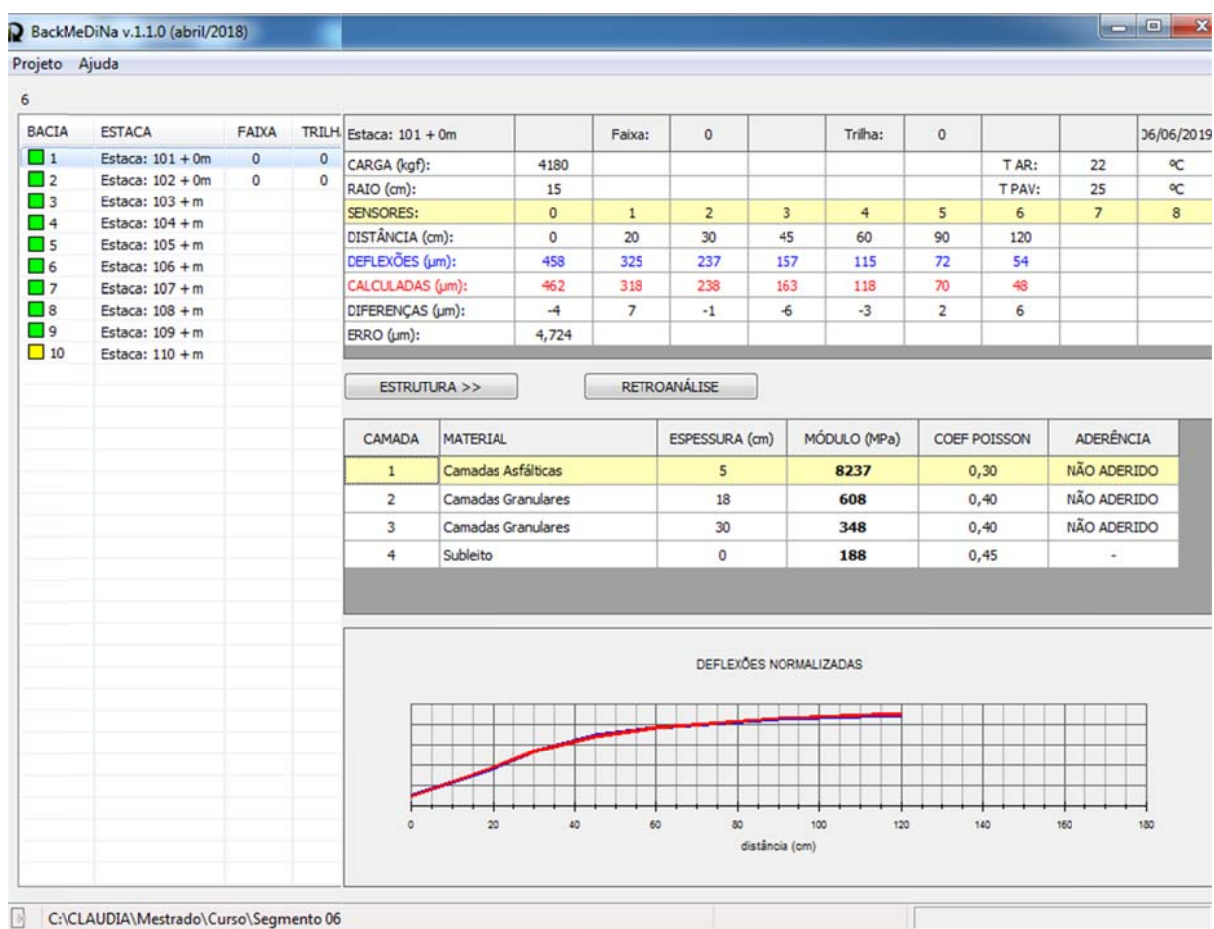
Fonte: Elaborada pela autora (2020), com base no *software* BackMeDiNa (2018).

Na sequência do processo, os dados preenchidos na planilha do Excel em formato “csv” são importados para o BackMeDiNa, a partir de sua aba “projeto” e opção “importar arquivo de bacias”. Após este procedimento, é informada a estrutura do pavimento, sendo uma camada de revestimento asfáltico de 5 cm, camada granular de base em brita graduada de 18 cm, camada granular de sub-base em macadame seco de 30 cm e subleito. Foram empregados os valores de coeficiente de Poisson já indicados pelo programa para cada tipo de material. Conforme os estudos de Camarini, Silva Junior e Fontenele (2019), foi verificado que os módulos iniciais fornecidos ao programa têm pouca influência nos módulos finais. Em sua pesquisa, Bueno (2016) definiu módulos iniciais relativamente baixos, com o objetivo de evitar a compensação modular de uma camada para outra. Logo, os valores iniciais dos módulos foram arbitrados, sendo 4000 MPa para o revestimento, 300 MPa para a base, 200 MPa para a sub-base e 100 MPa para o subleito. A condição de aderência entre as camadas foi informada como “não aderida”, tendo em vista as condições pré-estabelecidas indicadas no Manual de utilização do método MeDiNa. Segundo o Manual, está pré-estabelecida a condição “aderida” na interface entre camadas asfálticas, fato que não ocorre na estrutura do pavimento em estudo.

A partir da Figura 40 pode ser visualizada a tela do BackMeDiNa e a representação das bacias obtidas segundo o FWD para o Segmento 06. Os cálculos foram realizados a partir do acionamento do botão “retroanálise”. Ao finalizar cada etapa de cálculo, o botão foi acionado novamente até se obter uma melhor aproximação entre as deflexões medidas e as deflexões calculadas, representada através do valor do erro (RMS em μm), sendo que se buscou obter valores inferiores a 5 μm , que é um indicativo de uma boa correlação entre as deflexões medidas e calculadas, marcando a seção com a cor verde no quadro de listagem das

seções. Principalmente para as bacias de deflexão obtidas com a viga Benkelman, devido à menor precisão do equipamento em comparação com o FWD, foram também admitidos valores de erro entre 5 e 10 μm , indicando uma correlação razoável entre as medidas de campo e as deflexões calculadas, tendo o programa marcado a seção com a cor amarela no quadro de listagem das seções.

Figura 40 - Representação das bacias obtidas segundo o FWD para o segmento 06 no BackMeDiNa



Fonte: Elaborada pela autora (2020), com base no *software* BackMeDiNa (2018).

Os dados retroanalizados para as bacias de deflexão aferidas com o FWD e a viga Benkelman estão dispostos nos APÊNDICES G e H, respectivamente. Com base nos valores dos módulos de elasticidade equivalentes determinados para cada camada do pavimento (revestimento, base, sub-base e subleito), para cada segmento (do 01 ao 06) e para cada equipamento (FWD e viga Benkelman), foram realizadas análises estatísticas com procedimento análogo ao comentado na etapa 4: estatística descritiva, diagramas, análise de

dados inconsistentes, verificação da correlação entre os dados, estudo de modelos de regressão e análise de significância.

Etapa 6 - Comparação com valores e equações de referência

Os valores de deflexão inventariados em campo com o FWD, LWD e viga Benkelman são comparados entre si e com valores de referência pesquisados. Para cada modelo de regressão elaborado na dissertação, considerando: viga Benkelman *versus* FWD, viga Benkelman *versus* LWD e LWD *versus* FWD, foram identificados equações similares na literatura e realizados comparativos quanto à proximidade ou não dos resultados obtidos pelos modelos da pesquisa e os modelos da bibliografia.

Na sequência, foram comparados os valores de módulo retroanalizados por meio dos dados de deflexão do FWD (em virtude da maior consistência dos resultados com relação à viga Benkelman) com o resultado de ensaio de laboratório para a determinação do módulo de resiliência da mistura asfáltica realizada na oportunidade da obra e estudos de demais autores. Foram comparados os resultados dos módulos retroanalizados para cada camada do pavimento da Estrada Rio do Morro.

Em consulta ao banco de dados da obra na Estrada Rio do Morro, identificou-se ensaio de laboratório para o módulo de resiliência da mistura asfáltica projetada com a finalidade de emprego na execução do pavimento nos Segmentos 03, 04 e 06. O resultado está disponibilizado no ANEXO E desta dissertação e foi comparado com os valores resultantes da retroanálise para a camada de revestimento.

Etapa 7 - Previsão da vida de fadiga do pavimento

Cálculo do número N

A Etapa 7 foi iniciada a partir da contabilização dos dados da contagem de tráfego realizada no dia 18/03/2020 para um período de 16 horas e a expansão dos números para 24 horas. Conforme a IS-110/10, Instrução de Serviço para Estudos de Tráfego, DAER-RS (2010), os volumes de tráfego (soma entre os sentidos de ida e volta) deverão ser extrapolados de 16 para 24 horas, podendo ser empregado o coeficiente de 1,13 nesta estimativa. Desta maneira, a Tabela 1 apresenta o resumo da contagem de tráfego realizada para os dois sentidos da via e a extrapolação para 24 horas segundo o coeficiente informado.

Tabela 1 - Resumo da contagem de tráfego para o período de 16hs e a expansão para o período de 24hs

Veículos	Veículos Leves			Caminhões								Ônibus	Outros	Total
	Motos	Carros	Camionetas	2C	3C	2S2	2S3	3S2	3S3	3Q6	3T6	2CB	Retro	
Totais para 16hs	793	3.257	290	176	172	8	8	3	13	2	2	13	4	4.741
	4.340			401										
Totais para 24hs	896	3.680	328	199	194	9	9	3	15	2	2	15	5	5.357
	4.904			453										

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na sequência dos cálculos, foram considerados apenas os veículos comerciais (caminhões e ônibus), um período de projeto de 10 anos e uma taxa de crescimento de 5% ao ano. A taxa de 5% foi estimada com base na avaliação do incremento da frota de veículos ano a ano para os municípios de Joinville e Araquari. A Tabela 2 apresenta o volume de tráfego empregado no cálculo e as porcentagens de cada categoria de veículo em relação ao valor total do VMD.

Tabela 2 - Veículos comerciais e porcentagem em relação ao total

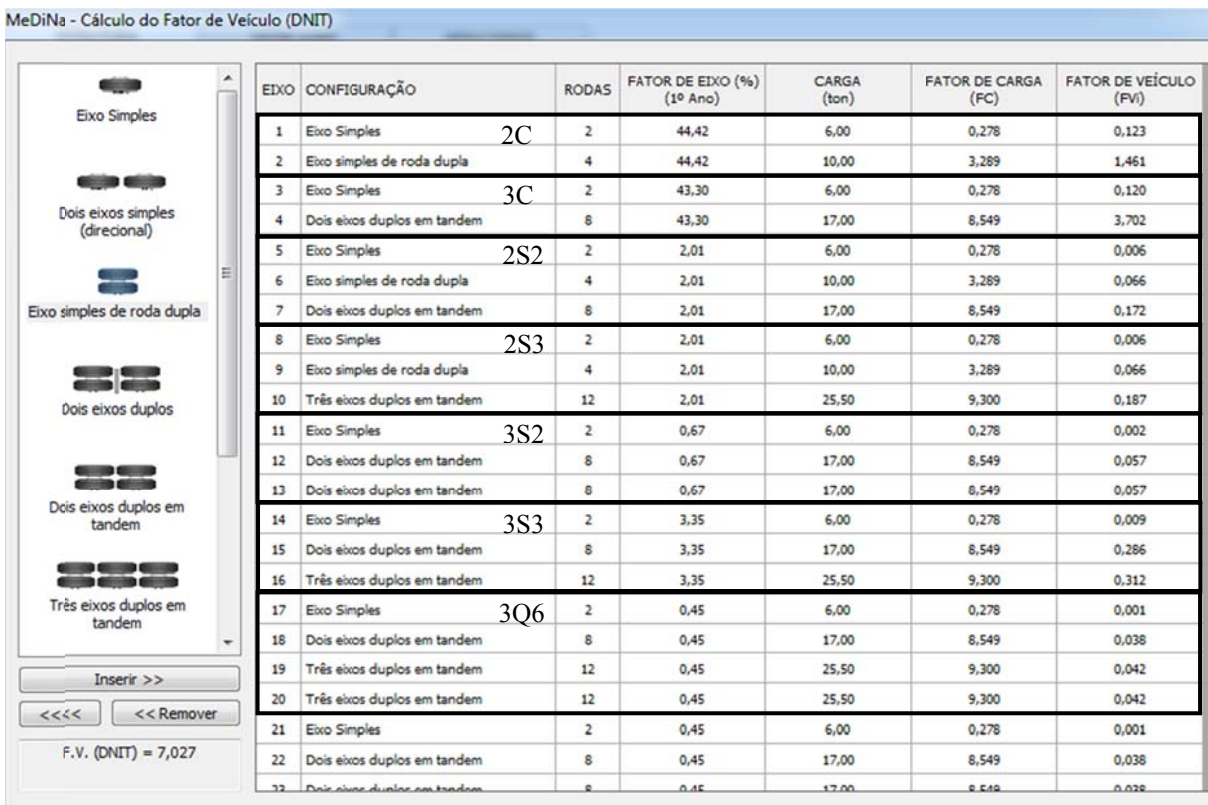
Veículos	Caminhões								Ônibus	Total
	2C	3C	2S2	2S3	3S2	3S3	3Q6	3T6	2CB	
Totais 24hs	199	194	9	9	3	15	2	2	15	448
%	44,42	43,30	2,01	2,01	0,67	3,35	0,45	0,45	3,35	100 %

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O cálculo do fator de veículo (FV) e do número N foram realizados através do *software* MeDiNa. A Figura 41 ilustra a tela do MeDiNa específica para o cálculo deste fator, onde foram completadas as informações referentes à configuração de eixos para cada categoria de veículo identificada nas contagens da dissertação. Por exemplo, para o veículo tipo 2C, composto por um eixo simples dianteiro e um eixo simples de roda dupla traseiro, foi realizado o preenchimento de duas linhas da planilha e a inserção da porcentagem de 44,42% em relação ao total de veículos comerciais. O valor da carga (ton) foi automaticamente preenchido pelo *software*, assim como os cálculos do fator de carga (FC) através da metodologia USACE e o fator de veículo (FV).

Figura 41 - Cálculo do fator de veículo (FV)

MeDiNa - Cálculo do Fator de Veículo (DNIT)



EIXO	CONFIGURAÇÃO	RODAS	FATOR DE EIXO (%) (1º Ano)	CARGA (ton)	FATOR DE CARGA (FC)	FATOR DE VEÍCULO (FV)
1	Eixo Simples 2C	2	44,42	6,00	0,278	0,123
2	Eixo simples de roda dupla	4	44,42	10,00	3,289	1,461
3	Eixo Simples 3C	2	43,30	6,00	0,278	0,120
4	Dois eixos duplos em tandem	8	43,30	17,00	8,549	3,702
5	Eixo Simples 2S2	2	2,01	6,00	0,278	0,006
6	Eixo simples de roda dupla	4	2,01	10,00	3,289	0,066
7	Dois eixos duplos em tandem	8	2,01	17,00	8,549	0,172
8	Eixo Simples 2S3	2	2,01	6,00	0,278	0,006
9	Eixo simples de roda dupla	4	2,01	10,00	3,289	0,066
10	Três eixos duplos em tandem	12	2,01	25,50	9,300	0,187
11	Eixo Simples 3S2	2	0,67	6,00	0,278	0,002
12	Dois eixos duplos em tandem	8	0,67	17,00	8,549	0,057
13	Dois eixos duplos em tandem	8	0,67	17,00	8,549	0,057
14	Eixo Simples 3S3	2	3,35	6,00	0,278	0,009
15	Dois eixos duplos em tandem	8	3,35	17,00	8,549	0,286
16	Três eixos duplos em tandem	12	3,35	25,50	9,300	0,312
17	Eixo Simples 3Q6	2	0,45	6,00	0,278	0,001
18	Dois eixos duplos em tandem	8	0,45	17,00	8,549	0,038
19	Três eixos duplos em tandem	12	0,45	25,50	9,300	0,042
20	Três eixos duplos em tandem	12	0,45	25,50	9,300	0,042
21	Eixo Simples	2	0,45	6,00	0,278	0,001
22	Dois eixos duplos em tandem	8	0,45	17,00	8,549	0,038
23	Dois eixos duplos em tandem	8	0,45	17,00	8,549	0,038

F.V. (DNIT) = 7,027

Fonte: Elaborada pela autora (2020), com base no *software* MeDiNa (2019).

Em seguida, conforme ilustrado pela Figura 42 e através da tela inicial do programa, foi realizado o cálculo do número N, mediante o preenchimento das informações relativas ao VMD para o primeiro ano de abertura ao tráfego, a taxa de crescimento, o período de projeto e a porcentagem de veículos na faixa de projeto, neste caso considerada 50% tendo em vista que a contagem foi realizada para ambos os sentidos de tráfego.

Ainda que os segmentos 01, 02 e 05 tenham sido executados há mais de 5 anos, para efeito das análises realizadas sequencialmente, considerou-se o mesmo tráfego da contagem do ano de 2020, visto que a plena utilização da rodovia ao tráfego ocorreu a partir de 2019 com a conclusão da etapa de pavimentação.

Figura 42 - Cálculo do número N

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Coletor Primário
VMD (1º ano):	448
FV:	7,027
N anual (1º ano):	1,15e+06
% Veículos na faixa de projeto:	50
N Anual da faixa:	5,75e+05
Taxa de crescimento (%):	5,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	7,23e+06

Fonte: Elaborada pela autora (2020), com base no *software* MeDiNa (2019).

Avaliação mecanística-empírica

Esta etapa objetivou realizar a aplicação dos dados obtidos por meio do FWD e viga Benkelman na análise mecanicista-empírica do pavimento. A rotina de cálculo seguiu o Guia de utilização do método MeDiNa desenvolvido por Franco e Motta (2018), de maneira a estimar a vida útil do pavimento, para cada segmento, com base nos critérios de fadiga.

Segundo Gomes (2012), o mecanismo de ruptura por fadiga se dá pelo trincamento das fibras inferiores do revestimento asfáltico, propagando-se por toda a espessura até a superfície da camada, sendo estas geradas das elevadas deflexões recuperáveis a que são submetidos os pavimentos flexíveis.

Não foram realizadas análises com relação à deformação permanente dos materiais, dispensando-se desta forma o emprego dos resultados de ensaio *Flow Number* e dos valores de coeficientes de regressão para a determinação dos afundamentos em trilha de roda limite.

A partir do *software* MeDiNa (versão 1.1.3.0 - set/2019) e do modo de projeto “Pavimento Novo (Nível A)” foram inseridos os parâmetros das camadas dos pavimentos: materiais, espessuras, valores dos módulos de elasticidade equivalentes retroanalizados na etapa anterior e coeficiente de Poisson.

Foi estimada a vida útil de cada pavimento, do segmento 01 ao 06, através dos dados do FWD e da viga Benkelman, em termos de número de passagens do eixo padrão necessárias para atingir a fadiga do revestimento asfáltico, considerando-se um máximo trincamento de 30% da área pavimentada. Por não se dispor de ensaios laboratoriais para fadiga da mistura asfáltica, foram realizadas simulações com base nas quatro equações de fadiga pré-estabelecidas no *software* e seus respectivos coeficientes de regressão k1 e k2. Por fim, estimou-se a espessura da camada de revestimento asfáltico necessária aos segmentos que não atingiram a vida útil de projeto estipulada em 10 anos quanto ao critério de fadiga.

Etapa 8 - Comparativo entre métodos de dimensionamento de reforço

A etapa final prevê um comparativo entre o Método PRO-11/79 e o Método MeDiNa para o dimensionamento de reforço dos pavimentos. Para o cumprimento deste objetivo, algumas considerações precisaram ser realizadas, visto que o pavimento apresenta baixo nível defletoométrico e, atualmente, não necessita de intervenções estruturais.

Cálculo do número N para o novo período de projeto

Com relação ao tráfego, considerou-se a contagem de tráfego realizada em 18/03/2020 para a composição do Volume médio diário (VMD) para o primeiro ano, totalizando 448 veículos comerciais. Considerando-se um período de projeto de 10 anos para o pavimento implantado e 10 anos para o novo período de projeto e a partir da taxa de crescimento de 5% foram obtidos os valores de número N_{USACE} dispostos na Tabela 3, sendo o valor de N para o projeto de reforço igual a $1,18.10^7$.

Tabela 3 - Cálculo do número N

Anos	VMD	N anual	N implantação	N reforço	N acumulado
1	448	574528	$5,75.10^5$		$5,75.10^5$
2	470	603254	$1,18.10^6$		$1,18.10^6$
3	494	633417	$1,81.10^6$		$1,81.10^6$
4	519	665087	$2,48.10^6$		$2,48.10^6$
5	545	698342	$3,17.10^6$		$3,17.10^6$
6	572	733259	$3,91.10^6$		$3,91.10^6$
7	600	769922	$4,68.10^6$		$4,68.10^6$
8	630	808418	$5,49.10^6$		$5,49.10^6$
9	662	848839	$6,34.10^6$		$6,34.10^6$
10	695	891281	$7,23.10^6$		$7,23.10^6$
11	730	935845		$9,36.10^5$	$8,16.10^6$
12	766	982637		$1,92.10^6$	$9,14.10^6$
13	805	1031769		$2,95.10^6$	$1,02.10^7$
14	845	1083357		$4,03.10^6$	$1,13.10^7$
15	887	1137525		$5,17.10^6$	$1,24.10^7$
16	931	1194401		$6,37.10^6$	$1,36.10^7$
17	978	1254122		$7,62.10^6$	$1,48.10^7$
18	1027	1316828		$8,94.10^6$	$1,62.10^7$
19	1078	1382669		$1,03.10^7$	$1,75.10^7$
20	1132	1451802		$1,18.10^7$	$1,90.10^7$

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Método DNER-PRO 011/79

O cálculo da espessura de reforço conta com a aplicação das Equações 21 e 22, para as quais deve ser determinado o número N_{USACE} (conforme item anterior) e a deflexão de projeto D_p . O valor de D_p foi calculado com o emprego de modelos de previsão de desempenho elaborados para rodovias estaduais catarinenses, segundo estudos de Marcon (1996) e Oliveira (2007) e através das Equações 23 e 26, as quais empregam a variável “idade” (considerada 10 anos) para a previsão da deflexão e Equações 24 e 25, que avaliam o número NA (segundo AASHTO) previsto ao final do período de projeto.

Método MeDiNa para o projeto de reforço

Com o emprego do *software* MeDiNa (versão 1.1.3.0 - set/2019) e do modo “Projeto de Reforço” foram inseridos os parâmetros das camadas dos pavimentos: materiais, espessuras, coeficiente de Poisson e valores dos módulos retroanalizados com os dados do FWD, conforme orientação do método. Os módulos retroanalizados na dissertação não refletem a rigidez das camadas do pavimento a ser identificada no período de 10 anos a partir de sua implantação. Ainda assim foram empregados estes valores com a finalidade de se verificar a “situação mais otimista” de um dimensionamento de reforço, visto que a tendência, com o passar dos anos, é de aumento das deflexões, redução dos módulos e maiores espessuras no dimensionamento da camada.

Foram efetuadas análises e definição de espessuras de reforço considerando-se as misturas asfálticas teóricas das classes 1, 2, 3 e 4 encontradas na base de dados do MeDiNa, realizando o comparativo entre resultados encontrados em função da resistência à fadiga de cada classe teórica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AVALIAÇÃO GERAL DA RODOVIA

A maior parte da extensão da Estrada Rio do Morro foi pavimentada nos anos de 2014 e 2019. Para os segmentos avaliados nesta dissertação, 01, 02 e 05, o revestimento asfáltico se encontrava com a idade de 5 anos durante os trabalhos de campo para medição das deflexões. Pavimentados em 2019, os segmentos 03, 04 e 06 foram avaliados após 6 meses (com o FWD e o LWD) e 12 meses de sua execução (com a viga Benkelman).

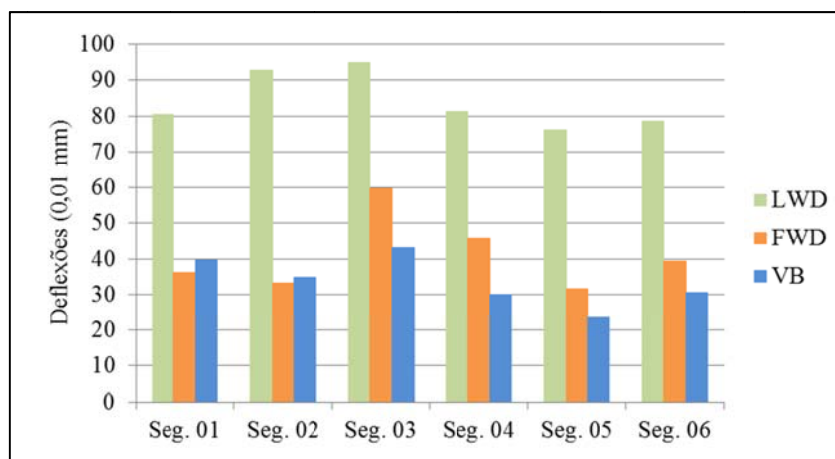
Não se verificou, através de inspeção visual, qualquer defeito no pavimento ocasionado pela repetição do tráfego, para todos os segmentos em estudo. Pode ser atribuído o valor de 0% para o trincamento nos segmentos avaliados e, conforme classificação do Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006b), pavimentos com trincamento entre 0 e 2% são classificados como excelentes.

No que se refere às medidas de deflexão, o pavimento da Estrada Rio do Morro também apresentou ótimo desempenho. As leituras realizadas com a viga Benkelman, com deflexões características para os segmentos entre 26,9 e 52,5 (0,01 mm), foram inferiores ao valor de 76 (0,01 mm) considerado como limite para a deflexão característica sobre o revestimento asfáltico mediante controle tecnológico executivo com a viga Benkelman conforme estabelecido no projeto de pavimentação do DEINFRA-SC (2017).

A Figura 43 ilustra o comparativo entre as deflexões obtidas para cada segmento. 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 D_0 em função do tipo de reforço do subleito de cada segmento, seja com areia ou com pedra pulmão.

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.

Figura 43 - Comparativo entre deflexões médias com LWD, FWD e viga Benkelman



4.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS VALORES DE DEFLEXÃO

As leituras de deflexão realizadas em distintas temperaturas foram previamente convertidas para a temperatura de referência de 25°C e corrigidas com relação ao carregamento aplicado. Todos os parâmetros estatísticos calculados consideraram os intervalos de aceitação dos valores das deflexões, havendo a exclusão dos pontos considerados *outlier*. O APÊNDICE F traz as leituras de deflexão corrigidas que foram empregadas nas análises estatísticas realizadas sequencialmente.

4.2.1 Estatística Descritiva

A análise estatística descritiva consistiu em determinar, para cada segmento e para os equipamentos FWD, LWD e viga Benkelman (VB), os valores de média ($\bar{X}$), desvio padrão (σ), valores máximos ($D_{\max}$) e mínimos ($D_{\min}$), deflexões características (DC) e coeficiente de variação (CV).

As Tabelas 4, 5 e 6 indicam os resultados obtidos para as deflexões medidas com FWD, LWD e viga Benkelman, respectivamente. A partir da visualização dos dados, é possível identificar que:

- os valores de deflexão medidos pelo LWD foram superiores; os valores medidos pelo FWD foram intermediários; e os valores medidos com a viga Benkelman foram inferiores aos demais equipamentos;

- as médias calculadas com o LWD variaram entre 76,2 e 94,8 (0,01 mm), com o FWD a variação esteve compreendida entre 31,7 e 59,7 (0,01 mm) e com a viga Benkelman as médias variaram entre 23,5 e 43,2 (0,01 mm);

- com o LWD os valores individuais estiveram compreendidos entre 50,1 até 120,6 (0,01 mm), enquanto com o FWD, o intervalo esteve entre 26,7 e 68,5 (0,01 mm) e, com a viga Benkelman, o intervalo ficou compreendido entre 18,1 e 61,3 (0,01 mm);

- a menor amplitude (diferença entre $D_{\text{máx}}$ e $D_{\text{mín}}$) foi verificada com as leituras do FWD, resultando em 41,8 (0,01 mm), seguida pelas leituras com a viga Benkelman, 43,2 (0,01 mm) e a maior amplitude foi verificada com os valores de deflexão obtidos segundo o LWD, calculada em 70,5 (0,01 mm);

- os valores de desvio padrão (σ) indicaram uma menor variação das leituras realizadas com o FWD (σ variou de 2,5 até 6,6) em comparação com a viga Benkelman (σ variou de 3,0 até 10,8) e o LWD (σ variou de 5,5 até 16,8);

- os coeficientes de variação (CV) indicaram uma menor dispersão das leituras realizadas com o FWD (CV de 8 até 17) em comparação com a viga Benkelman (de 10 a 27);

- os coeficientes de variação (CV) referentes às leituras com o LWD estiveram compreendidos entre 7 e 18, relativamente próximos aos coeficientes de variação do FWD.

Tabela 4 - Estatística descritiva para os valores de deflexão - FWD

Segmento:	01	02	03	04	05	06
número de dados:	21	18	8	22	30	10
média (X):	36,2	33,2	59,7	45,6	31,7	39,4
desvio padrão (σ):	6,2	2,5	6,6	4,8	2,7	5,2
deflexão característica (DC):	42,4	35,7	66,3	50,4	34,4	44,6
deflexão mínima ($D_{\text{mín}}$):	26,7	30,4	50,1	33,9	27,2	31,1
deflexão máxima ($D_{\text{máx}}$):	45,8	37,9	68,5	53,2	39,1	49,2
coef. de variação (CV%):	17	8	11	11	9	13

Tabela 5 - Estatística descritiva para os valores de deflexão - LWD

Segmento:	01	02	03	04	05	06
número de dados:	21	19	8	22	29	10
média (X):	80,4	92,6	94,8	81,4	76,2	78,7
desvio padrão (σ):	5,5	16,8	9,1	12,5	11,5	10,5
deflexão característica (DC):	85,9	109,4	103,9	93,9	87,7	89,2
deflexão mínima ($D_{\text{mín}}$):	68,5	61,2	81,0	59,8	50,1	60,5
deflexão máxima ($D_{\text{máx}}$):	89,5	120,6	109,7	107,6	96,7	91,6
coef. de variação (CV%):	7	18	10	15	15	13

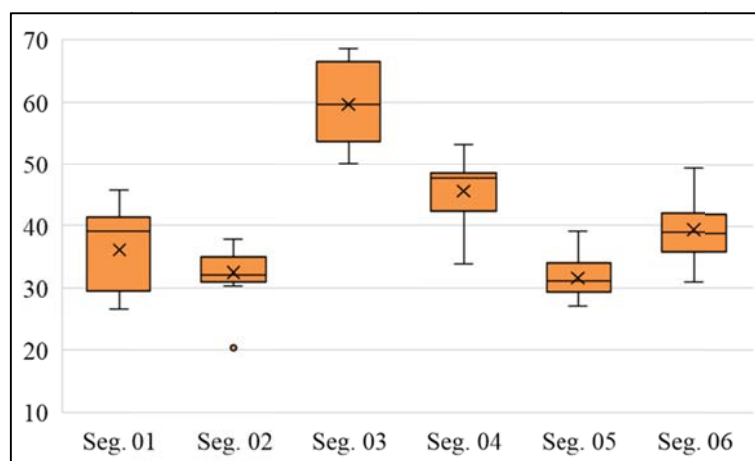
Tabela 6 - Estatística descritiva para os valores de deflexão - viga Benkelman

Segmento:	01	02	03	04	05	06
número de dados:	20	19	8	21	30	10
média (X):	39,8	34,8	43,2	30,1	23,5	30,5
desvio padrão (σ):	10,8	9,5	9,3	6,1	3,4	3,0
deflexão característica (DC):	50,6	44,3	52,5	36,2	26,9	33,5
deflexão mínima (D _{mín}):	24,8	20,8	27,8	19,7	18,1	24,3
deflexão máxima (D _{máx}):	61,3	54,7	56,4	39,4	32,1	34,2
coef. de variação (CV%):	27	27	22	20	14	10

Os valores de coeficiente de variação foram inferiores a 30% para todos os segmentos avaliados com a viga Benkelman e inferiores a 20% para todos os casos verificados com o FWD e o LWD. A norma IP-DE-P00/003 (DER-SP, 2006b) especifica valores de coeficientes de variação inferiores a 30% para determinar que uma amostra seja aceita como segmento homogêneo.

Foi identificado um ponto *outlier* para as medidas de deflexão com FWD no segmento 02, conforme pode ser visualizado nos diagramas de caixa da Figura 44. O *outlier* refere-se ao ponto de teste nº 35, com deflexão de $20,4 \times 10^{-2}$ mm, único valor abaixo de 30×10^{-2} mm. Este ponto foi retirado das análises realizadas na dissertação com os dados de FWD.

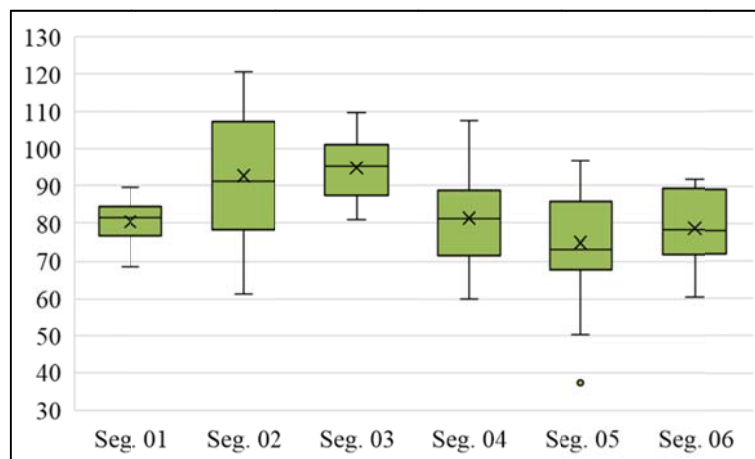
Figura 44 - Diagramas de caixa para as medidas de deflexão realizadas com o FWD



A partir da visualização da Figura 45, que apresenta os diagramas de caixa para as medidas de deflexão aferidas com o LWD, é identificado ponto *outlier* no segmento 05, muito abaixo da medida de 50×10^{-2} mm, sendo que todas as demais medidas são superiores a este

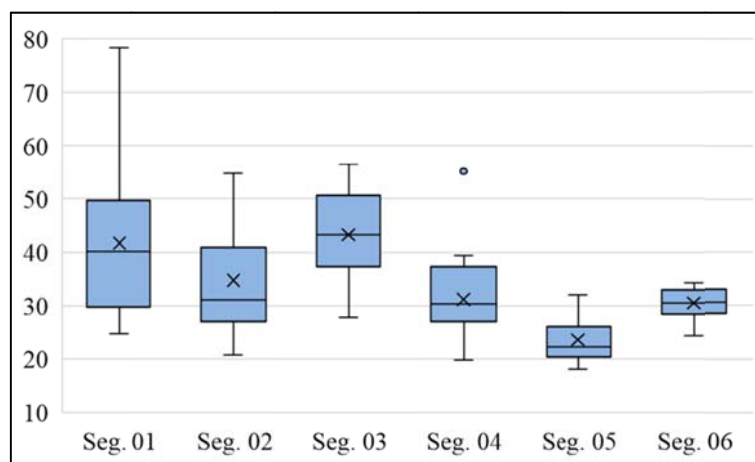
valor. O *outlier* corresponde ao ponto de teste nº 83, com deflexão de $37,2 \times 10^{-2}$ mm e foi excluído das verificações realizadas com os dados da pesquisa.

Figura 45 - Diagramas de caixa para as medidas de deflexão realizadas com o LWD



No que se refere às medidas de deflexão com a viga Benkelman, os diagramas de caixa apresentados na Figura 46 indicam um ponto muito distante da média amostral das deflexões no segmento 04. Em análise da tabela dos dados, é identificado o ponto de teste nº 67, com medida $55,2 \times 10^{-2}$ mm. Além deste ponto considerado *outlier* pelas análises estatísticas, optou-se por excluir o ponto nº 2, com valor de deflexão de $78,3 \times 10^{-2}$ mm, por estar muito distante da média e, em avaliação de campo, muito próximo de uma boca-de-lobo, podendo ter ocorrido alguma desestabilização das camadas de pavimentação entre as medidas de FWD e as medidas de viga Benkelman realizadas após a decorrência de 6 meses.

Figura 46 - Diagramas de caixa para as medidas de deflexão realizadas com VB



4.2.2 Estudo de Modelos de Regressão

Na continuidade das análises, buscou-se correlacionar entre si, aos pares, as medições de deflexões realizadas com equipamentos: FWD *versus* LWD; FWD *versus* viga Benkelman; LWD *versus* viga Benkelman. Em cada caso, foi determinado o coeficiente de correlação de Pearson (r) de modo a verificar se há correlação entre as variáveis.

Montgomery e Runger (2018) mencionam que correlações abaixo de $|0,5|$ são geralmente consideradas “fracas” e correlações acima de $|0,8|$ são geralmente consideradas “fortes”. Valores de coeficiente de Pearson (r) entre $|0,5|$ e $|0,8|$ podem indicar correlação “moderadamente forte” e uma possível relação linear entre as variáveis.

Na sequência, foram elaborados gráficos de dispersão, ajustadas equações de regressão e informados os coeficientes de determinação (R^2). Por fim, foi verificado se os resultados são estatisticamente significantes com um nível de confiança de 95%.

4.2.2.1 LWD *versus* FWD

A Tabela 7 apresenta os valores obtidos 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. Destaca-se a alternância entre correlação positiva e negativa, fato que traz incerteza sobre a tendência de comportamento entre as leituras dos dois equipamentos. Em complemento, não se verificou uma tendência de maior ou menor correlação em função do tipo de estrutura do segmento:

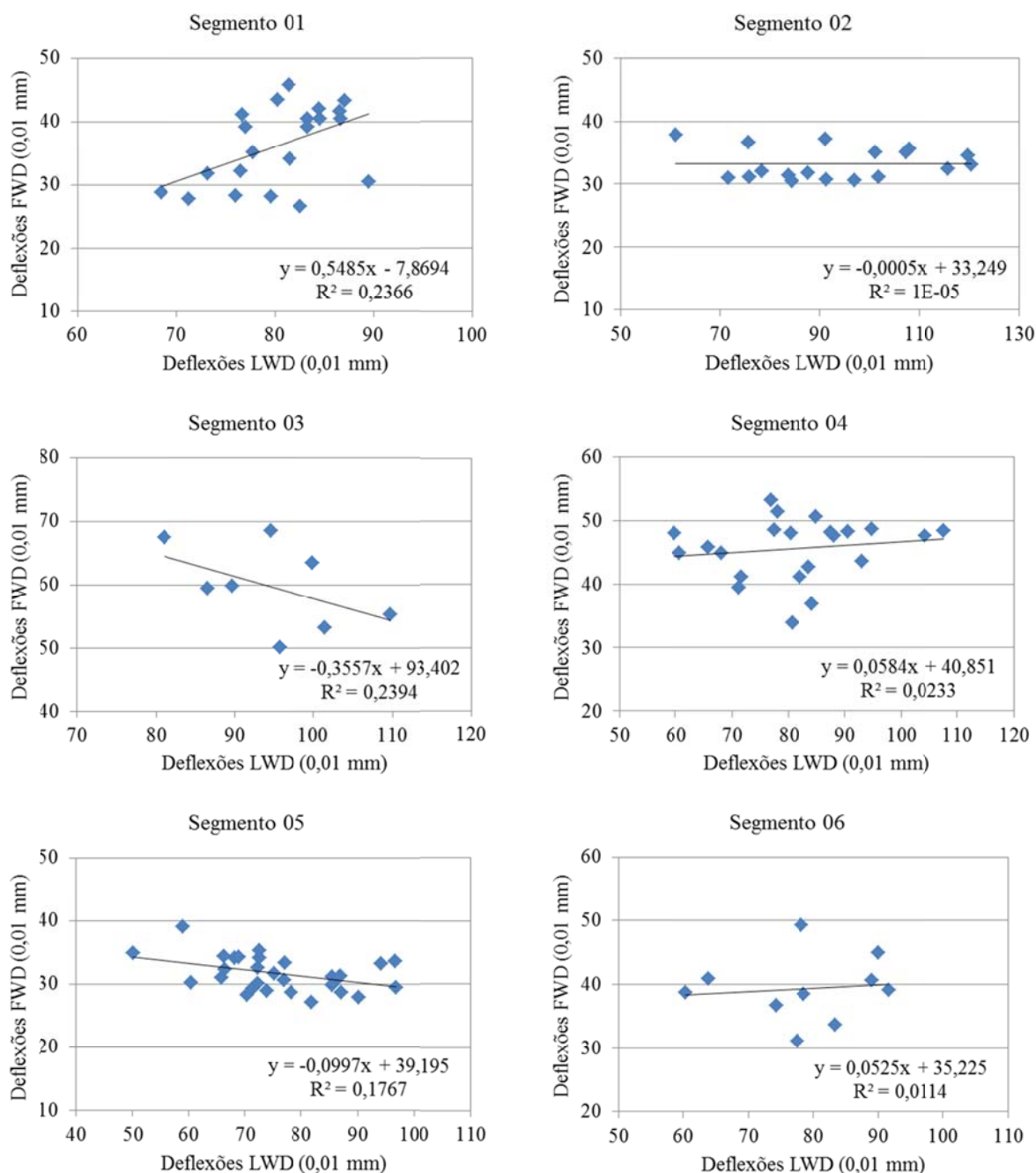
- reforço em pedra pulmão, segmentos 01 e 06: coeficiente (r) variou de 0,11 até 0,50;
- reforço em areia, segmentos 02, 03, 04 e 05: coeficiente (r) variou de -0,50 até 0,15.

Tabela 7 - Valores de correlação de Pearson entre LWD e FWD

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	0,50	moderada positiva	04	0,15	fraca positiva
02	0,00	nula	05	-0,42	fraca negativa
03	-0,50	moderada negativa	06	0,11	fraca positiva

A Figura 47 apresenta os gráficos de dispersão entre as deflexões com o LWD e o FWD, onde pode ser identificado o comportamento anômalo das deflexões nos segmentos através das inclinações variadas das linhas de tendência. São expostas as equações de regressão nos gráficos, entretanto, são verificados valores baixos para os coeficientes de determinação (R^2), sendo o valor de $R^2 = 0,2394$ o maior entre todos.

Figura 47 - Gráficos de regressão entre medidas de deflexão com LWD e FWD



De todos os modelos de regressão linear identificados, através de análise estatística e conforme apresentado na Tabela 8, apenas para os segmentos 01 e 05 foram verificados modelos significantes. Essa constatação ocorre a partir da verificação de valores de $F_{\text{calculado}}$ superiores ao F_{tabelado} e também em função de resultados de F de significância inferiores a $\alpha = 0,05$, havendo a rejeição da hipótese nula e a consequente aceitação da hipótese de relação linear entre as variáveis x e y , segundo explicado no capítulo de Metodologia. No entanto, fisicamente não é possível aceitar o modelo de regressão para o segmento 05, pois se

identifica uma linha de tendência negativa e o consequente decréscimo das deflexões com o FWD quando ocorre o aumento das deflexões com o LWD, logo não há consistência entre os resultados obtidos.

Tabela 8 - Análise de significância - regressão entre LWD e FWD

Seg.	n	F _{calculado}	F _{tabelado}	F significância	Resultado	Modelo
01	21	5,888842	$F_{0,05,1,19} = 4,38$	0,025355	significante	$y = 0,5485x - 7,8694$ $R^2 = 0,2366$
02	18	0,000228	$F_{0,05,1,16} = 4,49$	0,988132	não significante	-
03	8	1,889015	$F_{0,05,1,6} = 5,99$	0,218439	não significante	-
04	22	0,477364	$F_{0,05,1,20} = 4,35$	0,497560	não significante	-
05	29	5,793273	$F_{0,05,1,27} = 4,21$	0,023196	significante	incoerência quanto à inclinação da reta
06	10	0,092082	$F_{0,05,1,8} = 5,32$	0,769288	não significante	-

4.2.2.2 Viga Benkelman *versus* FWD

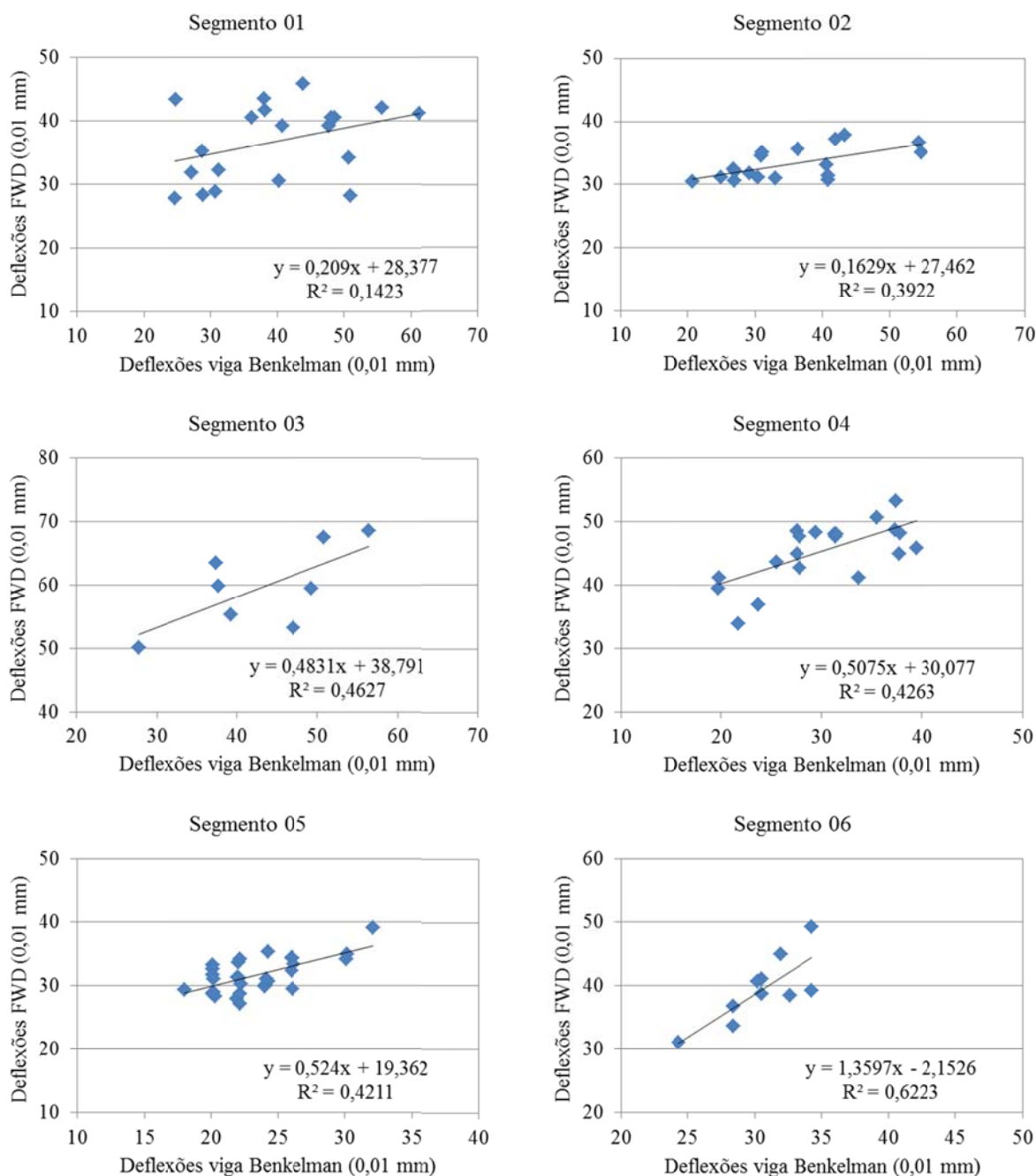
A análise estatística entre os valores de deflexão obteve os melhores resultados na comparação entre dados obtidos com a viga Benkelman e com o FWD. De acordo com a Tabela 9, todos os coeficientes de correlação de Pearson (r) estiveram compreendidos entre 0,5 e 0,8, representando moderada correlação entre os valores, excetuando-se o segmento 01, em que o coeficiente indicou fraca correlação.

Tabela 9 - Valores de correlação de Pearson entre viga Benkelman e FWD

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	0,38	fraca positiva	04	0,65	moderada positiva
02	0,63	moderada positiva	05	0,65	moderada positiva
03	0,68	moderada positiva	06	0,79	forte positiva

Conforme se verifica a partir dos gráficos da Figura 48, todas as linhas de tendência apresentaram inclinação positiva, significando o aumento de deflexões com o FWD a partir do aumento das deflexões com a viga Benkelman. Os coeficientes de determinação (R^2) estiveram compreendidos entre 0,3922 e 0,4627 para os segmentos 02, 03, 04 e 05. O melhor coeficiente foi obtido para o segmento 06, sendo $R^2 = 0,6223$. A situação mais desfavorável ocorreu no segmento 01, onde o coeficiente de determinação resultou em 0,1423.

Figura 48 - Gráficos de regressão entre medidas de deflexão com VB e FWD



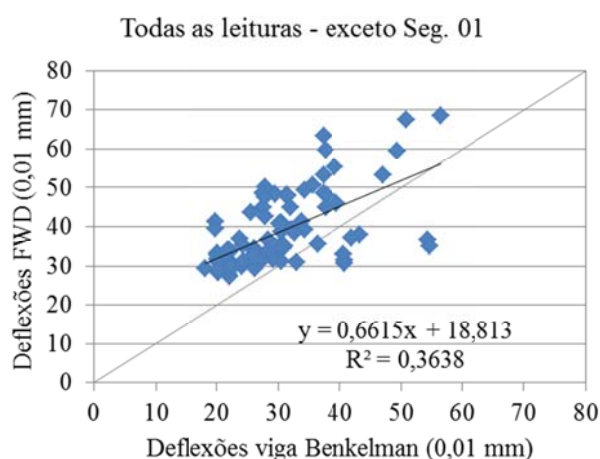
A análise apresentada na Tabela 10 indica que foi verificada significância para os modelos de regressão lineares construídos para os segmentos 02, 04, 05 e 06, sendo observados valores de F de significância muito inferiores a $\alpha = 0,05$ para os segmentos mencionados. O segmento 01, para o qual havia sido identificada fraca correlação, não obteve modelo significativo. Para o segmento 03, em que a correlação foi moderada, também não se verificou significância, muito provavelmente devido ao número de observações reduzidas neste segmento.

Tabela 10 - Análise de significância - regressão entre viga Benkelman e FWD

Seg.	n	F _{calculado}	F _{tabelado}	F significância	Resultado	Modelo
01	20	2,985795	$F_{0,05,1,18} = 4,41$	0,101115	não significativa	-
02	18	10,32595	$F_{0,05,1,16} = 4,49$	0,005423	significante	$y = 0,1629x + 27,462$ $R^2 = 0,3922$
03	8	5,167507	$F_{0,05,1,6} = 5,99$	0,063387	não significativa	-
04	21	14,12049	$F_{0,05,1,19} = 4,38$	0,001332	significante	$y = 0,5075x + 30,077$ $R^2 = 0,4263$
05	30	20,36624	$F_{0,05,1,28} = 4,20$	0,000105	significante	$y = 0,524x + 19,362$ $R^2 = 0,4211$
06	10	13,17827	$F_{0,05,1,8} = 5,32$	0,006683	significante	$y = 1,3597x - 2,1526$ $R^2 = 0,6223$

No intuito de sintetizar as análises, foi desenvolvido um único modelo, com todos os dados de deflexões, excetuando-se o segmento 01, para o qual se obteve fraca correlação entre os dados de viga e FWD. O resultado gráfico está indicado na Figura 49. O coeficiente de Pearson calculado foi $r = 0,60$, indicando uma moderada correlação entre as variáveis.

Figura 49 - Gráfico de regressão entre as medidas de deflexão de todos os segmentos, exceto o segmento 01, com viga Benkelman e FWD



Ainda que coeficiente R^2 tenha resultado em 0,3638, a análise estatística indicou o valor de F de significância igual a $6 \cdot 10^{-10}$, muito inferior a 0,05, havendo a validação dos modelos expressos nas Equações 29 e 30, com a ressalva de se empregar os valores para a variável x compreendidos nos intervalos sequencialmente indicados.

$$D_{\text{FWD}} = 0,6615 D_{\text{VB}} + 18,813, \text{ com } R^2 = 0,3638 \quad (29)$$

$$D_{\text{VB}} = 1,5117 D_{\text{FWD}} - 28,440, \text{ com } R^2 = 0,3638 \quad (30)$$

Montgomery e Runger (2018) explicam que um modelo de regressão pode ser usado para prever novas ou futuras observações para uma variável y , a partir de valores para a variável independente x . No entanto, relações de regressão são válidas para valores de x situados dentro da faixa dos dados originais. Uma extrapolação modesta pode ser perfeitamente aceita em muitos casos, porém uma grande extrapolação quase sempre não produzirá resultados aceitáveis. Para a Equação 29, os valores para a variável x (deflexão com a viga Benkelman) variaram, de modo geral, entre 20 e 60 (0,01 mm), sendo este considerado um intervalo aceitável para o emprego dos modelos desenvolvidos. Para a Equação 30, os valores para a variável x (deflexão com o FWD) devem estar compreendidos no intervalo entre 30 e 60 (0,01 mm).

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006b), as correlações entre deflexões obtidas por viga Benkelman e FWD são dependentes de diversos fatores, logo não existem correlações de aplicação generalizada. Os projetistas, ao utilizar a viga Benkelman ou o FWD, devem estabelecer suas próprias correlações com base em pesquisas locais. Neste contexto, as equações desenvolvidas na dissertação não devem ser aplicadas de modo geral, sendo seu emprego sugerido apenas para situações em que não se disponha de correlações específicas e quando o pavimento em estudo apresentar características similares ao pavimento da Estrada Rio do Morro.

4.2.2.3 Viga Benkelman *versus* LWD

Segundo as informações da Tabela 11, os coeficientes de Pearson (r) indicaram correlações fracas ou nulas entre os dados de deflexões com a viga Benkelman e o LWD, sendo que os valores do coeficiente r variaram entre -0,36 e 0,34. Com relação ao tipo de reforço do subleito para cada segmento, obteve-se:

- reforço em pedra pulmão, segmentos 01 e 06: coeficiente (r) variou de 0,23 até 0,34;
- reforço em areia, segmentos 02, 03, 04 e 05: coeficiente (r) variou de -0,36 até -0,05.

Mesmo que tenha sido verificada correlação fraca para os segmentos com reforço em pedra pulmão, destaca-se que para os dois segmentos foram verificadas correlações positivas entre as variáveis x e y . O mesmo comportamento não foi obtido para os segmentos com reforço em areia, onde ocorreu uma tendência de correlações negativas, para as quais se explicou anteriormente a falta de coerência neste comportamento.

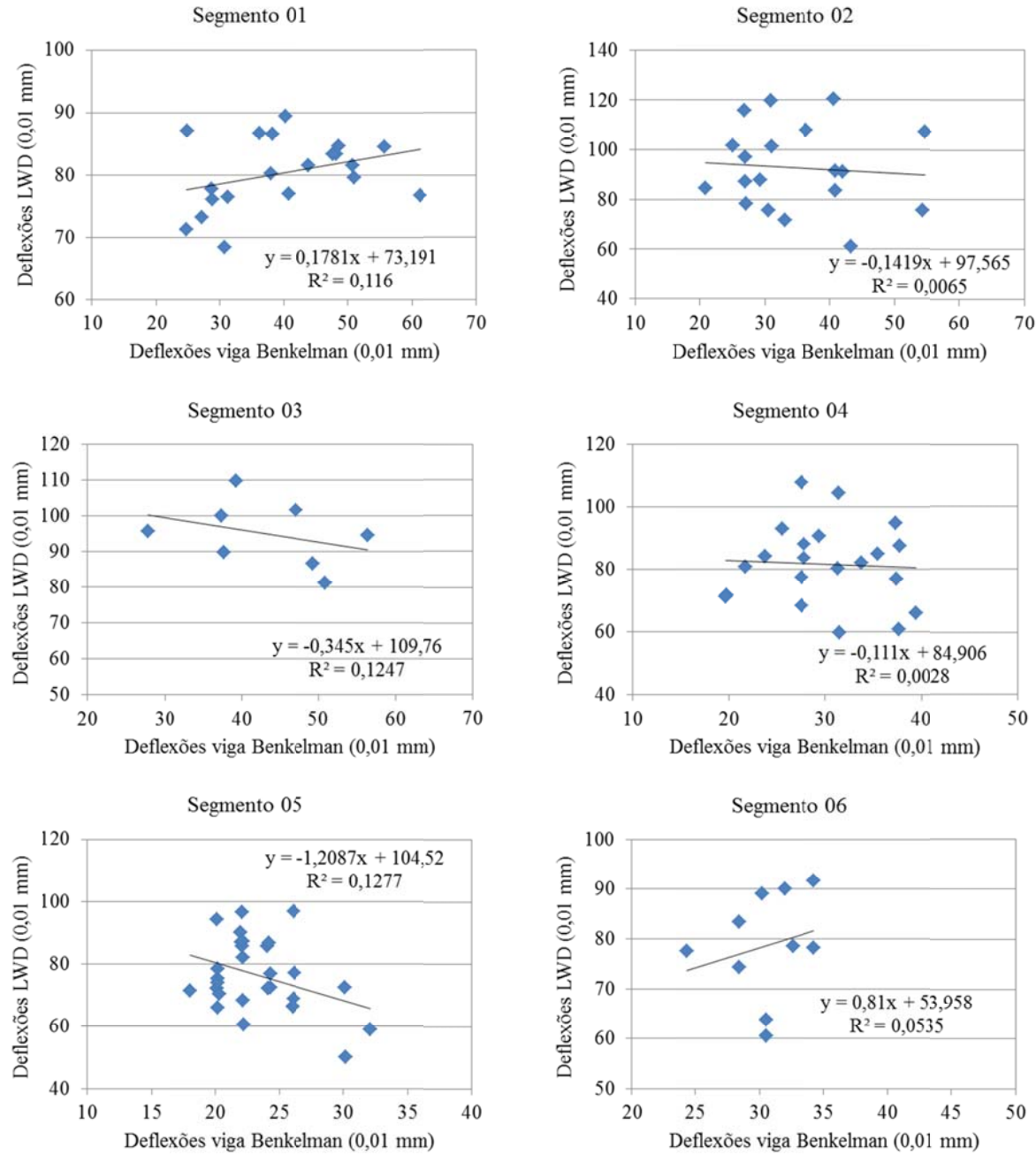
Através da Figura 50 é identificado o comportamento anômalo das retas de tendência, alternando-se entre positivas (segmentos com reforço em pedra pulmão) e negativas (reforço

em areia). Também são ressaltados os baixos valores encontrados para os coeficientes de determinação (R^2), sendo 0,1277 o maior valor identificado.

Tabela 11 - Valores de correlação de Pearson entre viga Benkelman e LWD

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	0,34	fraca positiva	04	-0,05	nula
02	-0,08	nula	05	-0,36	fraca negativa
03	-0,35	fraca negativa	06	0,23	fraca positiva

Figura 50 - Gráficos de correlação entre medidas de deflexão com VB e LWD



A avaliação de significância para os modelos obtidos não apresentou resultado satisfatório para todos os segmentos avaliados, pois $F_{\text{calculado}}$ foi sempre inferior ao F_{tabelado} e os valores F de significância foram todos superiores a $\alpha = 0,05$. Os resultados mencionados estão indicados na Tabela 12.

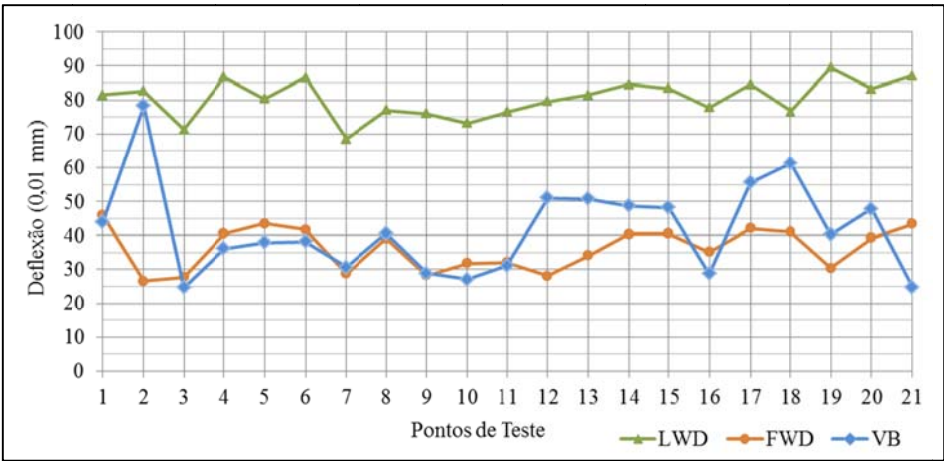
Tabela 12 - Análise de significância - regressão entre viga Benkelman e LWD

Seg.	n	$F_{\text{calculado}}$	F_{tabelado}	F significância	Resultado	Modelo
01	20	2,361892	$F_{0,05,1,18} = 4,41$	0,141724	não significativa	-
02	19	0,110444	$F_{0,05,1,17} = 4,45$	0,743702	não significativa	-
03	8	0,854835	$F_{0,05,1,6} = 5,99$	0,390857	não significativa	-
04	21	0,052929	$F_{0,05,1,19} = 4,38$	0,820501	não significativa	-
05	29	3,953992	$F_{0,05,1,27} = 4,21$	0,056984	não significativa	-
06	10	0,452318	$F_{0,05,1,8} = 5,32$	0,520185	não significativa	-

4.2.3 Gráficos Comparativos

A Figura 51 ilustra o comparativo realizado entre valores de deflexão para o segmento 01. É verificada uniformidade no comportamento das leituras realizadas com os equipamentos FWD e LWD, traduzida pelo próprio coeficiente de Pearson, que indicou uma correlação moderada positiva entre os dados ($r = 0,50$) e também através do modelo de regressão entre os valores de deflexão, o qual foi considerado significativo. Entretanto, a mesma uniformidade não foi verificada para os valores de viga Benkelman. Conforme mencionado anteriormente, o ponto de teste nº 2 foi excluído das análises, pois está localizado próximo a uma boca-de-lobo e presume-se que houve alguma interferência de umidade neste ponto no período de 6 meses decorrente entre os ensaios com os distintos equipamentos.

Figura 51 - Comparativo entre medidas com LWD, FWD e viga Benkelman - Seg. 01



As Figuras 52 a 56 indicam a relação das medidas de deflexão entre FWD, LWD e viga Benkelman para os demais segmentos. Quando se comparam as linhas das leituras com o LWD e o FWD, é verificada variabilidade entre o comportamento das leituras, ora próximas, ora com maior defasagem. Ao comparar as linhas do FWD com a viga Benkelman é identificada uma maior uniformidade no comportamento das leituras.

Para os segmentos 01 e 02, houve maior proximidade entre as leituras de FWD e viga Benkelman. Entretanto, para os demais segmentos, os valores obtidos com a viga Benkelman foram inferiores aos valores aferidos com o FWD.

A Figura 52 refere-se ao segmento 02 no qual foi verificada: correlação nula entre deflexões com o LWD e o FWD; e correlação moderada positiva entre a viga Benkelman e o FWD ($r = 0,63$). Neste último caso foi obtido modelo de regressão significativo.

A Figura 53 traz o comportamento das leituras de deflexão para o segmento 03. Na comparação entre LWD e FWD obteve-se coeficiente de correlação $r = -0,50$ e, comparando-se viga Benkelman com FWD, $r = 0,68$. Nenhuma das equações de regressão foi significativa.

Figura 52 - Comparativo entre medidas com LWD, FWD e viga Benkelman - Seg. 02

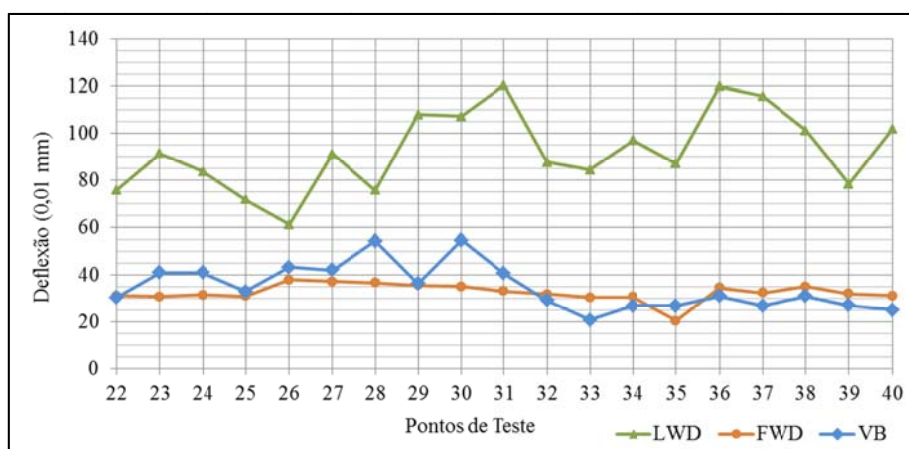
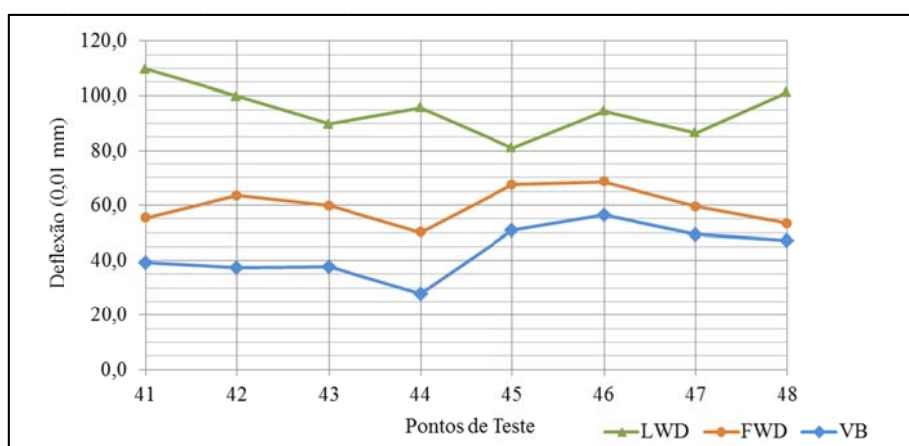


Figura 53 - Comparativo entre medidas com LWD, FWD e viga Benkelman - Seg. 03



A inspeção das Figuras 54 e 55, referente aos segmentos 04 e 05, mostra a maior diferença dos valores de deflexões com o LWD em comparação ao FWD e viga Benkelman. A correlação entre LWD e os demais equipamentos foi fraca ($r = -0,42$ até $r = 0,15$) e não houve significância para os modelos de regressão elaborados. Houve correlação moderada positiva ($r = 0,65$) em ambos os segmentos na comparação entre as deflexões com o FWD e a viga Benkelman, gerando modelos de regressão significativos.

Figura 54 - Comparativo entre medidas com LWD, FWD e viga Benkelman - Seg. 04

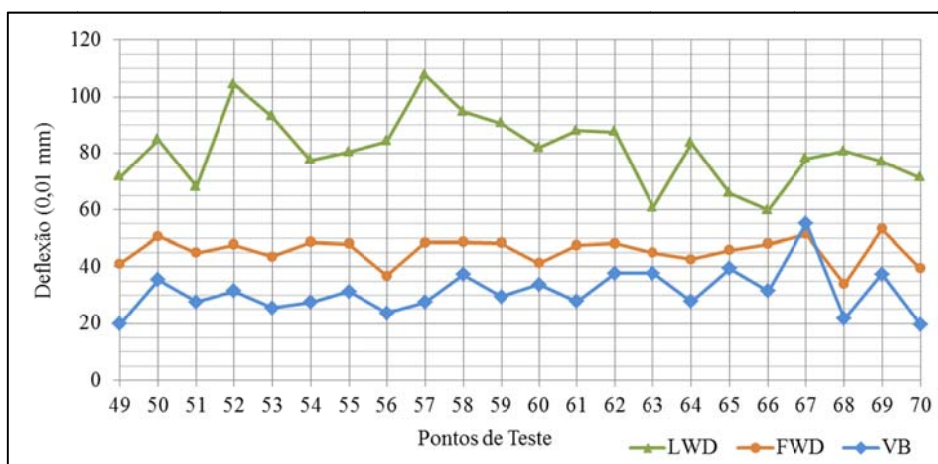
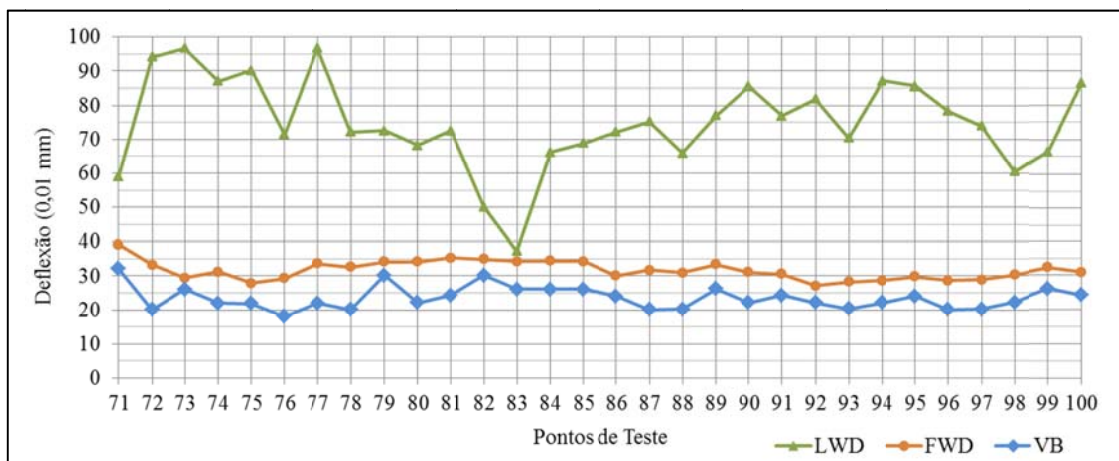


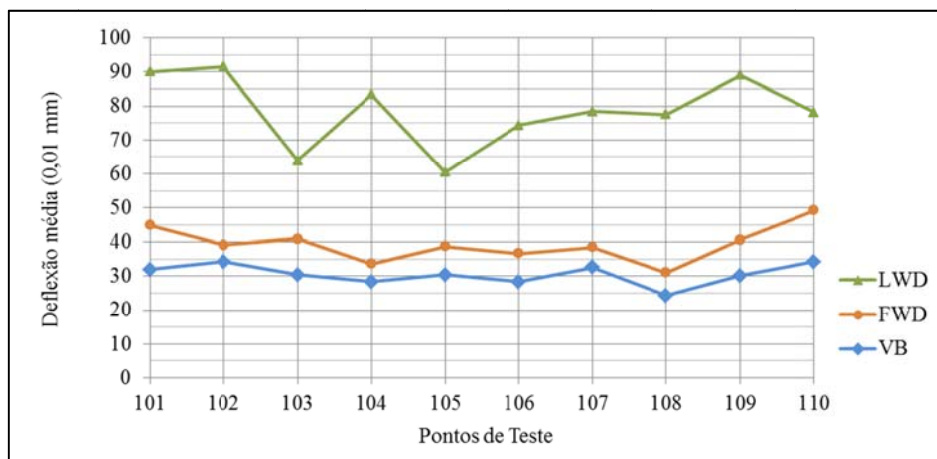
Figura 55 - Comparativo entre medidas com LWD, FWD e viga Benkelman - Seg. 05



A Figura 56 ilustra as deflexões para o segmento 06, onde a exemplo do segmento 01, foi verificada menor diferença das leituras com o LWD em relação aos demais equipamentos. No entanto, as correlações foram fracas positivas entre LWD e FWD ($r = 0,11$) e entre LWD e viga Benkelman ($r = 0,23$), não se obtendo regressões significantes. Entre FWD e viga Benkelman foi obtida a melhor correlação desta dissertação ($r = 0,79$), a qual foi classificada

como forte positiva, gerando modelo de regressão significativo entre as variáveis com R^2 igual a 0,6223.

Figura 56 - Comparativo entre medidas com LWD, FWD e viga Benkelman - Seg. 06



4.2.4 Parâmetros da Bacia de Deflexão

Para cada segmento e mediante as deflexões medidas com o FWD, foram calculados os seguintes parâmetros indicadores da condição estrutural dos pavimentos: raio de curvatura (R), SCI, BDI e BCI. Os valores médios calculados estão dispostos na Figura 57 e se verifica, de modo geral, que os segmentos 01, 02 e 05 apresentaram os melhores resultados (em virtude das menores deflexões medidas) em comparação aos segmentos 03, 04 e 06 (os quais se encontram em fase de consolidação das deflexões). Ainda assim, os resultados são considerados satisfatórios em relação às referências identificadas na bibliografia.

Quanto ao raio de curvatura, todos os segmentos apresentaram resultado superior a 100 metros, destacando-se os segmentos 01, 02 e 05 com valores na ordem de 260 metros. Segundo DNIT (2006b) e Horak (2008), valores superiores a 100 metros são indicativos de uma boa qualidade estrutural do pavimento.

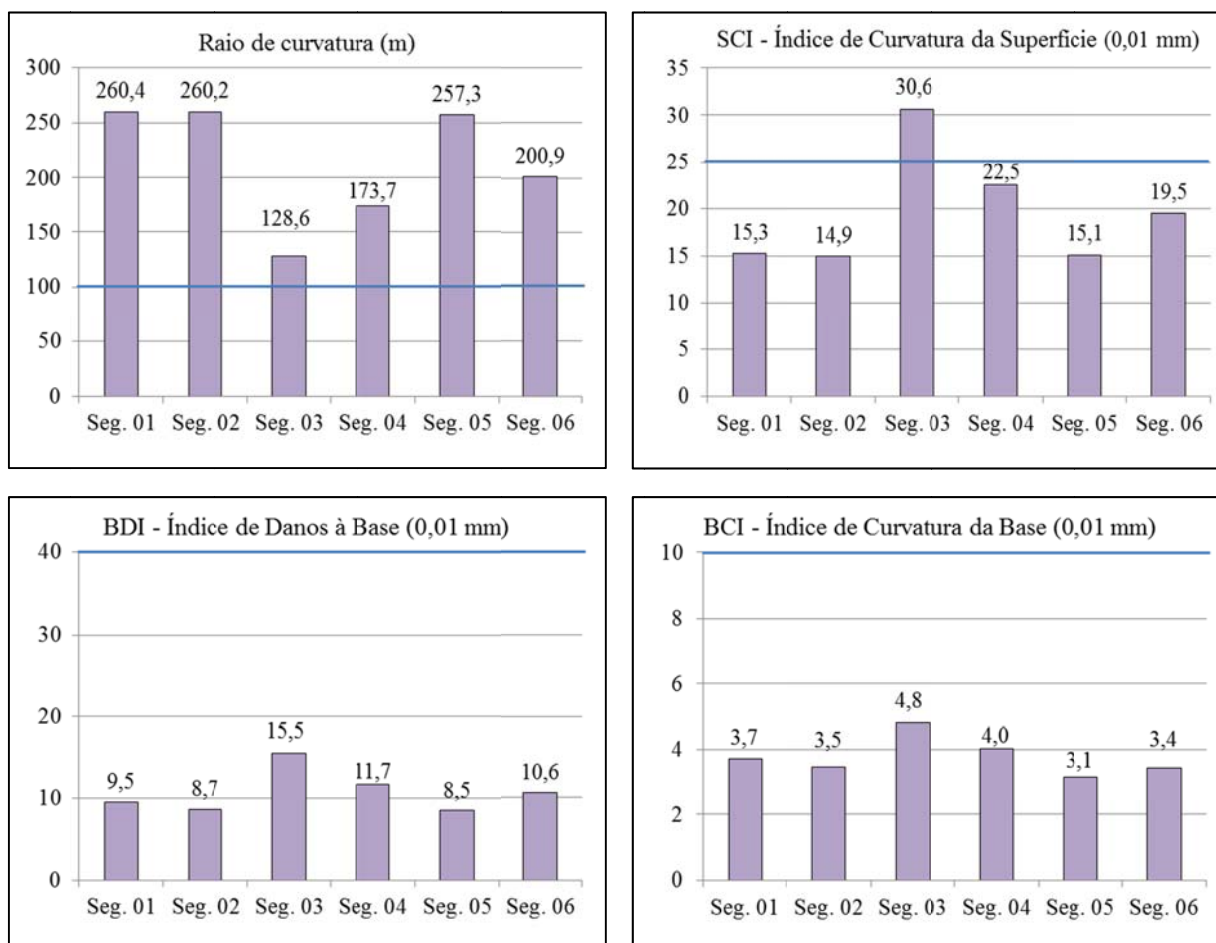
Andrade, Vasconcelos e Bernucci (2016), Souza Júnior (2018) e Rocha (2020) citam valores limite identificados na bibliografia para os parâmetros SCI, BDI e BCI, sendo 25, 40 e 10 (0,01 mm), respectivamente. Estes valores estão destacados em linha azul nos gráficos comparativos entre os valores identificados para cada segmento.

No que se refere ao Índice de Curvatura da Superfície (SCI), os valores calculados para os segmentos foram inferiores a 25 (0,01 mm), com exceção para o segmento 03, em que se identificou um valor médio de 30,6 (0,01 mm). Valores superiores ao limite estabelecido indicam que a camada de revestimento asfáltico é pouco resistente ou de pequena espessura,

pois é muito deformável. Ressalta-se aqui que o segmento 03 está em fase de consolidação adicional das deflexões em razão do tráfego, logo o resultado obtido não é considerado adverso, visto que o índice tende a melhorar quando de uma nova avaliação deflectométrica no segmento.

Quanto ao Índice de Danos à Base (BDI) e Índice de Curvatura da Base (BCI), todos os resultados foram satisfatórios, conforme é possível visualizar graficamente. Destaca-se que os parâmetros apresentados por Horak (2008) são mais conservadores, limitando pavimentos excelentes para um BDI de 10 (0,01mm) e BCI de 5 (0,01 mm). Ainda assim a maioria dos segmentos apresenta valores em concordância com o limite estabelecido pelo autor ou próximos.

Figura 57 - Comparativo entre parâmetros da bacia de deflexão



4.3 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS VALORES DE MÓDULO

4.3.1 Considerações Gerais

Esta etapa teve início com o cálculo da retroanálise através do *software* BackMeDiNa, utilizando os dados das bacias deflectométricas obtidas com o FWD e a viga Benkelman e de modo a ser obter os módulos de elasticidade equivalentes para as camadas do pavimento.

O resumo estatístico para os módulos calculados conta com a prévia exclusão dos dados considerados *outlier* no item 4.2 para as medidas de deflexão com o FWD e viga Benkelman: pontos de teste nº 2, 35 e 67. Em complemento, após a interpretação dos diagramas de caixa expostos na sequência desta dissertação, referentes aos valores de módulo, constatou-se a necessidade da retirada de pontos adicionais, sendo: nº 16, 22, 33, 68, 71, 78, 79, 82, 92, 93, 108 e 110. Desta maneira, as análises subsequentes foram realizadas com os valores de módulos de elasticidade equivalentes calculados para os 95 pontos de teste remanescentes da pesquisa, a qual contava com um total de 110 pontos.

As Figuras 58 e 59 apresentam o diagrama para os valores de módulo de elasticidade equivalente calculados nas diversas camadas do pavimento, referentes ao FWD e a viga Benkelman, respectivamente, e com relação ao segmento 02. Para os demais segmentos foram identificados comportamentos similares e os gráficos complementares para cada segmento e tipo de equipamento estão dispostos no APÊNDICE I. 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 do ponto de teste nº 35 da Figura 58, o qual apresentou melhor resultado. Contrariamente, conforme exemplo dos pontos nº 22 a 31 da Figura 59, as deflexões mais elevadas foram responsáveis por valores de módulo inferiores. Comportamentos semelhantes foram comentados pelos pesquisadores Bueno (2016), Machado (2019) e Vieira (2020).

Figura 58 - Módulos de elasticidade equivalentes para o Seg. 02 a partir dos dados FWD

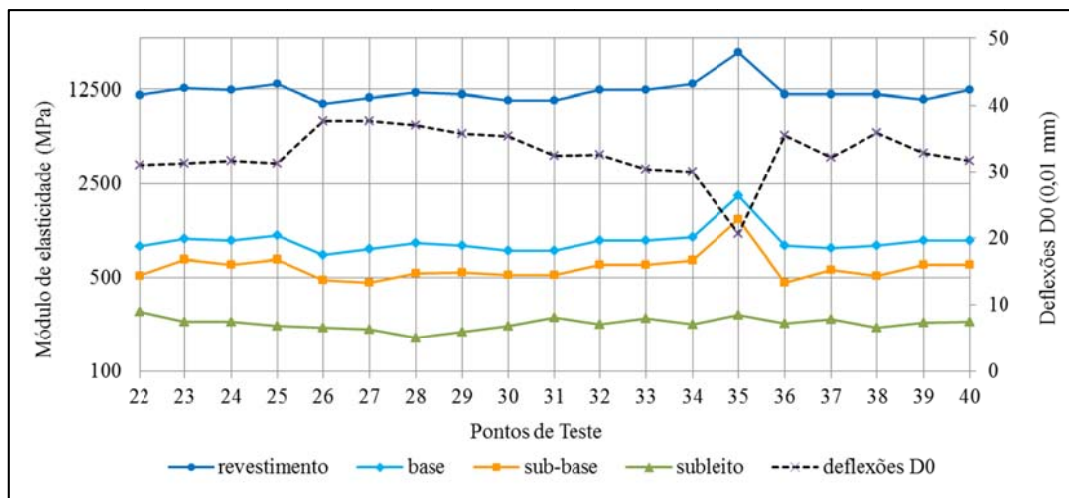
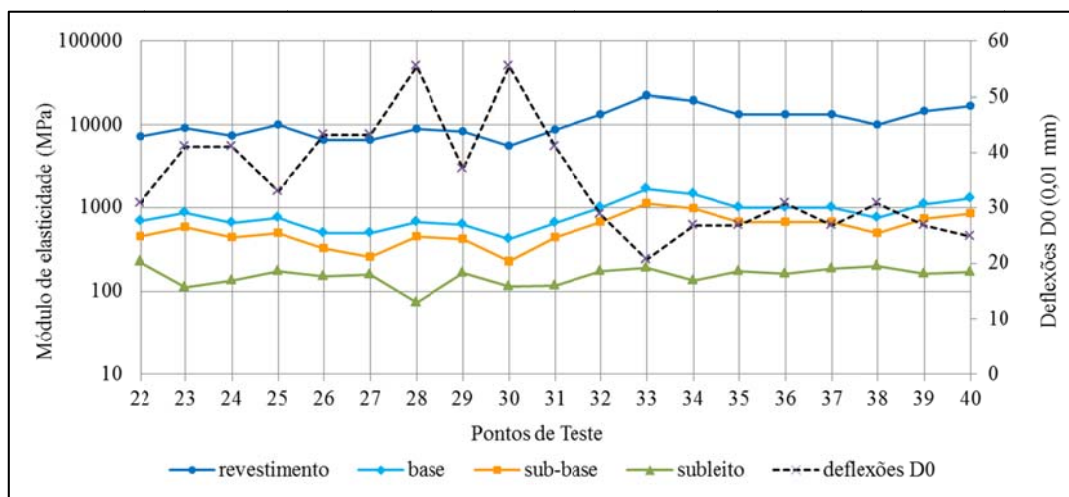
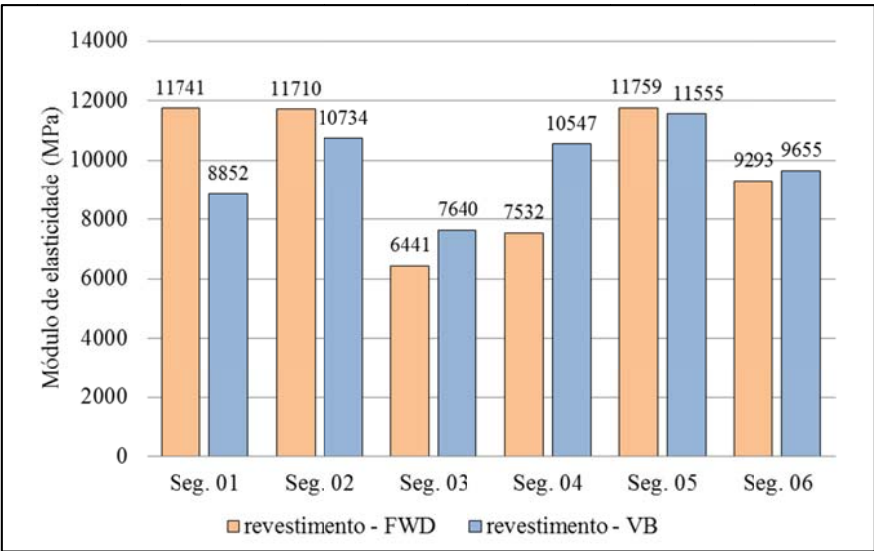


Figura 59 - Módulos de elasticidade equivalentes para o Seg. 02 a partir dos dados de VB



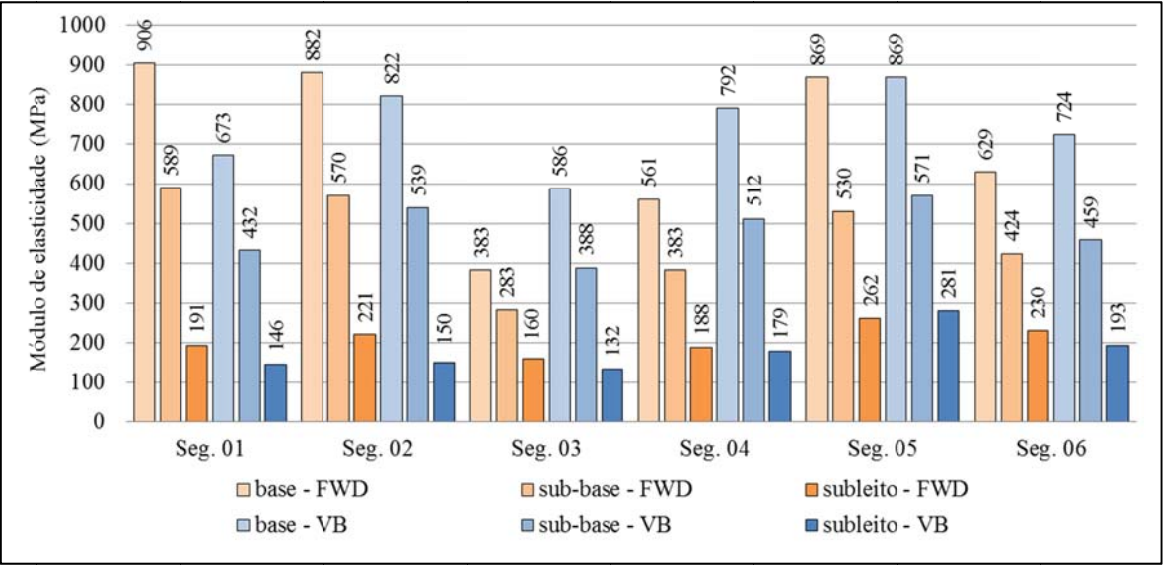
A partir da avaliação da Figura 60, é verificada certa proximidade entre os valores médios de módulo calculados para a camada de revestimento asfáltico, sobretudo para o segmento 05, em que se verificou maior a uniformidade entre as leituras de deflexão. Ao considerar os resultados obtidos com o FWD, são identificados valores superiores de módulo para os segmentos 01, 02 e 05, os quais foram pavimentados há mais de 5 anos. Ao contrário, valores inferiores foram obtidos para os segmentos 03, 04 e 06, pavimentados recentemente. Muito embora a pavimentação tenha sido realizada em épocas distintas e por empresas diferentes, ambas seguiram a especificação para mistura asfáltica com faixa granulométrica tipo C, mais recentemente assemelhada com a faixa VI do DEINFRA-SC (2016).

Figura 60 - Comparativo entre valores médios de módulo para o revestimento asfáltico



A Figura 61 ilustra o comparativo entre os módulos de elasticidade calculados para as camadas de base, sub-base e subleito. De modo similar ao gráfico anterior, para o segmento 05 é verificada a maior proximidade entre os valores calculados a partir das bacias geradas com o FWD e a viga Benkelman. Segundo o FWD, novamente foram obtidos valores superiores de módulo para base e sub-base nos segmentos 01, 02 e 05 (com pavimentação de 5 anos) e valores inferiores para os segmentos 03, 04 e 06 (asfaltamento recente). Quando são avaliados os módulos de subleito, destaca-se a média calculada para o segmento 06 em que, apesar da pavimentação recente, temos o material de reforço do subleito em pedra pulmão, o qual contribuiu para conferir uma maior rigidez e maiores valores de módulo ao subleito.

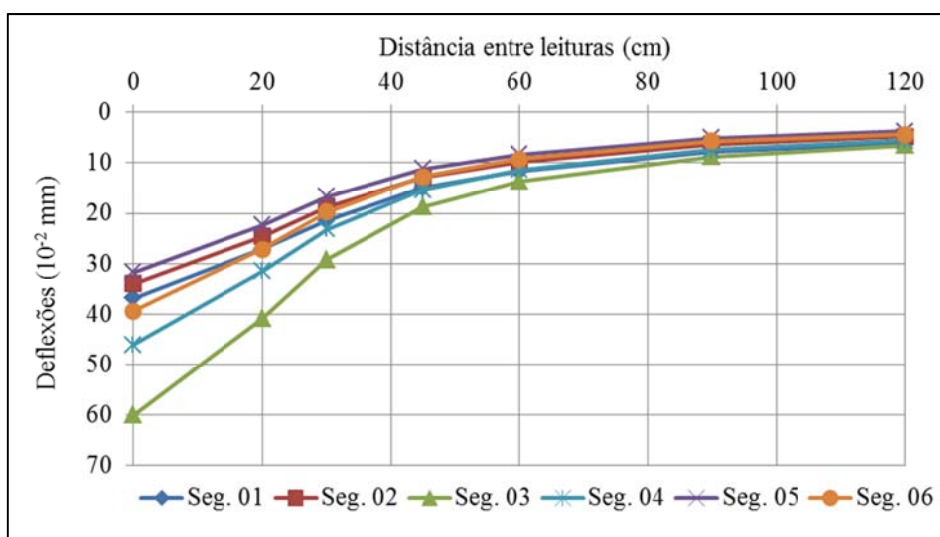
Figura 61 - Comparativo entre valores médios de módulo para as camadas granulares



De modo complementar, são apresentados os gráficos dos valores médios encontrados para as bacias de deflexão em cada segmento e para cada equipamento.

A Figura 62 indica que as deflexões D_0 segundo o FWD foram inferiores para os segmentos 05, 02 e 01 e superiores para os segmentos 06, 04 e 03. Ao se avaliar a forma das bacias, houve uma tendência similar, com destaque para o segmento 06 que, apesar de contar com a quarta maior deflexão D_0 , apresentou valores D_{45} , D_{60} , D_{90} e D_{120} apenas inferiores ao segmento 05, conforme mencionado anteriormente, devido ao reforço do subleito em pedra pulmão o qual conferiu menores deflexões ao longo da bacia deflectométrica.

Figura 62 - Valores médios para as bacias de deflexão - FWD

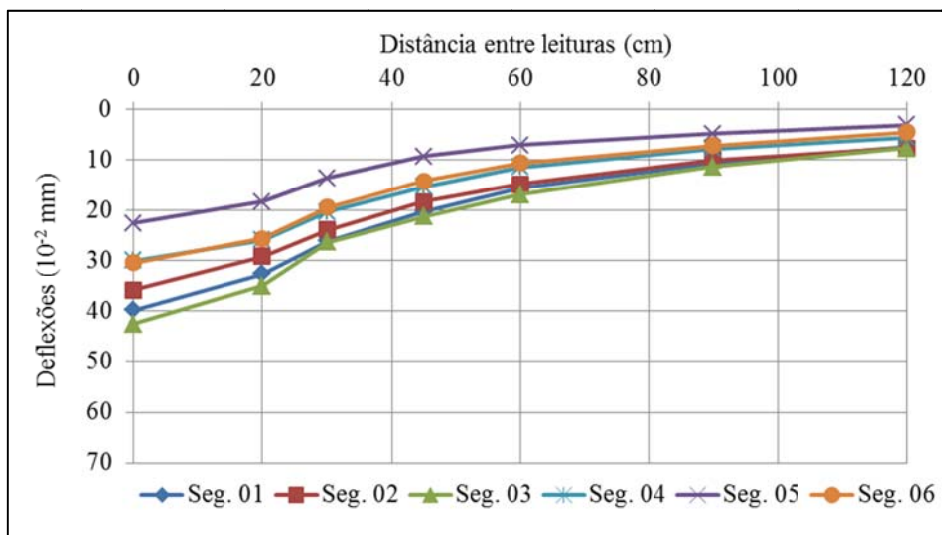


A Figura 63 apresenta as bacias deflectométricas geradas com a viga Benkelman, onde se observa similaridade com a Figura 62 no que se refere à identificação do segmento 05 com as menores deflexões e o segmento 03 com as maiores. Com relação às linhas intermediárias, também merece destaque o segmento 06 com baixas deflexões ao longo da linha de influência, atrás somente do segmento 05.

A inspeção das duas figuras também nos leva a identificar que, apesar de terem sido obtidos os menores valores de desvio padrão para as deflexões com o FWD, este equipamento obteve maior sensibilidade para apurar as distintas deflexões entre os segmentos, pois suas deflexões apresentaram maior amplitude em comparação com as leituras realizadas a partir da viga Benkelman. Como exemplo, a amplitude das médias de D_0 foi de 28 (0,01 mm) para o equipamento FWD e 20 (0,01 mm) para as deflexões em D_0 obtidas com a viga Benkelman. Esta tendência também foi verificada para os valores de módulo retroanalisados, analisados sequencialmente, onde são identificados valores inferiores de desvio padrão e maior

amplitude entre as médias dos segmentos quando são efetuados os cálculos através do equipamento FWD.

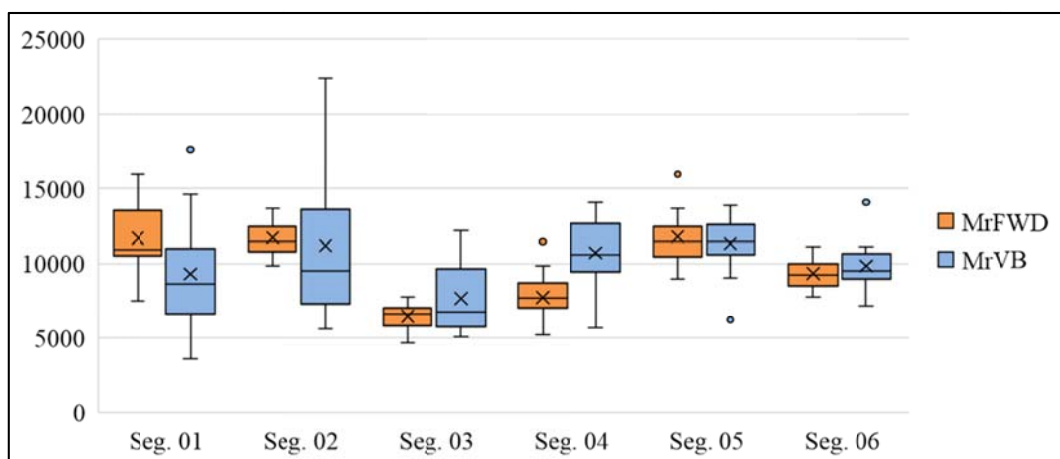
Figura 63 - Valores médios para as bacias de deflexão - viga Benkelman



4.3.2 Módulos Retroanalísados para a Camada de Revestimento Asfáltico

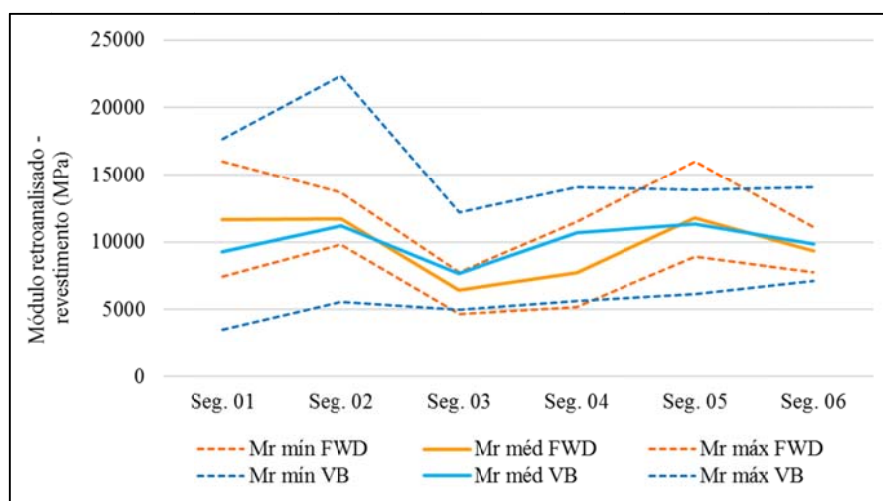
No que se refere ao módulo retroanalísado para a camada de revestimento, a Figura 64 traz um comparativo através de diagramas de caixa entre os valores obtidos com os dados de FWD e viga Benkelman. Nota-se que as caixas correspondentes ao FWD são mais estreitas, indicando uma menor variabilidade entre os valores calculados a partir dos dados medidos com este equipamento. Foram verificados pontos de exceção nos segmentos 01, 04, 05 e 06, os quais correspondem os pontos de teste nº 16, 68, 79, 92 e 108.

Figura 64 - Diagramas de caixa para os valores de módulo retroanalísados a partir das deflexões medidas com FWD e viga Benkelman e para a camada de revestimento



Em complemento, o gráfico da Figura 65 indica os valores de módulo mínimos, médios e máximos, calculados segundo os dois equipamentos, excluindo-se os pontos nº 2, 35 e 67, sendo verificada maior proximidade entre as linhas do FWD (cor laranja) em comparação com as linhas da viga Benkelman (cor azul), havendo para este último equipamento a maior variação entre os valores. Ao se observar a linha média obtida para o FWD e para a viga Benkelman, percebeu-se maior amplitude entre os valores calculados a partir do FWD, o que indica a maior sensibilidade deste equipamento em comparação à viga Benkelman ao diferir as características dos materiais de cada segmento.

Figura 65 - Valores mínimos, médios e máximos para o módulo do revestimento



As análises estatísticas subsequentes foram realizadas a partir da retirada de todos os pontos de exceção mencionados no item 4.3.1. As Tabelas 13 e 14 apresentam o resumo estatístico para os valores de módulo da camada de revestimento retroanalizados em função das deflexões com FWD e viga Benkelman, respectivamente, destacando-se as observações:

- as médias variaram entre 6441 e 11759 MPa para os módulos obtidos segundo o FWD (amplitude de 5318 MPa); as médias variaram entre 7640 e 11555 MPa para a viga Benkelman (amplitude de 3915 MPa);
- os valores de módulo característico variaram entre 7396 e 13951 MPa com o FWD (amplitude de 6555 MPa) e, entre 10097 e 14736 MPa, com a viga (amplitude de 4639 MPa);
- os valores mínimos e máximos de módulo obtidos com o FWD foram 4646 e 15989 MPa (amplitude de 11343 MPa); o valor mínimo foi de 3529 MPa e o valor máximo foi de 19423 MPa a partir dos cálculos realizados com a viga (amplitude de 15894 MPa);
- os coeficientes de variação foram inferiores com o FWD, variando entre 8 e 19%; com a viga Benkelman, a variação foi entre 9 e 37%;

- também a variabilidade da amostragem foi inferior para o FWD, em que o desvio padrão variou entre 738 e 2210 MPa, quando em comparação com a viga Benkelman, em que o desvio padrão variou entre 868 e 4001 MPa.

Tabela 13 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com o FWD e para a camada de revestimento asfáltico

Segmento:	01	02	03	04	05	06
número de dados:	19	16	8	20	24	8
média (X):	11741	11710	6441	7532	11759	9293
desvio padrão (σ):	2210	1146	954	1244	1183	738
módulo característico (MC):	13951	12856	7396	8777	12942	10031
módulo mínimo (M _{mín}):	7452	9836	4646	5178	9817	8237
módulo máximo (M _{máx}):	15989	13706	7766	9836	13706	10432
coef. de variação (CV%):	19	10	15	17	10	8

Tabela 14 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com a viga Benkelman e para a camada de revestimento asfáltico

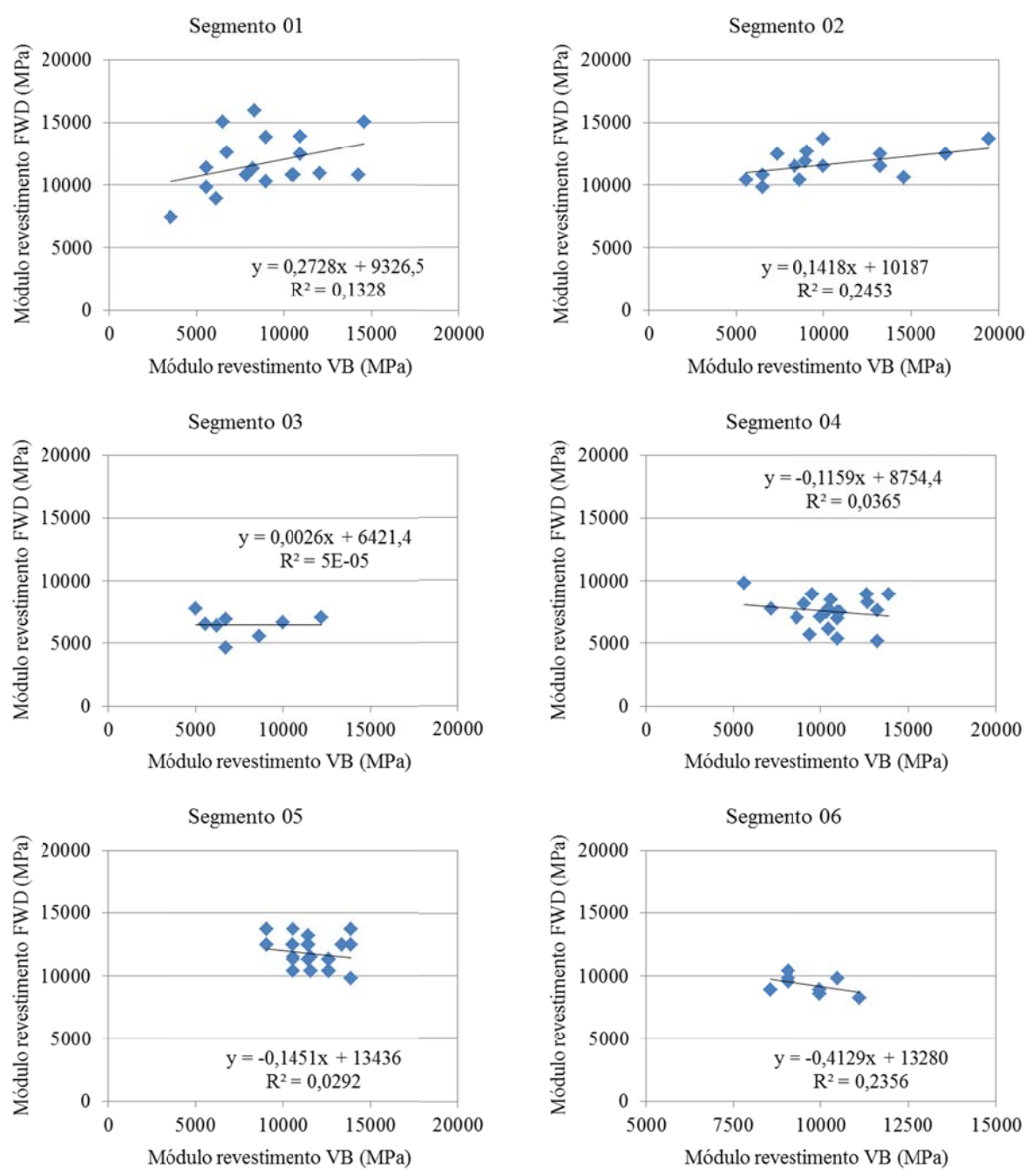
Segmento:	01	02	03	04	05	06
número de dados:	19	16	8	20	24	8
média (X):	8852	10734	7640	10547	11555	9655
desvio padrão (σ):	2952	4001	2457	2051	1394	868
módulo característico (MC):	11803	14736	10097	12598	12949	10523
módulo mínimo (M _{mín}):	3529	5574	5017	5625	9041	8543
módulo máximo (M _{máx}):	14593	19423	12220	13885	13885	11109
coef. de variação (CV%):	33	37	32	19	12	9

O próximo passo consistiu na análise de possíveis correlações entre os valores de módulo retroanalizados para a camada de revestimento asfáltico. Segundo Tabela 15, foram consideradas fracas todas as correlações entre os valores obtidos com a viga Benkelman e o FWD. Ainda, não houve unanimidade no comportamento das correlações, pois se apresentaram ora positivas e ora negativas. Este comportamento divergente também é observado nos gráficos da Figura 66, em que são identificadas distintas inclinações para as retas de tendência. Através da análise estatística, não foi verificada significância para os modelos de regressão indicados nos gráficos.

Tabela 15 - Valores de correlação de Pearson entre módulos retroanalizados para a camada de revestimento asfáltico com a viga Benkelman e o FWD

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	0,36	fraca positiva	04	-0,19	fraca negativa
02	0,49	fraca positiva	05	-0,17	fraca negativa
03	0,01	nula	06	-0,49	fraca negativa

Figura 66 - Gráficos de regressão entre módulos retroanalizados para a camada de revestimento asfáltico com a viga Benkelman e o FWD



Correlações mais apuradas foram verificadas individualmente para cada equipamento através de gráficos que relacionam deflexões *versus* módulos retroanalizados. Conforme Tabela 16, para todos os segmentos analisados, ao se confrontar os dados de deflexão e módulo obtidos pelo FWD, foi obtida correlação moderada ou forte. Todas as correlações foram negativas, identificando que, quanto maior a deflexão, menor será o valor de módulo retroanalizado. A Tabela 17 permite visualizar os resultados obtidos com os dados de viga Benkelman, onde se verifica correlação moderada ou forte para os segmentos 02, 03, 04 e 05. Para os segmentos 01 e 06, foi identificada fraca correlação entre as variáveis.

Tabela 16 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de revestimento asfáltico com o FWD

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	-0,84	forte negativa	04	-0,55	moderada negativa
02	-0,67	moderada negativa	05	-0,73	moderada negativa
03	-0,63	moderada negativa	06	-0,55	moderada negativa

Tabela 17 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de revestimento asfáltico com a viga Benkelman

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	-0,30	fraca negativa	04	-0,50	moderada negativa
02	-0,80	forte negativa	05	-0,68	moderada negativa
03	-0,57	moderada negativa	06	0,36	fraca positiva

A Figura 67 exemplifica, para o segmento 02, os gráficos que relacionam deflexões e módulos do revestimento asfáltico. Nota-se a menor variabilidade dos dados ao analisar o gráfico da esquerda, referente ao FWD, em comparação ao gráfico da direita, com os dados da viga Benkelman. Também é possível observar a inclinação negativa da reta de tendência para os modelos de regressão. Os gráficos para todos os segmentos estão dispostos no APÊNDICE J da dissertação e são verificados comportamentos similares aos descritos para o segmento 02.

Através da análise estatística, foi observada significância ao nível de confiança de 95% para os modelos de regressão obtidos segundo o FWD nos segmentos 01, 02, 04 e 05. Para os segmentos 03 e 06 não foi verificada significância muito provavelmente devido ao número reduzido de elementos, sendo 8 dados para cada segmento. No que se refere à viga Benkelman, a análise de significância foi satisfatória para os segmentos 02, 04 e 05 e

insatisfatória para as regressões dos segmentos 01, 03 e 06. A Tabela 18 apresenta os modelos de regressão, o coeficiente R^2 e os resultados da análise de significância.

Figura 67 - Gráficos de regressão entre deflexão e módulos retroanalizados para a camada de revestimento asfáltico com o FWD e a viga Benkelman

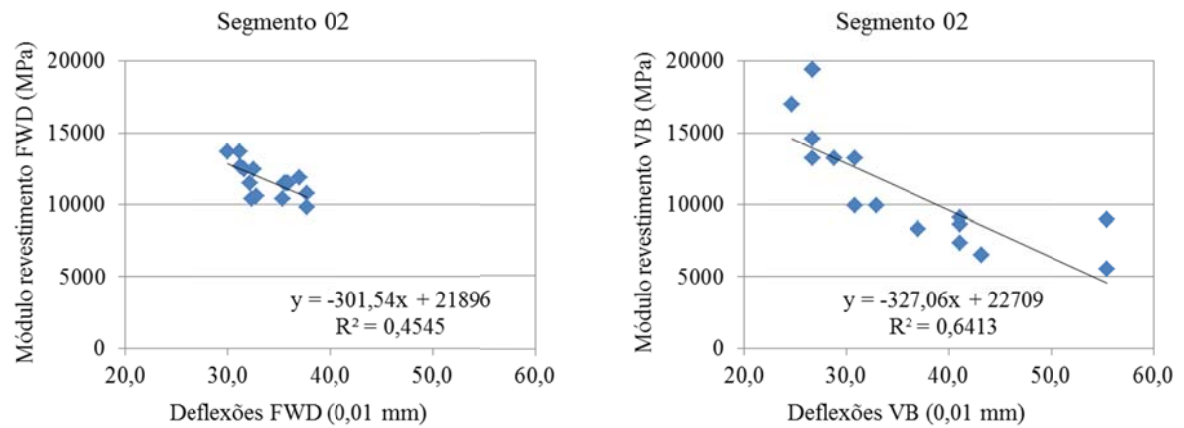


Tabela 18 - Análise de significância - módulo para a camada de revestimento

Seg.	FWD			Viga Benkelman		
	Modelo	R²	Resultado	Modelo	R²	Resultado
01	$y = -303,9x + 22781$	0,7136	significante	$y = -78,463x + 12239$	0,0924	não signif.
02	$y = -301,54x + 21896$	0,4545	significante	$y = -327,06x + 22709$	0,6413	significante
03	$y = -87,698x + 11756$	0,3984	não signif.	$y = -142,05x + 14066$	0,3303	não signif.
04	$y = -167,8x + 15313$	0,3033	significante	$y = -166,12x + 15827$	0,2466	significante
05	$y = -387,04x + 24093$	0,5284	significante	$y = -381,48x + 20510$	0,4604	significante
06	$y = -116,14x + 13864$	0,3034	não signif.	$y = 147,21x + 5040,1$	0,1317	não signif.

4.3.3 Módulos Retroanalizados para a Camada de Base

Nas análises referentes à camada de base, novamente foram obtidos resultados menos dispersos para o equipamento FWD em comparação com a viga Benkelman, conforme visualizado na Figura 68. Foram identificados pontos *outliers* (pontos individuais extremos) nos segmentos 02, 04, 05 e 06, que correspondem aos pontos de teste nº 33, 68, 71, 108 e 110.

De acordo com a Figura 69, as linhas de mínimo e máximo para os módulos da base obtiveram menores variações para o FWD. Também de modo similar ao revestimento asfáltico, as médias de módulo da base alcançaram maior amplitude para o FWD quando em comparação com a viga Benkelman.

Figura 68 - Diagramas de caixa para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com FWD e viga Benkelman e para a camada de base

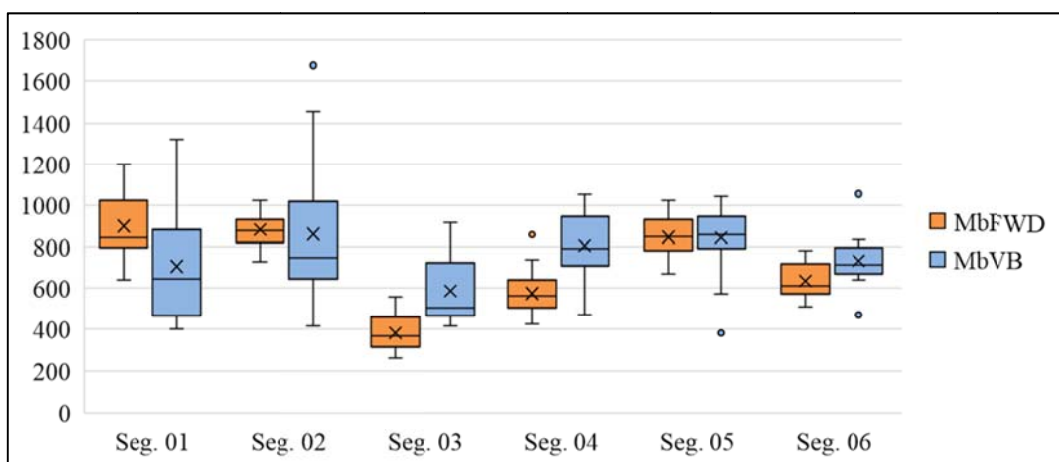
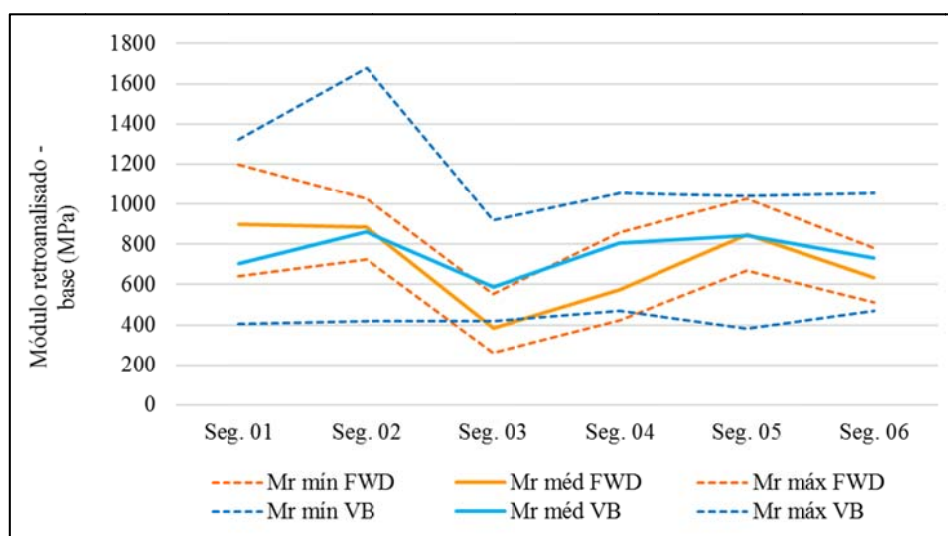


Figura 69 - Valores mínimos, médios e máximos para o módulo retroanalizado da base



O resumo estatístico para os módulos da camada de base foi realizado após a exclusão dos pontos *outliers* e está disposto nas Tabelas 19 e 20, referente aos dados de FWD e viga Benkelman, respectivamente. As constatações acerca dos valores calculados são:

- as médias variaram entre 383 e 906 MPa com o FWD (amplitude de 523 MPa) e, entre 586 e 869 MPa, com a viga Benkelman (amplitude de 283 MPa);
- os valores característicos variaram entre 478 e 1075 MPa para os módulos obtidos segundo o FWD (amplitude de 597 MPa) e, entre 758 e 1115 MPa, para a viga Benkelman (amplitude de 357 MPa);
- os valores mínimos e máximos de módulo retroanalizados com os dados do FWD foram 259 e 1198 MPa (amplitude de 939 MPa); o valor mínimo foi de 403 MPa e o valor

máximo foi de 1454 MPa a partir dos cálculos realizados com a viga Benkelman (amplitude de 1051 MPa);

- notou-se baixa alteração entre os valores de módulo mínimos calculados com dados da viga Benkelman, variando entre 403 e 471 para os quatro primeiros segmentos;

- a variabilidade dos módulos calculados foi inferior para o FWD, em que o desvio padrão alternou entre 82 e 169 MPa, quando em comparação com a viga Benkelman, em que o desvio padrão esteve entre 66 e 293 MPa;

- os coeficientes de variação (CV) foram inferiores com o FWD, alternando entre 9 e 25%; com a viga Benkelman, o intervalo foi entre 9 e 36%;

- para o segmento 03, segundo o FWD, o coeficiente de variação passou de 15 para 25%, ao analisar os módulos para o revestimento asfáltico e para a camada de base, respectivamente; foi a maior alteração entre os segmentos e equipamentos avaliados, sendo que para os demais foi verificada baixa alteração.

Tabela 19 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com o FWD e para a camada de base

Segmento:	01	02	03	04	05	06
número de dados:	19	16	8	20	24	8
média (X):	906	882	383	561	869	629
desvio padrão (σ):	169	84	96	88	82	88
módulo característico (MC):	1075	966	478	649	951	718
módulo mínimo (M _{mín}):	639	726	259	425	757	510
módulo máximo (M _{máx}):	1198	1026	555	737	1026	782
coef. de variação (CV%):	19	10	25	16	9	14

Tabela 20 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com a viga Benkelman e para a camada de base

Segmento:	01	02	03	04	05	06
número de dados:	19	16	8	20	24	8
média (X):	673	822	586	792	869	724
desvio padrão (σ):	228	293	172	149	112	66
módulo característico (MC):	901	1115	758	942	982	789
módulo mínimo (M _{mín}):	403	418	418	471	573	640
módulo máximo (M _{máx}):	1093	1454	917	1041	1041	834
coef. de variação (CV%):	34	36	29	19	13	9

A Tabela 21 traz os valores para os coeficientes de Pearson obtidos na análise de possíveis correlações entre módulo da base calculado com os dados da viga Benkelman e com os dados do FWD. Todas as correlações foram fracas, alternando entre positivas e negativas, com exceção para o segmento 02, em que se obteve correlação moderada.

Tabela 21 - Valores de correlação de Pearson entre módulos retroanalizados para a camada de base com a viga Benkelman e o FWD

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	0,32	fraca positiva	04	0,09	fraca positiva
02	0,61	moderada positiva	05	0,19	fraca positiva
03	-0,22	fraca negativa	06	-0,22	fraca negativa

Na Figura 70 estão ilustrados os gráficos de regressão elaborados para os segmentos 01 ao 06, apresentando-se as linhas de tendência linear, equações e valor para os coeficientes de determinação R^2 . Apenas a equação referente ao Segmento 02 apresentou significância ao nível de confiança de 95%.

Figura 70 - Gráficos de regressão entre módulos retroanalizados para a base com a viga Benkelman e o FWD

(continua)

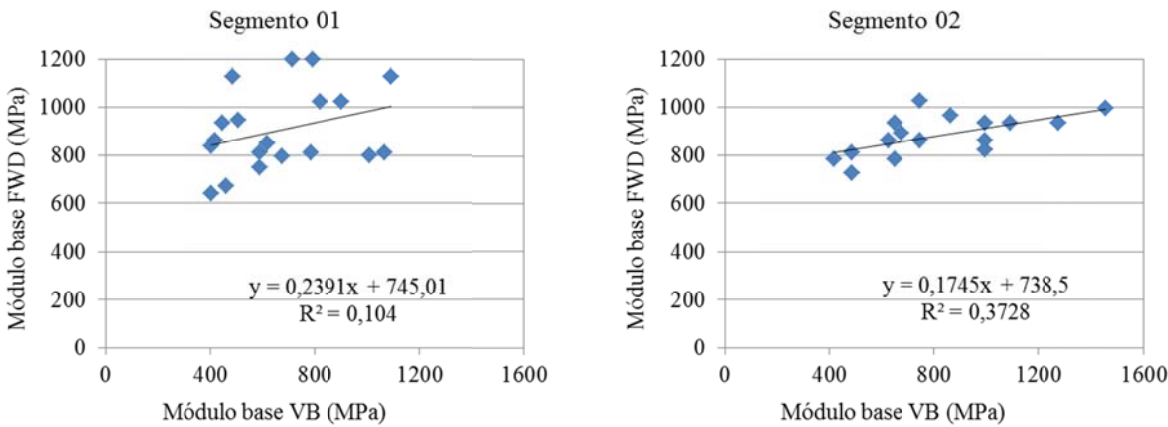
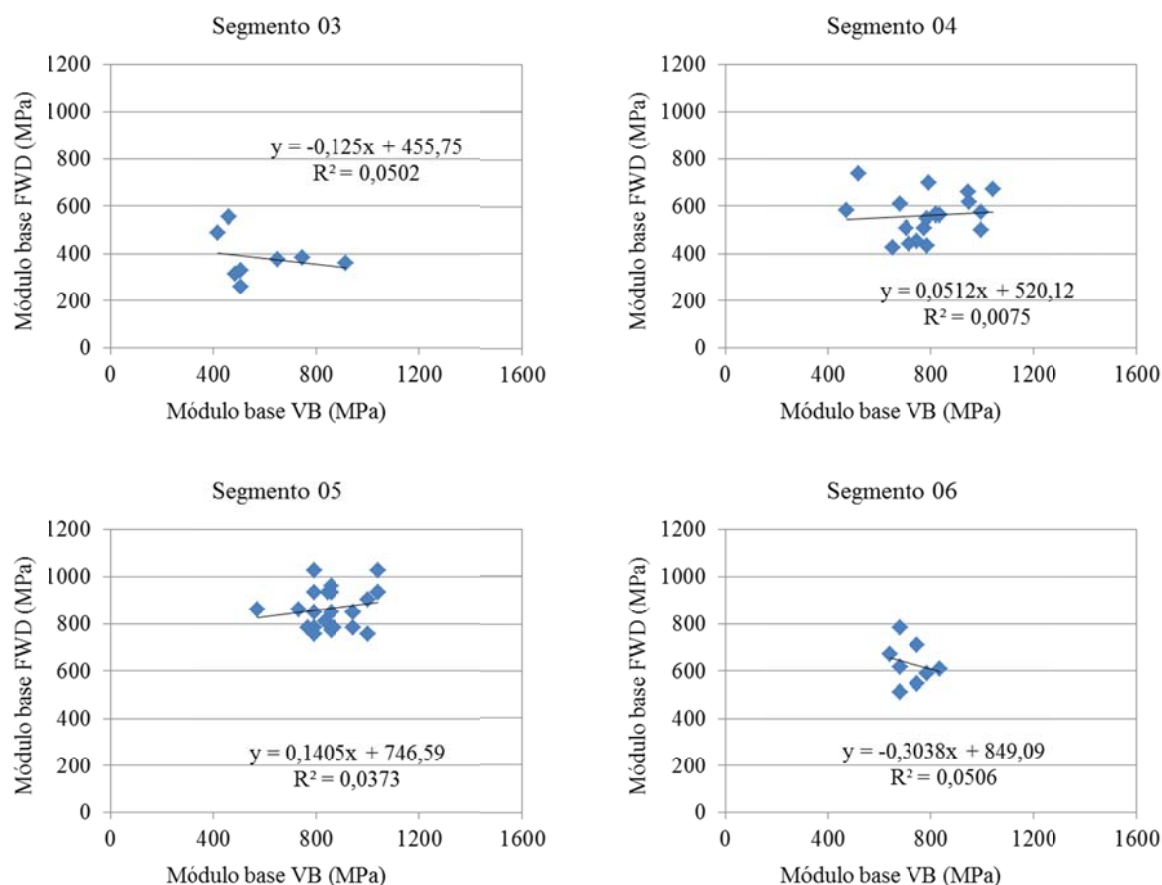


Figura 70 - Gráficos de regressão entre módulos retroanalizados para a base com a viga Benkelman e o FWD

(conclusão)



Nas Tabelas 22 e 23 estão dispostos os coeficientes de correlação obtidos ao se comparar deflexões *versus* módulo retroanalizado da base, para um mesmo equipamento. Os valores de correlação de Pearson (r) para a camada de base foram próximos aos calculados para o revestimento asfáltico. Com base nos dados do FWD, todas as correlações foram moderadas, exceto para o segmento 05 em que se verificou forte correlação. Com os dados da viga Benkelman, foi obtida correlação fraca, moderada e forte, a depender do segmento, de modo semelhante ao verificado no item anterior referente ao revestimento asfáltico.

Tabela 22 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de base com o FWD

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	-0,78	moderada negativa	04	-0,75	moderada negativa
02	-0,70	moderada negativa	05	-0,81	forte negativa
03	-0,57	moderada negativa	06	-0,73	moderada negativa

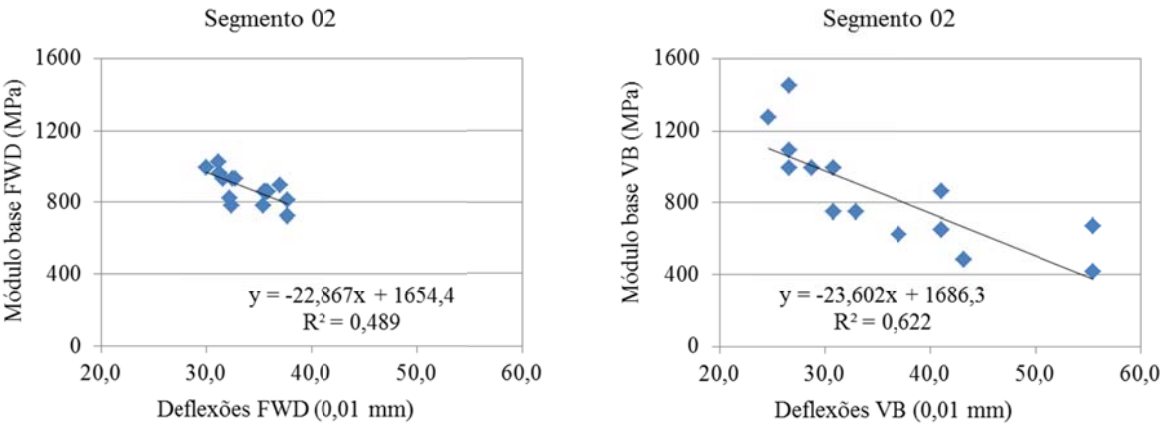
Tabela 23 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de base com a viga Benkelman

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	-0,23	fraca negativa	04	-0,52	moderada negativa
02	-0,79	moderada negativa	05	-0,84	forte negativa
03	-0,60	moderada negativa	06	0,36	fraca positiva

Os gráficos de regressão entre deflexões e módulo retroanalizado da base estão dispostos no APÊNDICE J, para cada segmento e para cada equipamento. Como exemplo, a Figura 71 ilustra os modelos de regressão para o segmento 02, com linha de tendência negativa e maior variabilidade de dados ao se empregar leituras da viga Benkelman.

Para o segmento 02 exemplificado na figura, é observada proximidade entre os coeficientes linear e angular para as duas equações de regressão. Este comportamento ocorreu devido à proximidade entre valores de deflexão em um mesmo ponto do segmento para FWD e a viga Benkelman e a assertividade da retroanálise através do BackMeDiNa, obtendo-se resultados de módulo similares para as bacias deflectométricas dos dois equipamentos. Como os resultados foram semelhantes para os dois equipamentos, também se demonstrou apropriado o método proposto por Theisen *et al.* (2009) para a conversão das bacias obtidas com a viga Benkelman e a adaptação para a realização dos cálculos no BackMeDiNa.

Figura 71 - Gráficos de regressão entre deflexão e módulos retroanalizados para a camada de base com o FWD e a viga Benkelman



De acordo com a Tabela 24, a análise de significância revelou resultados satisfatórios, com F de significância inferior a $\alpha = 0,05$, para as regressões entre deflexões e módulo da

base para os segmentos 01, 02, 04, 05 e 06 avaliados com o FWD. Com relação à viga Benkelman, as regressões foram significantes para os segmentos 02, 04 e 05.

Tabela 24 - Análise de significância - módulo para a camada de base

Seg.	FWD			Viga Benkelman		
	Modelo	R ²	Resultado	Modelo	R ²	Resultado
01	$y = -21,373x + 1682,2$	0,6038	significante	$y = -4,6403x + 873,1$	0,0542	não signif.
02	$y = -22,867x + 1654,4$	0,489	significante	$y = -23,602x + 1686,3$	0,622	significante
03	$y = -7,9258x + 862,8$	0,3222	não signif.	$y = -10,314x + 1052,4$	0,3559	não signif.
04	$y = -16,132x + 1308,7$	0,5567	significante	$y = -12,683x + 1195,3$	0,2706	significante
05	$y = -29,664x + 1814,1$	0,6494	significante	$y = -38,242x + 1767$	0,7126	significante
06	$y = -18,315x + 1350,2$	0,5259	significante	$y = 11,108x + 375,51$	0,1317	não signif.

4.3.4 Módulos Retroanalizados para a Camada de Sub-base

A avaliação dos valores de módulo retroanalizados para a camada de sub-base, a partir da Figura 72, indica uma maior dispersão de valores para os segmentos 01 e 02 e por meio das deflexões aferidas com a viga Benkelman. No diagrama apresentado, foi identificada a menor quantidade de pontos *outliers* em comparação às demais camadas do pavimento, sendo o total de dois pontos: nº 33 e 71.

Conforme Figura 73, a exemplo das camadas de revestimento e base, também foram verificados maiores intervalos entre valores mínimos e máximos para os módulos da sub-base retroanalizados a partir de deflexões com a viga Benkelman. Ainda, a linha média de módulos com o FWD apresentou maior amplitude em comparação com a linha gerada através de leituras realizadas com a viga Benkelman.

Figura 72 - Diagramas de caixa para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com FWD e viga Benkelman e para a camada de sub-base

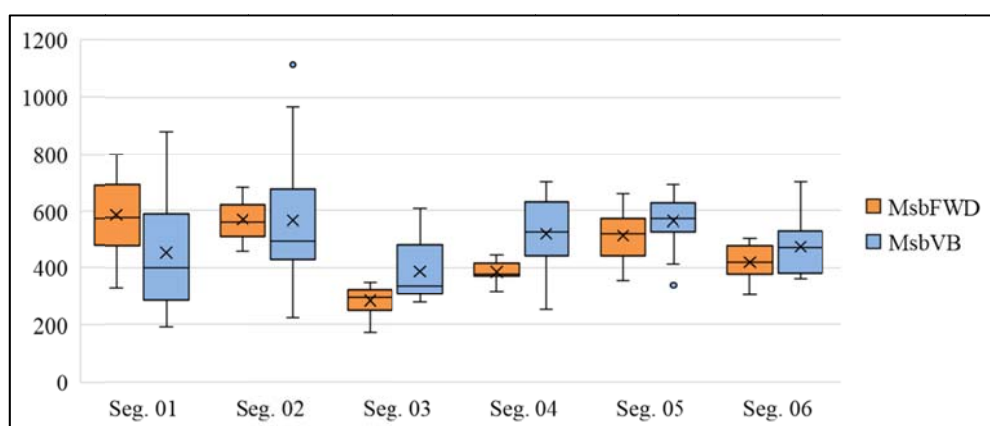
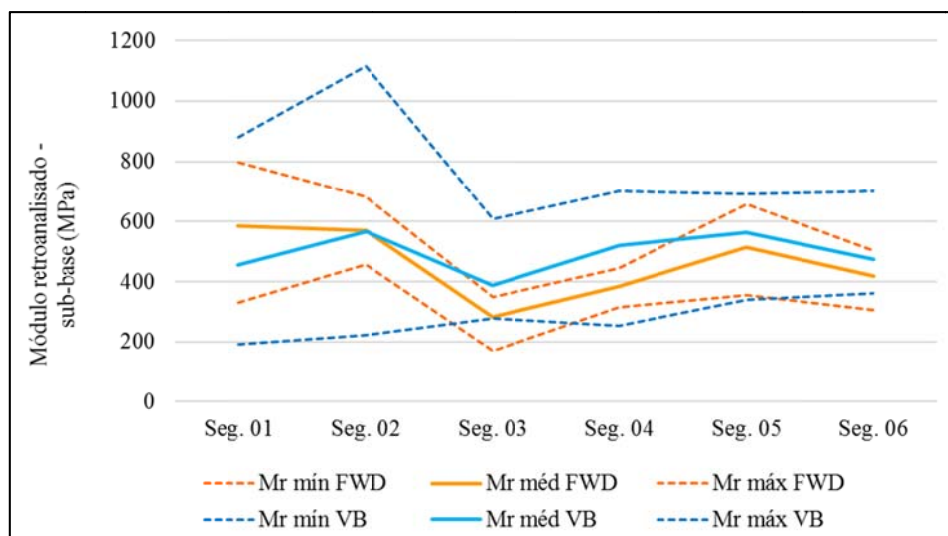


Figura 73 - Valores mínimos, médios e máximos para o módulo da sub-base



São destacadas as seguintes observações a partir dos resumos estatísticos presentes nas Tabelas 25 e 26, referentes aos módulos retroanalizados para a sub-base:

- os valores médios estiveram compreendidos entre 283 e 589 MPa (amplitude de 306 MPa) através dos cálculos realizados com os dados do FWD e, entre 388 e 571 (amplitude de 183 MPa), com os dados da viga Benkelman;
- a mesma tendência de amplitudes superiores para o FWD foi verificada para os valores de módulo característico, alternando entre 341 e 724 MPa (amplitude de 383 MPa), ao passo que a variação foi de 503 a 745 MPa (amplitude de 242 MPa) para a viga Benkelman;
- quando se avaliam os valores máximos e mínimos, a maior variação ocorre nos dados calculados para a viga Benkelman, alternando entre 190 e 968 MPa (amplitude de 778 MPa), em comparação com o FWD, onde se obteve módulo mínimo de 170 MPa e máximo de 798 MPa (amplitude de 628 MPa);
- os desvios padrão estiveram entre 37 e 135 MPa para valores calculados com o FWD e, entre 70 e 206 MPa, para módulos calculados a partir de deflexões com a viga Benkelman;
- também os coeficientes de variação foram inferiores com o FWD, alternando entre 10 e 23%; com a viga Benkelman, a variação foi entre 14 e 38%.

Tabela 25 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com o FWD e para a camada de sub-base

Segmento:	01	02	03	04	05	06
número de dados:	19	16	8	20	24	8
média (X):	589	570	283	383	530	424
desvio padrão (σ):	135	77	58	37	75	52
módulo característico (MC):	724	647	341	420	605	476
módulo mínimo (M _{mín}):	329	458	170	315	386	348
módulo máximo (M _{máx}):	798	682	348	446	659	505
coef. de variação (CV%):	23	14	20	10	14	12

Tabela 26 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com a viga Benkelman e para a camada de sub-base

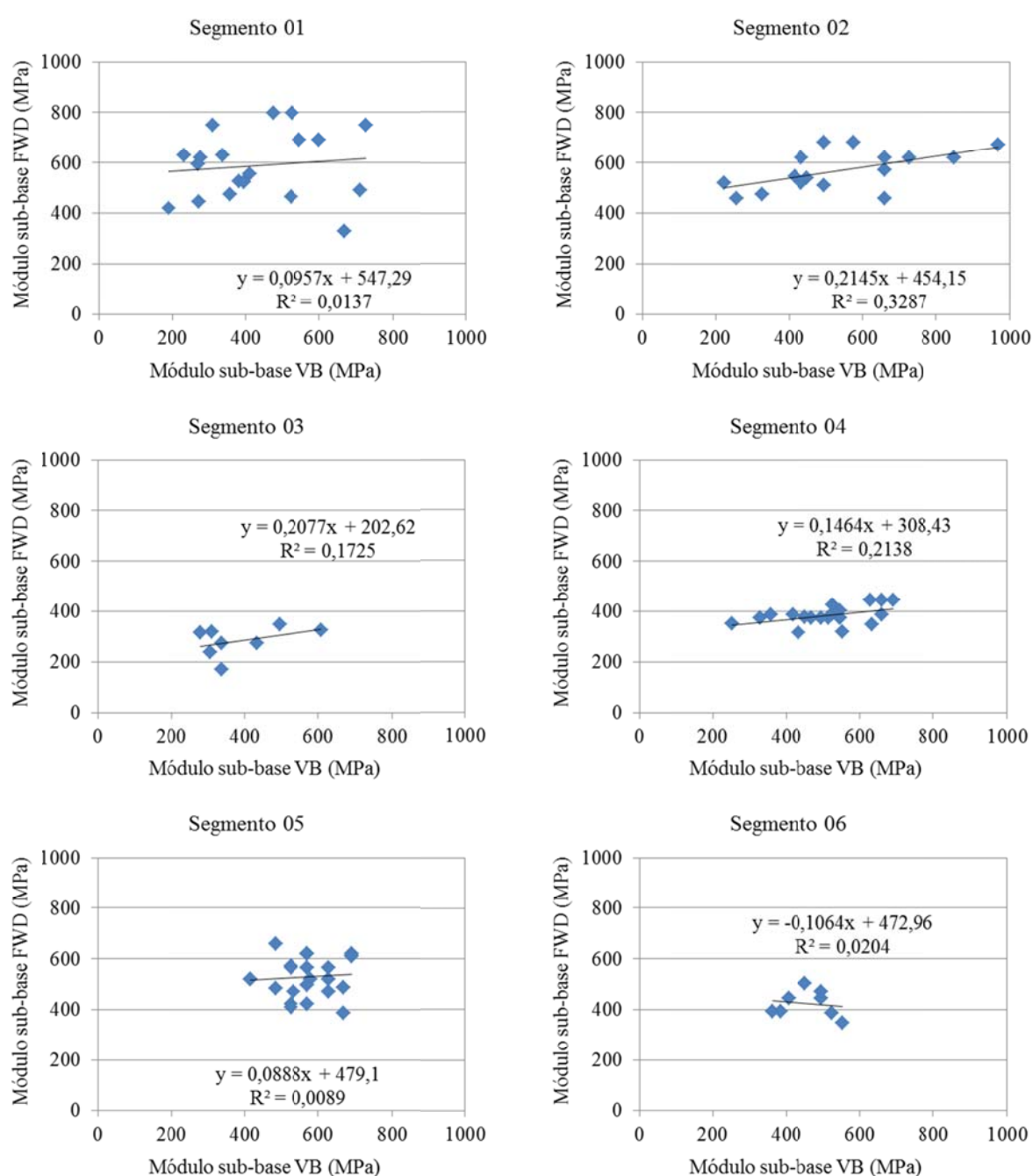
Segmento:	01	02	03	04	05	06
número de dados:	19	16	8	20	24	8
média (X):	432	539	388	512	571	459
desvio padrão (σ):	165	206	115	116	80	70
módulo característico (MC):	597	745	503	628	651	529
módulo mínimo (M _{mín}):	190	223	278	253	415	362
módulo máximo (M _{máx}):	727	968	609	692	692	554
coef. de variação (CV%):	38	38	30	23	14	15

Na sequência buscou-se verificar a existência de correlações entre valores de módulo de elasticidade equivalente para a sub-base, mediante cálculos efetuados com dados da viga Benkelman e do FWD. A Tabela 27 resume os coeficientes de Pearson (r) encontrados e, assim como nas demais análises realizadas para os módulos de revestimento e base, a maioria das correlações identificadas foi classificada como fraca. Houve uma discreta melhoria nas correlações ora apresentadas, visto que apenas uma foi classificada como negativa (o comportamento negativo é incoerente, pois significaria que quando aumenta o módulo calculado com a viga Benkelman, diminuiria o módulo obtido com dados do FWD). Além disso, a partir da análise de regressão, duas equações foram significantes ao grau de confiança estatístico de 95%, referentes aos segmentos 02 e 04. A Figura 74 ilustra os gráficos que relacionam os módulos calculados para a sub-base segundo os dois equipamentos, viga Benkelman e FWD.

Tabela 27 - Valores de correlação de Pearson entre módulos retroanalizados para a camada de sub-base com a viga Benkelman e o FWD

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	0,12	fraca positiva	04	0,46	fraca positiva
02	0,57	moderada positiva	05	0,09	fraca positiva
03	0,42	fraca positiva	06	-0,14	fraca negativa

Figura 74 - Gráficos de regressão entre módulos retroanalizados para a camada de sub-base com a viga Benkelman e o FWD



As Tabelas 28 e 29 indicam os coeficientes de correlação obtidos na comparação entre deflexões D_0 e módulo retroanalizado para a sub-base, considerando-se o equipamento FWD e a viga Benkelman, respectivamente. Os coeficientes são próximos aos determinados para as demais camadas do pavimento. Para o FWD foram obtidos dois segmentos com forte correlação (até então apenas um segmento configurava-se com forte correlação). Com a viga Benkelman, mantiveram-se correlações fracas, moderadas e fortes, a depender do segmento. As relações são negativas, indicando a diminuição do módulo de elasticidade equivalente com o aumento das deflexões; exceção verificou-se para o segmento 06 calculado com a viga Benkelman, que apresentou resultado incoerente em relação ao esperado.

Tabela 28 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de sub-base com o FWD

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	-0,73	moderada negativa	04	-0,71	moderada negativa
02	-0,87	forte negativa	05	-0,49	fraca negativa
03	-0,59	moderada negativa	06	-0,86	forte negativa

Tabela 29 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de sub-base com a viga Benkelman

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	-0,27	fraca negativa	04	-0,59	moderada negativa
02	-0,79	moderada negativa	05	-0,80	forte negativa
03	-0,58	moderada negativa	06	0,29	fraca positiva

No APÊNDICE J são apresentados todos os diagramas elaborados para a camada de sub-base, os quais relacionam os valores de deflexão com os valores de módulo de elasticidade equivalente. A Tabela 30 indica as equações de regressão efetuadas, com a apresentação dos coeficientes R^2 e a análise de significância com $\alpha = 0,05$. Com o FWD, os modelos foram significantes para os segmentos 01, 02, 04, 05 e 06 e, com a viga Benkelman, houve significância para os segmentos 02, 04 e 05, configurando-se os mesmos resultados obtidos para a camada de base.

Tabela 30 - Análise de significância - módulo para a camada de sub-base

Seg.	FWD			Viga Benkelman		
	Modelo	R ²	Resultado	Modelo	R ²	Resultado
01	$y = -16,056x + 1171,9$	0,5331	significante	$y = -3,9096x + 601,13$	0,0734	não signif.
02	$y = -26,046x + 1449,8$	0,7493	significante	$y = -16,7x + 1150,8$	0,6308	significante
03	$y = -4,9473x + 583,06$	0,349	não signif.	$y = -6,7256x + 692,5$	0,3377	não signif.
04	$y = -6,3599x + 678,31$	0,4979	significante	$y = -11,252x + 869,63$	0,352	significante
05	$y = -16,696x + 1061,9$	0,2423	significante	$y = -25,981x + 1181$	0,6456	significante
06	$y = -12,777x + 927,06$	0,7424	significante	$y = 9,4632x + 162,33$	0,0843	não signif.

4.3.5 Módulos Retroanalizados para a Camada de Subleito

Os resultados encontrados para o módulo de elasticidade equivalente do subleito diferiram, em parte, da tendência que estava sendo observada para as demais camadas do pavimento. Através da Figura 75, verifica-se que está mantida a maior dispersão dos resultados para o equipamento viga Benkelman (caixas mais largas em relação ao FWD), entretanto foi observado um maior número de pontos de exceção, com predominância das ocorrências para valores calculados com o FWD. Os *outliers* encontrados para a camada de subleito correspondem aos pontos de teste nº 22, 78, 82, 92, 93 e 108.

De acordo com a Figura 76, entre valores mínimos e máximos, a maior amplitude permanece para a linha correspondente à viga Benkelman. No entanto, houve alteração para a linha com maior amplitude entre os valores médios de módulo, para as demais camadas estava relacionada ao FWD e no momento (para o subleito) é observada a maior amplitude para valores calculados com dados da viga Benkelman.

Figura 75 - Diagramas de caixa para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com FWD e viga Benkelman e para a camada de subleito

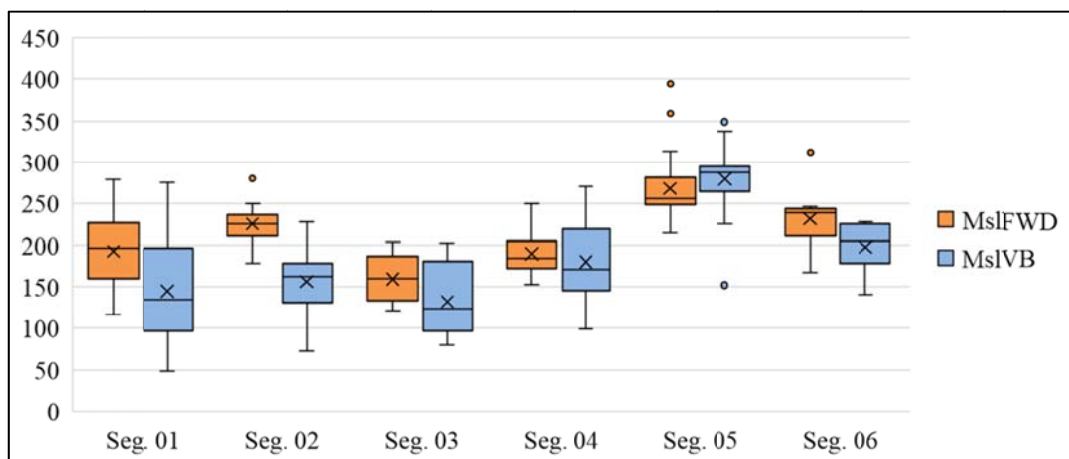
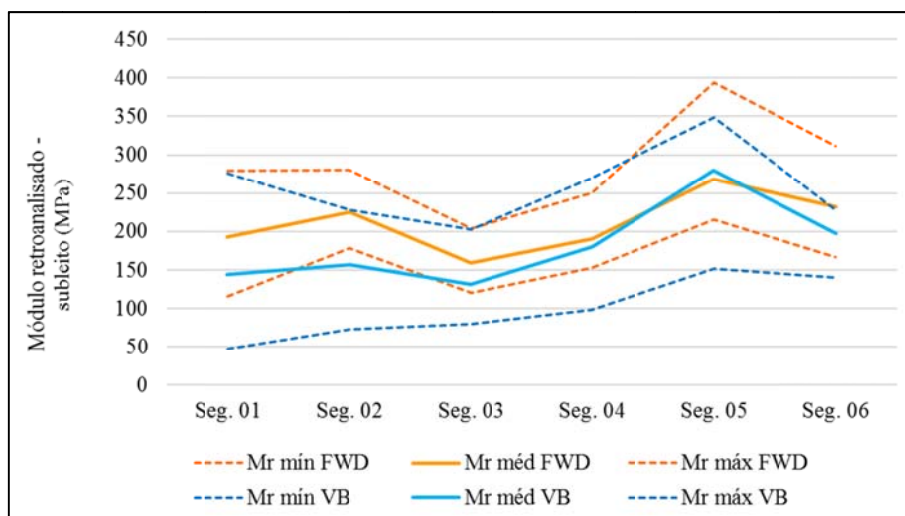


Figura 76 - Valores mínimos, médios e máximos para o módulo retroanalizado do subleito



As Tabelas 31 e 32 apresentam a estatística descritiva para os valores de módulo de elasticidade equivalente calculados para o subleito, em que se observa:

- destaque para os valores de módulo de subleito obtidos para o segmento 06, o qual é reforçado por pedra pulmão e apresentou o segundo maior valor médio de módulo;
- as médias variaram entre 160 e 262 MPa para os módulos obtidos segundo o FWD (amplitude de 102 MPa); as médias variaram entre 132 e 281 MPa para a viga Benkelman (amplitude de 149 MPa);
- os valores de módulo característico variaram entre 189 e 288 MPa com o FWD (amplitude de 99 MPa) e, entre 178 e 307 MPa, com a viga (amplitude de 129 MPa);
- os valores mínimos e máximos de módulo retroanalizados com os dados do FWD foram 116 e 313 MPa (amplitude de 197 MPa); o valor mínimo foi de 48 MPa e o valor máximo foi de 337 MPa a partir dos cálculos realizados com a viga Benkelman (amplitude de 289 MPa);
- a variabilidade da amostragem foi inferior para o FWD, em que o desvio padrão variou entre 18 e 43 MPa, quando em comparação com a viga Benkelman, em que o desvio padrão variou entre 27 e 65 MPa;
- também os coeficientes de variação foram inferiores com o FWD, variando entre 8 e 22%; com a viga Benkelman, a variação foi entre 9 e 45%.

Tabela 31 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com o FWD e para a camada de subleito

Segmento:	01	02	03	04	05	06
número de dados:	19	16	8	20	24	8
média (X):	191	221	160	188	262	230
desvio padrão (σ):	43	18	29	23	25	20
módulo característico (MC):	234	239	189	211	288	250
módulo mínimo (M _{mín}):	116	178	121	153	215	188
módulo máximo (M _{máx}):	279	250	204	250	313	246
coef. de variação (CV%):	22	8	18	12	10	9

Tabela 32 - Estatística descritiva para os valores de módulo retroanalizados a partir das deflexões medidas com a viga Benkelman e para a camada de subleito

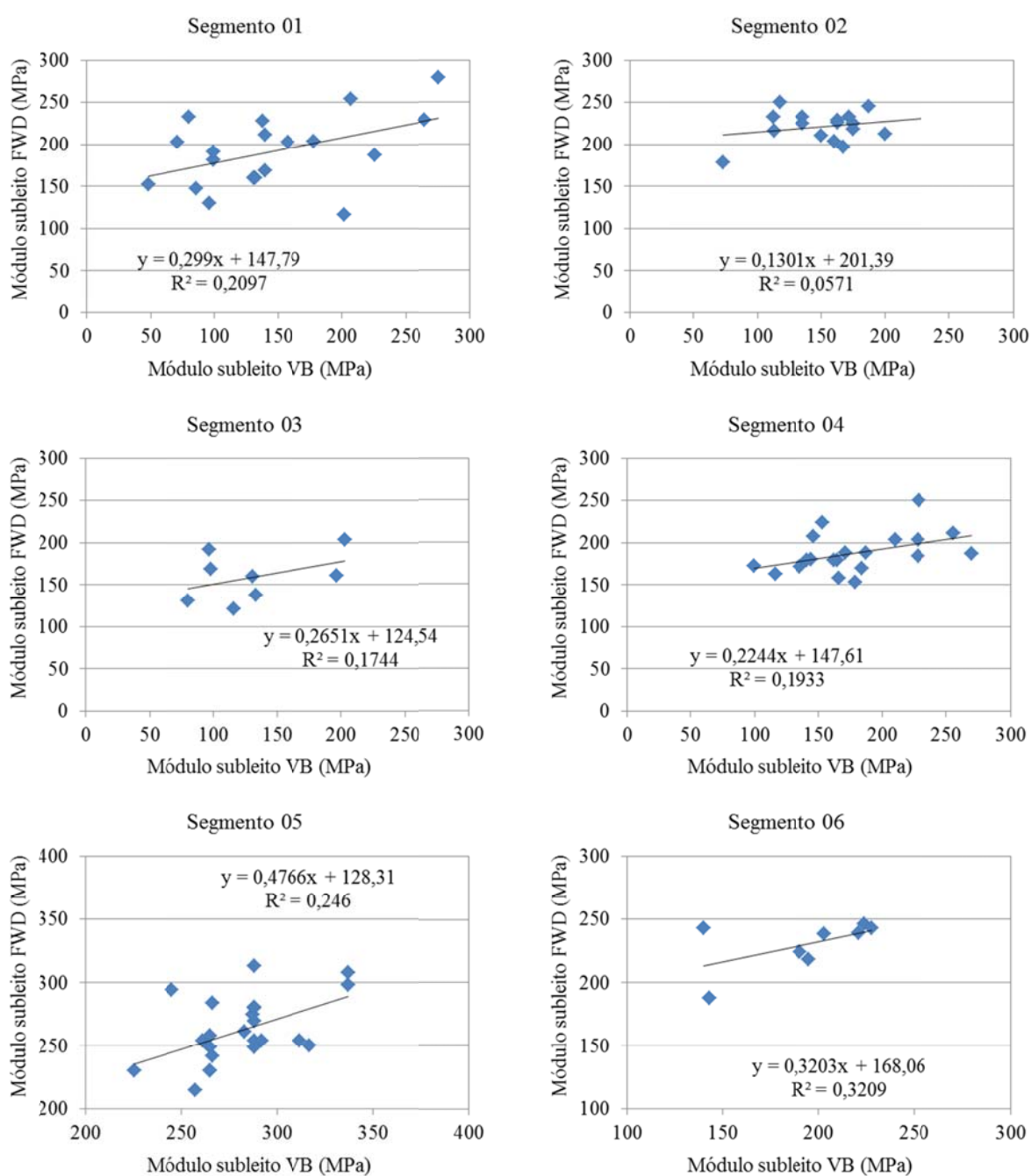
Segmento:	01	02	03	04	05	06
número de dados:	19	16	8	20	24	8
média (X):	146	150	132	179	281	193
desvio padrão (σ):	65	33	46	46	27	35
módulo característico (MC):	211	183	178	224	307	228
módulo mínimo (M _{mín}):	48	73	80	99	225	140
módulo máximo (M _{máx}):	276	200	203	270	337	228
coef. de variação (CV%):	45	22	35	26	9	18

A Tabela 33 apresenta os valores para os coeficientes de Pearson (r) obtidos na análise de possíveis correlações entre módulo do subleito calculado com os dados da viga Benkelman e com os dados do FWD. Apesar de se obter quatro correlações classificadas como fracas e duas moderadas, destaca-se que os resultados obtidos para o subleito foram os melhores em comparação com as demais camadas do pavimento. Ainda, todas as correlações foram coerentemente positivas, indicando que as duas variáveis movem-se em um mesmo sentido. A Figura 77 indica os modelos para cada segmento, os valores de R^2 e as retas de tendência positiva. Através da análise estatística, apurou-se que os modelos de regressão para os segmentos 01 e 05 foram significantes ao grau de confiança de 95%.

Tabela 33 - Valores de correlação de Pearson entre módulos retroanalizados para a camada de subleito com a viga Benkelman e o FWD

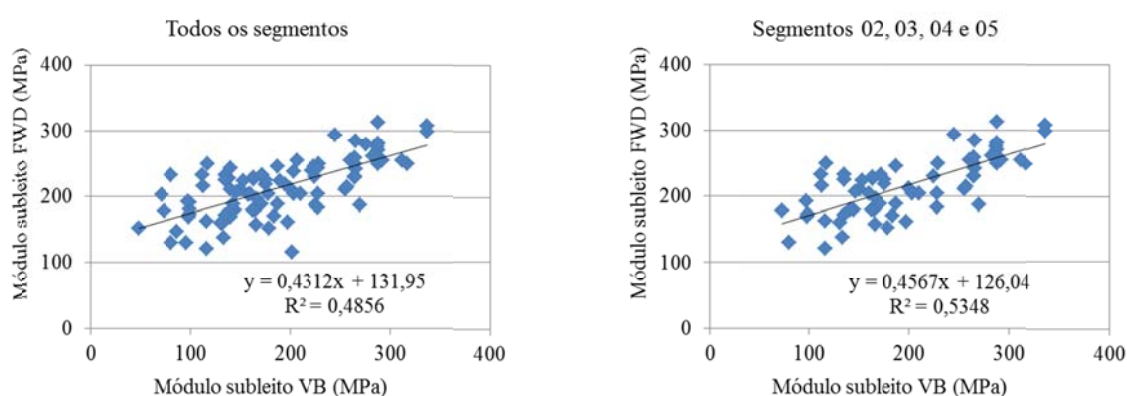
Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	0,46	fraca positiva	04	0,44	fraca positiva
02	0,24	fraca positiva	05	0,50	moderada positiva
03	0,42	fraca positiva	06	0,57	moderada positiva

Figura 77 - Gráficos de regressão entre módulos retroanalizados para a camada de subleito com a viga Benkelman e o FWD - por segmento



Face aos resultados mais expressivos verificados para a camada de subleito, em comparação às demais, está-se apresentando o gráfico elaborado com a junção dos dados de todos os segmentos e também o gráfico com a junção dos segmentos reforçados com areia (segmentos 02, 03, 04 e 05), conforme Figura 78. No primeiro caso, o coeficiente de Pearson (r) resultou em 0,70 e, no segundo caso, 0,73, ambos indicando a correlação moderada entre as variáveis. Ambos os modelos elaborados foram significantes ao grau de confiança de 95%.

Figura 78 - Gráficos de regressão entre módulos retroanalizados para a camada de subleito com a viga Benkelman e o FWD



As próximas análises referem-se às comparações entre deflexões e módulo do subleito, individualmente para cada equipamento. Segundo as Tabelas 34 e 35, as correlações foram predominantemente moderadas e com a tendência negativa. Novamente, foram os melhores resultados em comparação com as outras camadas do pavimento.

Tabela 34 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de subleito com o FWD

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	-0,81	forte negativa	04	-0,73	moderada negativa
02	-0,71	moderada negativa	05	-0,59	moderada negativa
03	-0,40	fraca negativa	06	-0,75	moderada negativa

Tabela 35 - Valores de correlação de Pearson entre deflexões e módulos retroanalizados para a camada de subleito com a viga Benkelman

Segmento	r	Correlação	Segmento	r	Correlação
01	-0,78	moderada negativa	04	-0,79	moderada negativa
02	-0,76	moderada negativa	05	-0,68	moderada negativa
03	-0,81	forte negativa	06	-0,78	moderada negativa

No APÊNDICE J da dissertação estão ilustrados os gráficos que correlacionam deflexões *versus* módulo retroanalizado da camada de subleito. Para cada gráfico estão indicadas as equações e o valor do coeficiente R^2 . Estas informações também estão dispostas na Tabela 36, juntamente com os resultados da análise de significância, sendo que todas as equações, exceto uma, foram satisfatórias. Aqui se destaca o comportamento dos modelos elaborados com os dados de viga Benkelman, com resultados um tanto superiores em comparação ao FWD.

Tabela 36 - Análise de significância - módulo para a camada de subleito

Seg.	FWD			Viga Benkelman		
	Modelo	R^2	Resultado	Modelo	R^2	Resultado
01	$y = -5,5832x + 394,24$	0,6521	significante	$y = -4,4394x + 337,58$	0,6092	significante
02	$y = -5,0093x + 390,1$	0,5022	significante	$y = -2,5904x + 244,65$	0,5817	significante
03	$y = -1,6748x + 261$	0,1574	não signif.	$y = -3,7158x + 299,97$	0,6537	significante
04	$y = -4,165x + 380,78$	0,5277	significante	$y = -5,9284x + 366,86$	0,627	significante
05	$y = -6,7431x + 477,01$	0,3466	significante	$y = -7,2436x + 450,79$	0,4601	significante
06	$y = -4,199x + 395,16$	0,5641	significante	$y = -12,653x + 589,67$	0,6112	significante

4.4 COMPARAÇÃO COM VALORES E EQUAÇÕES DE REFERÊNCIA

Nesta seção, os valores de deflexão avaliados no item 4.2 e os valores de módulo de elasticidade equivalente retroanalizados no item 4.3, são comparados com valores e equações de referência encontradas na bibliografia. Particularmente para as medidas de deflexão, seus valores são comparados aos pares, sendo viga Benkelman *versus* FWD, viga Benkelman *versus* LWD e LWD *versus* FWD.

4.4.1 Medidas de Deflexão

Valores de referência

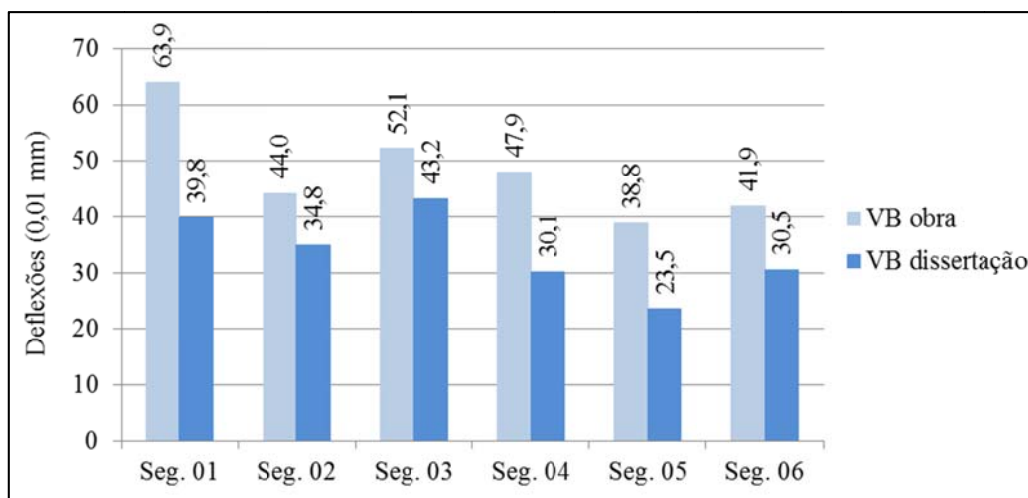
Foram consultados os Relatórios Mensais de Obra (DEINFRA-SC, 2014, 2019) para identificar as medidas de deflexão com a viga Benkelman após a execução da camada asfáltica para cada segmento da Estrada Rio do Morro. Não há medições anteriores realizadas com os equipamentos FWD e LWD para este local.

O comparativo subsequente, entre deflexões de obra e deflexões desta pesquisa, visa identificar de modo geral o comportamento das leituras com a viga Benkelman, visto que uma análise mais apurada fica comprometida por não se dispor de dados precisos quanto à data de realização dos ensaios da obra, temperatura e condições do tempo, assim como a diferença temporal de meses e anos entre a realização de ambos os testes.

A Figura 79 ilustra o comparativo realizado, sendo identificadas deflexões superiores para as leituras de obra realizadas previamente à liberação ao tráfego. Como as deflexões desta pesquisa foram realizadas em período posterior, valores inferiores foram obtidos em função da ação do tráfego e a consequente consolidação adicional das camadas do pavimento. Para cada segmento, ao se comparar as deflexões dos dois eventos, obra e esta pesquisa, observa-se um comportamento similar, sendo a maior divergência identificada no segmento 01, de maneira que alguma particularidade como temperatura ou umidade podem ter influenciado a média de $63,9.10^{-2}$ mm encontrada no período da obra e superior às demais.

A inspeção dos dados da obra também permitiu identificar os valores de deflexão mínimo e máximo, que corresponderam a $20,5.10^{-2}$ e $78,0.10^{-2}$ mm, respectivamente, guardando relação com os resultados da dissertação, em que se obteve mínimo de $18,1.10^{-2}$ e máximo de $61,3.10^{-2}$ mm.

Figura 79 - Comparativo entre deflexões médias com a viga Benkelman



Viga Benkelman versus FWD

Ao avaliar as medidas de deflexão obtidas com a viga Benkelman e o FWD, notou-se maior proximidade entre as leituras nos segmentos 01 e 02. Para os demais segmentos, os valores aferidos com a viga Benkelman foram inferiores aos valores aferidos com o FWD. Borges (2001), DNIT (2006b), Pinto e Preussler (2010) e Bueno (2016) informam a tendência contrária, ou seja, de forma majoritária as leituras realizadas com a viga Benkelman são superiores aos valores medidos com o FWD.

Entretanto, de modo análogo ao comportamento das deflexões verificado nesta dissertação, Borges (2001) destacou em sua pesquisa uma porcentagem de valores aferidos com a viga inferiores aos medidos com o FWD, principalmente para os baixos valores de deflexão. O comparativo realizado sequencialmente empregou como base os segmentos S-06 (Entr BR-282 - Painel), S-23 (Entr. BR-280 - Palma Sola - Anchieta) e S-48 (Arroio Correntes - Jaguaruna) da pesquisa de Borges (2001), sendo que apresentaram características próximas à Estrada Rio do Morro:

- baixo nível deflectométrico: deflexão característica inferior a $55 \cdot 10^{-2}$ mm;
- estrutura do pavimento, denominada tipo I: 5 cm de revestimento asfáltico, 15 cm de base em brita graduada e 19 cm de sub-base em macadame seco.

No Quadro 16 é apresentado o resumo dos modelos de regressão avaliados. Acresce-se ao comparativo em questão, além dos modelos desenvolvidos para rodovias catarinenses, o modelo desenvolvido por Bueno (2016) para pavimentos com estrutura semelhante ao desta dissertação, entretanto com intervalo de deflexões medidas entre 25 e $99 \cdot 10^{-2}$ milímetros.

Quadro 16 - Modelos de regressão entre deflexões com viga Benkelman e FWD empregados em análise comparativa

Autor	Referência	Modelo	R ²
esta dissertação	Deflexões nos segmentos 02 ao 06	$D_{VB} = 1,5117 D_{FWD} - 28,440$	0,36
Borges (2001)	Deflexões em trechos 5cm de revestimento	$D_{VB} = 1,180 D_{FWD} - 0,710$	0,73
Borges (2001)	S-06, trecho Entr BR-282 - Paniel	$D_{VB} = 1,264 D_{FWD} - 6,528$	0,70
Borges (2001)	S-23, trecho Entr. BR-280 - Palma Sola - Anchieta	$D_{VB} = 0,549 D_{FWD} + 12,666$	0,27
Borges (2001)	S-48, trecho Arroio Correntes - Jaguaruna	$D_{VB} = 0,889 D_{FWD} + 1,299$	0,67
Bueno (2016)	Pavimentos em Santa Maria (RS)	$D_{VB} = 1,355 D_{FWD}$	0,5

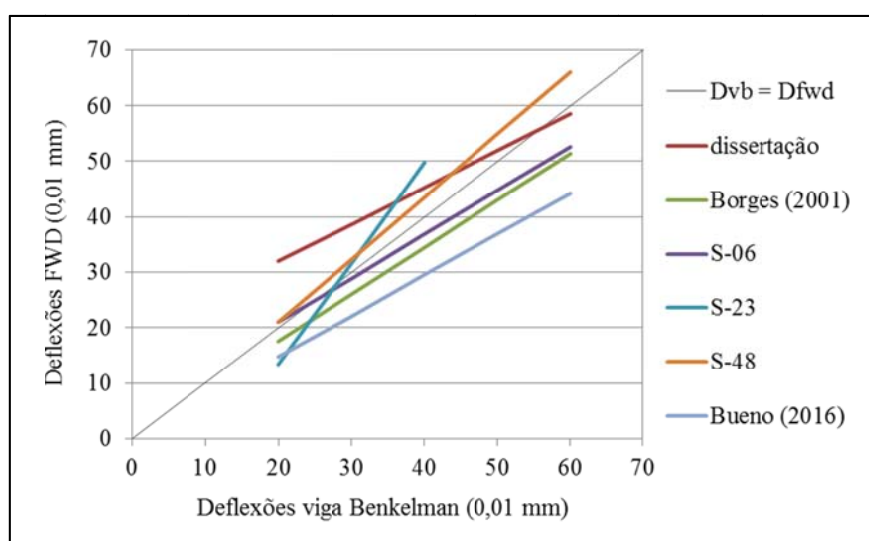
A Figura 80 ilustra o comparativo entre os modelos de regressão selecionados. Sobre a linha diagonal principal verifica-se que as deflexões com a viga Benkelman são iguais às deflexões com o FWD, ou seja, $D_{VB} = D_{FWD}$. Os modelos de regressão situados abaixo da linha diagonal principal informam valores de deflexão com a viga Benkelman superiores ao FWD. Contrariamente, acima desta linha, são superiores os valores de deflexão obtidos com o FWD. É nesta segunda situação que se encontra o modelo de regressão desenvolvido na dissertação para baixos valores de deflexão do pavimento.

Ao se comparar as retas, é verificada maior proximidade entre a equação desenvolvida nesta pesquisa com a equação elaborada por Borges (2001) para o segmento S-48 (trecho Arroio Correntes - Jaguaruna). Destaca-se que, tanto a Estrada Rio do Morro como o segmento S-48, além de apresentarem estruturas similares do pavimento e baixo nível deflectométrico, estão situadas na mesma região geológica do estado de Santa Catarina, a qual contempla a maior parte do litoral catarinense, composta por rochas de embasamento cristalino (solos oriundos principalmente de gnaisses, granulitos e granitos). Este fator pode ter contribuído com a maior proximidade entre os resultados. Segundo Marcon (1996), o conhecimento da geologia de determinada região é um fator importante na interpretação e análise do comportamento dos pavimentos, por este motivo o autor elaborou modelos de previsão de desempenho dos pavimentos a partir da subdivisão das rodovias estaduais nas três regiões geológicas de Santa Catarina.

A análise da inclinação da reta referente ao modelo desenvolvido nesta dissertação indica um maior distanciamento entre deflexões com viga Benkelman e FWD para valores

mais baixos (sendo $D_{VB} < D_{FWD}$), igualdade para o valor de 54.10^{-2} mm ($D_{VB} = D_{FWD}$) e inversão do comportamento das deflexões ao se ultrapassar este valor ($D_{VB} > D_{FWD}$). Anteriormente foram realizadas constatações similares citando-se, como exemplo, os autores Fabrício *et al.* (1994) os quais optaram por elaborar dois modelos de regressão em função do nível deflectométrico, para valor inferior a 85.10^{-2} mm e para valor superior a 85.10^{-2} mm, evidenciando-se distintos comportamentos em relação ao nível de deflexão do pavimento. Borges (2001) também cita os autores Pinto e Domingues (2001), os quais avaliaram 7,5 km de uma Avenida no Rio de Janeiro, concluindo que para baixas deflexões ($< 60.10^{-2}$ mm), a correlação entre os dois equipamentos é próxima a 1:1, enquanto para valores elevados a relação aumenta significativamente. Estes estudos apresentam conclusões próximas ao observado com os dados desta dissertação.

Figura 80 - Gráfico comparativo entre a equação de regressão obtida na dissertação para viga Benkelman e FWD e referências pesquisadas



À medida que alguns estudos guardam relação entre si, outros divergem como foi o caso do comparativo entre a equação da dissertação e a equação de Borges (2001) e Bueno (2016). A gama de resultados distintos obtidos por vários autores vem a reafirmar o disposto por Medina e Motta (2015, p. 465) “(...) não haverá correlação universal válida para quaisquer tipos de estruturas de pavimento como se busca. (...) Portanto as correlações somente devem ser usadas com a devida compreensão das condições nas quais foram desenvolvidas e com ciência dos erros envolvidos.” Por fim, Balbo (2007) acrescenta que cada obra, em função de suas particularidades, requer uma calibração inicial com o uso de ambos os equipamentos.

Viga Benkelman versus LWD

Nesta dissertação, os valores das deflexões medidas com a viga Benkelman foram sempre inferiores aos valores das leituras com o LWD. Estes resultados corroboram com o estudo realizado por Rodrigues (2018), em que se empregou o mesmo equipamento LWD utilizado nesta pesquisa. O autor realizou análises em vias urbanas do município de Joinville e verificou que o limite inferior das medidas do LWD representou o até o dobro das deflexões da viga; considerando o limite superior, as deflexões obtidas com o LWD apresentaram valores médios maiores que as leituras realizadas com a viga Benkelman.

O Quadro 17 indica os modelos empregados na análise comparativa sequencialmente apresentada. Os modelos referem-se aos segmentos 01 e 06 da dissertação (ainda que não tenham sido estatisticamente significantes, mas com o intuito de simples verificação) e segmentos 1a e 2 da pesquisa de Rodrigues (2018), os quais apresentam materiais similares de pavimentação. São informadas as espessuras do revestimento asfáltico (hr) para cada estrutura de pavimento e a presença ou não de camada de reforço do subleito. O intervalo de deflexões com a viga Benkelman foi considerado entre 10 e $30 \cdot 10^{-2}$ mm, em consonância com os dados de entrada para o estabelecimento dos modelos de Rodrigues (2018). Entretanto, para as equações da Estrada Rio do Morro, as deflexões foram aferidas a partir de $20 \cdot 10^{-2}$ mm.

Quadro 17 - Modelos de regressão entre deflexões com viga Benkelman e LWD empregados em análise comparativa

Autor	Referência	Modelo	R ²
esta dissertação	Seg. 01 - hr = 5 cm - reforço em pedra pulmão - Estrada Rio do Morro	$D_{LWD} = 0,1781 D_{VB} + 73,191$	0,12
esta dissertação	Seg. 06 - hr = 5 cm - reforço em pedra pulmão - Estrada Rio do Morro	$D_{LWD} = 0,81 D_{VB} + 53,958$	0,05
Rodrigues (2018)	Seg. 1a - hr = 10 cm - reforço em pedra pulmão - Av. Santos Dumont	$D_{VB} = 0,5757 D_{LWD} + 7,0855$	0,53
Rodrigues (2018)	Seg. 2 - hr = 5 cm - R. Otto Boehm	$D_{VB} = 0,2421 D_{LWD} + 3,1279$	0,90

A partir da inspeção da Tabela 37 são verificados os resultados obtidos no cálculo das deflexões com o LWD (D_{LWD}) em função do valor das deflexões com a viga Benkelman (D_{VB}). Os resultados semelhantes estão destacados na Tabela. Foi verificada proximidade entre os resultados obtidos no segmento 01 e 06 desta pesquisa, sendo que ambos são

constituídos pela mesma estrutura de pavimentação. Há diferenças consideráveis entre os resultados da dissertação e o Segmento 1a de Rodrigues (2018), podendo ser justificadas pela camada mais espessa de revestimento asfáltico da Avenida Santos Dumont (10 cm) em comparação à Estrada Rio do Morro (5 cm). Ao se comparar os modelos com as mesmas espessuras de revestimento (5 cm), que correspondem às equações da dissertação e ao Segmento 2 de Rodrigues (2018), verifica-se proximidade entre os valores D_{LWD} calculados (em torno de $70 \cdot 10^{-2}$ mm) apenas para $D_{VB} = 20 \cdot 10^{-2}$ mm; para os demais valores de D_{VB} , houve divergências no valor calculado para D_{LWD} . As equações desta dissertação resultaram em uma menor variação para os valores de D_{LWD} a partir do aumento de D_{VB} , em comparação ao Segmento 2 - Rua Otto Boehm. Os segmentos desta pesquisa, apesar de apresentarem semelhança na estrutura do revestimento, base e sub-base com a Rua Otto Boehm, são também compostos por uma espessa camada de reforço do subleito em pedra pulmão, fato que os diferencia e pode explicar as divergências encontradas.

Ao final das análises, ficaram evidenciadas as diferenças entre a estrutura dos pavimentos cujos resultados de D_{LWD} em função de D_{VB} foram comparados e apresentaram-se divergentes. Os resultados obtidos têm concordância com os estudos de Fleming, Frost e Lambert (2007), os quais afirmaram que a relação entre medidas de deflexão de diferentes equipamentos são dependentes do tipo de material constituinte e das espessuras das camadas do pavimento.

Tabela 37 - Comparativo entre modelos da dissertação e modelos de Rodrigues (2018)

D_{VB} (10^{-2} mm)	D_{LWD} (10^{-2} mm)			
	Dissertação Seg. 01	Dissertação Seg. 06	Rodrigues (2018) Seg. 1a	Rodrigues (2018) Seg. 2
10	-	-	5,1	-
15	-	-	13,7	49,0
20	76,8	70,2	22,4	69,7
25	77,6	74,2	31,1	90,3
30	78,5	78,3	39,8	111,0

LWD versus FWD

São restritos os estudos com a abordagem de correlações entre LWD e FWD para pavimentos asfálticos e com características semelhantes ao pavimento desta pesquisa. Há vários modelos e configurações de carga para cada equipamento, fato que também deve ser observado no emprego de equações identificadas na literatura. Nesta seção são realizados

comparativos com as equações abordadas no referencial teórico, ainda que apresentem divergências quanto à estrutura do pavimento. Esta questão reforça a necessidade do desenvolvimento de pesquisas complementares com os equipamentos LWD e FWD, principalmente para pavimentos delgados e solos da região em estudo.

Em análise das deflexões obtidas com os equipamentos, verificou-se que as leituras realizadas com o LWD apresentaram valores sempre superiores às leituras com o FWD. Este comportamento também foi observado nas pesquisas de Preussler (2007), Horak *et al.* (2008), Magalhães (2015) e Burhani (2016). As diferenças notadas estão relacionadas com a profundidade de influência da tensão aplicada no ensaio do LWD, que é aproximadamente 1,5 vez o diâmetro da placa de carga usada no ensaio.

O Quadro 18 aponta os modelos de regressão empregados na comparação entre os resultados da dissertação e os resultados de estudos identificados na bibliografia. Para tanto, será utilizada a equação referente ao segmento 01 da Estrada Rio do Morro, a qual alcançou os melhores resultados na análise estatística de significância. O intervalo de deflexões com o LWD foi considerado entre 70 e $90 \cdot 10^{-2}$ mm, em concordância com as deflexões identificadas na avaliação do segmento 01 da Estrada Rio do Morro.

Quadro 18 - Modelos de regressão entre deflexões com LWD e FWD empregados em análise comparativa

Autor	Referência	Modelo	R ²
esta dissertação	Seg. 01 - hr = 5 cm - Estrada Rio do Morro	$D_{FWD} = 0,5485 D_{LWD} - 7,8694$	0,24
Preussler (2007)	Rodovia SP-330 - estrutura: Subleito+BGS	$D_{FWD} = 3,41 D_{LWD}$	-
Horak <i>et al.</i> (2008)	Camada de 7,5 a 10 cm de areia tratada com emulsão	$D_{FWD} = 0,3617 (D_{LWD})^{0,9831}$	0,62
Magalhães (2015)	1ª fase - sobre camadas granulares e asfálticas	$D_{FWD} = 0,5637 D_{LWD} - 0,0704$	0,96
Burhani (2016)	Revestimento asfáltico sobre base tratada com cimento	$D_{FWD} = 1,4607 (D_{LWD})^{0,8831}$	0,85

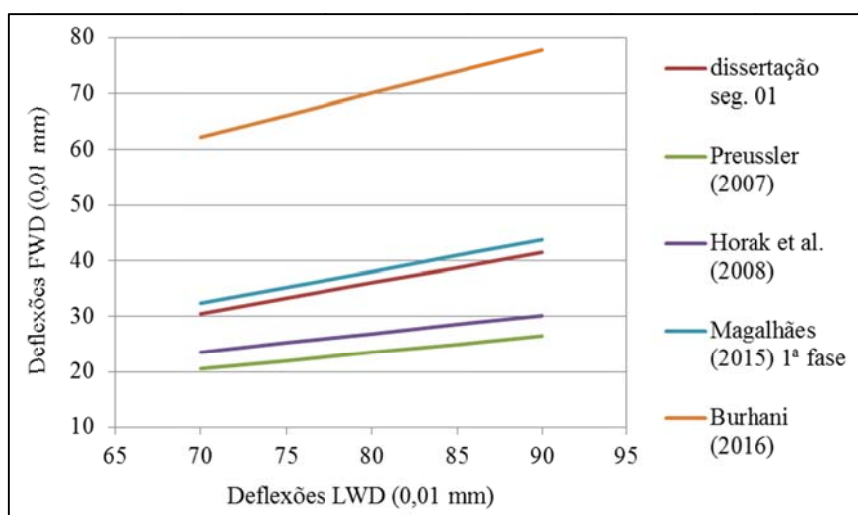
A Figura 81 ilustra o comparativo realizado, destacando-se a proximidade do modelo desenvolvido na dissertação com o modelo de Magalhães (2015). Um dos motivos para esta conduta é o fato de que os dois estudos foram realizados com o equipamento LWD de mesmo modelo. Em acréscimo, Magalhães (2015), na sua primeira fase de estudos, realizou análises sobre vários tipos de pavimento, incluindo-se o revestimento asfáltico, e obteve um extenso

intervalo de dados para o LWD. A equação elaborada por Magalhães na segunda fase de estudos não foi utilizada, pois é exponencial e foi realizada com deflexões do equipamento LWD variando entre 16 e 44.10^{-2} mm, divergindo do intervalo de deflexões desta dissertação.

Destaca-se também a proximidade entre os resultados obtidos por Horak *et al.* (2008) sobre uma camada de areia tratada com emulsão e Preussler (2007) sobre uma camada de brita graduada. Para ambos os autores foram verificadas as maiores razões entre medidas de deflexão com o LWD e o FWD. Em contraponto está a equação desenvolvida por Burhani (2016) para estradas americanas de baixo volume de tráfego, com espessuras de revestimento asfáltico entre 7,5 e 12,7 cm assentes sobre base tratada com cimento, sendo verificada a menor razão entre leituras de LWD e FWD.

As comparações realizadas sugerem a tendência de uma menor diferença entre as leituras de LWD e FWD para pavimentos com revestimento mais espesso e com rigidez elevada nas camadas superiores de sua estrutura. Neste sentido, Fleming, Frost e Lambert (2007) citaram o estudo de Steinert *et al.* (2006), onde a razão entre as deflexões com o LWD e o FWD variou com a redução da espessura do asfalto. As correlações encontradas pelos autores foram $D_{LWD} = 1,33 D_{FWD}$ para baixas espessuras e $D_{LWD} = 0,75 D_{FWD}$ para revestimentos mais espessos.

Figura 81 - Gráfico comparativo entre a equação de regressão obtida na dissertação para LWD e FWD e referências pesquisadas



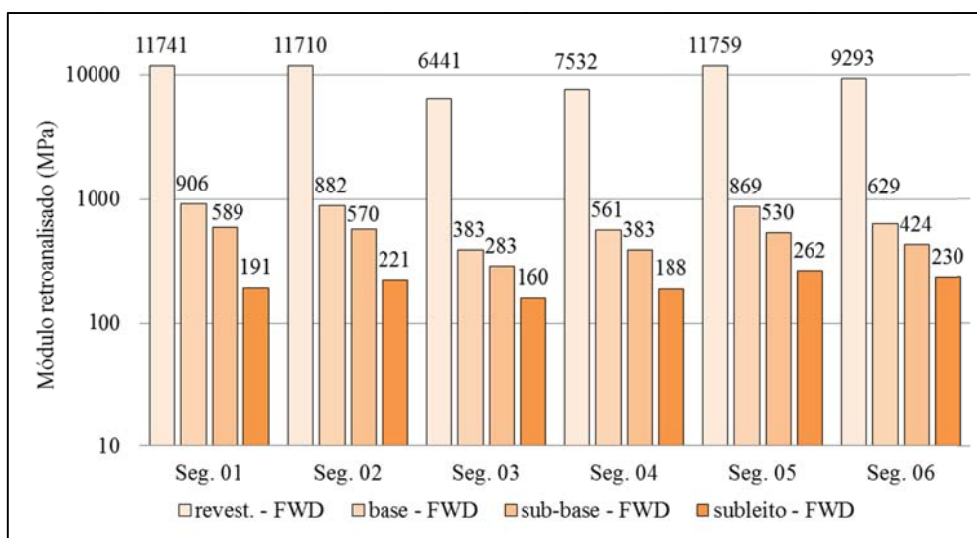
4.4.2 Módulo Retroanalísado

Os valores dos módulos retroanalísados com o *software* BackMeDiNa e para cada camada do pavimento são sequencialmente comparados com valores de referência encontrados na bibliografia. Para tanto são empregados os resultados obtidos com o FWD, resumidos por meio da Figura 82 e em função das razões abaixo consideradas.

Foi evidenciada a maior variabilidade entre medidas de deflexão aferidas com a viga Benkelman, assim como a menor precisão na determinação das bacias deflectométricas, fato que contribuiu com a maior dispersão dos valores de módulo de elasticidade equivalente retroanalísados com este equipamento. Desta forma, ao avaliar os gráficos entre os módulos obtidos com a viga Benkelman e o FWD, no item 4.3 desta pesquisa, ora se observou proximidade entre os resultados e ora foi observado certo distanciamento. Na pesquisa realizada por Bueno (2016), também foi verificada uma maior dispersão dos resultados de deflexão determinados com a viga Benkelman, principalmente no delineamento da bacia de deflexão. Desta maneira, o autor recomenda que os módulos sejam retroanalísados a partir de bacias deflectométricas levantadas com o equipamento FWD.

Segundo Lopes (2019) espera-se que o revestimento seja a camada com maior rigidez, pois absorve as maiores tensões devido ao carregamento do tráfego, transmitindo menores esforços para a base que, a depender de seu material, apresenta menor rigidez do que o revestimento, devendo transmitir menos esforços para as camadas inferiores até o subleito. Na dissertação, esta hipótese foi verificada para os materiais e espessuras do pavimento da Estrada Rio do Morro, observando-se a redução dos valores de módulo em relação à maior profundidade da camada avaliada.

Figura 82 - Valores médios de módulo retroanalísados com os dados do FWD



Com relação aos resultados obtidos para o módulo da camada de revestimento asfáltico, foram obtidos valores médios entre 6441 e 11759 MPa. Para os segmentos 01, 02 e 05, executados há 5 anos, para os quais se supõe a consolidação adicional proporcionada pelo tráfego, a variação entre os valores de módulo é mínima, entre 11710 e 11759 MPa.

Embora a pavimentação tenha sido realizada em épocas distintas e por empresas diferentes, ambas seguiram a especificação para mistura asfáltica com faixa granulométrica tipo C, mais recentemente assemelhada com a faixa VI do DEINFRA-SC (2016). Para a mistura asfáltica aplicada nas pavimentações de 2019, foram moldados corpos-de-prova Marshall e realizados em laboratório os ensaios de módulo de resiliência. Os testes foram encomendados pela empresa executora das obras na Estrada Rio do Morro junto ao laboratório da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e foram obtidos os valores de 7158, 7338 e 11111 MPa para o módulo de resiliência de três corpos de prova ensaiados, conforme laudo disposto no ANEXO E. Segundo a norma 135-ME (DNIT, 2018b), o resultado final é obtido a partir da média entre os três valores, calculada como 8536 MPa. Ao considerar os valores individuais e o valor final do módulo de resiliência, pode-se concluir que os valores retroanalisados com o BackMeDiNa para a camada de mistura asfáltica estão coerentes com os ensaios de laboratório realizados.

Tendo em vista a pavimentação recente, a não identificação de defeitos no pavimento em estudo e os baixos valores de deflexão aferidos, aguardavam-se valores superiores de módulo para as camadas do pavimento com relação aos estudos presentes na bibliografia. Esta situação esteve em evidência para a camada de base em brita graduada, em que foram alcançados valores médios de até 906 MPa. O projeto e a execução da camada de base indicaram valores de massa específica na ordem de 2,33 a 2,37 g/cm³ e valores de capacidade de suporte muito superiores a 100%. Como o pavimento é composto por uma camada de 5 cm de revestimento asfáltico, constata-se que o estado de tensões que chega até a camada de base é superior ao se comparar, por exemplo, com estruturas de pavimentos revestidas por 10 cm de camada asfáltica; este fator auxilia na compreensão da maior rigidez identificada para a camada da base em estudo, a qual está sobreposta por uma camada de revestimento asfáltico de menor proporção e, por consequência, sujeita a maiores tensões verticais. Camarini, Silva Junior e Fontenele (2019) encontraram, para um pavimento em eminência de restauração, um valor máximo de módulo para a base de 746 MPa, entretanto a média variou entre 168 e 359 MPa. Para pavimentos executados recentemente, Vieira (2020) obteve valores entre 555,8 e 768,2 MPa, com maior proximidade aos resultados encontrados nesta dissertação.

Com relação aos valores de módulo alcançados para a camada de sub-base em macadame seco, as médias dos segmentos 01 ao 06 estiveram compreendidas no intervalo entre 283 e 589 MPa. Para o subleito, os resultados variaram entre 160 e 262 MPa. Os valores dos módulos retroanalizados para as camadas de sub-base e subleito encontram-se entre as faixas de valores dos módulos obtidos na pesquisa de Franco *et al.* (2019) para uma rodovia de médio a alto volume de tráfego, na qual foram realizados ensaios laboratoriais. Segundo os autores, para as camadas de base e sub-base, o módulo de resiliência esteve no intervalo entre 146 e 744 MPa; através da retroanálise, entre 78 e 774 MPa. Os resultados encontrados em laboratório para as camadas em solo estiveram compreendidos entre 81 e 468 MPa e os módulos retroanalizados, entre 52 e 490 MPa.

Ao contrário, os resultados desta dissertação para a camada de sub-base foram muito divergentes em comparação com os valores mencionados por Balbo (2007) para camadas de macadame seco avaliadas no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, variando entre 100 e 200 MPa. Machado (2019) realizou ensaios para camadas de sub-base, reforço e subleito, ambas compostas por solo, alcançando resultados entre 126 e 212 MPa, neste caso convergindo para os valores dos módulos retroanalizados para o subleito na Estrada Rio do Morro.

Nota-se, portanto que, a depender das condições dos pavimentos e metodologia das pesquisas, são verificadas similaridades e divergências com os resultados encontrados na dissertação. Há coerência com determinados estudos, entretanto a comprovação está condicionada à realização de ensaios laboratoriais de módulo de resiliência, ainda que os métodos de ensaio não reproduzam de modo total as circunstâncias verificadas em campo.

Ainda com relação aos módulos retroanalizados para a camada de subleito, foi verificada nesta dissertação a tendência para menores coeficientes de variação (CV) em comparação às camadas superiores, fato também observado nas pesquisas de Bueno (2016) e Lopes (2019). O segmento 06 da Estrada Rio do Morro apresentou módulo retroanalizado para o subleito com média de 230 MPa, sendo inferior somente ao segmento 05, com média 262 MPa. Enquanto o segmento 05 encontra-se consolidado, por isso gerou melhores resultados, o segmento 06 é composto por subleito reforçado em pedra pulmão, alcançando resultados que se destacaram em relação aos demais segmentos. Bueno (2016) também identificou módulos superiores para subleitos reforçados com pedra detonada, caso do segundo trecho avaliado que está situado na BR-158.

4.5 AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO

Neste capítulo são realizadas análises quanto à vida útil do pavimento em relação ao critério de fadiga, considerando-se o limite de 30% da área trincada. Foram empregados os módulos de elasticidade equivalentes retroanalizados com os dados de FWD e viga Benkelman e comparados os resultados obtidos para os dois equipamentos. Por não se dispor de equações de fadiga para a mistura asfáltica da Estrada Rio do Morro, foram realizadas simulações através da utilização dos parâmetros k_1 e k_2 das misturas nomeadas classe 1, classe 2, classe 3 e classe 4, pré-determinadas no banco de dados do *software* MeDiNa.

A Tabela 38 apresenta a porcentagem de trincamento (TR) no final do período de projeto de 10 anos ao se considerar os parâmetros da mistura asfáltica classe 1. Nesta tabela são apresentados os módulos retroanalizados e verifica-se que, quanto menor seus valores, maior a porcentagem de trincamento no período de 10 anos. Ao se comparar as colunas referentes ao trincamento (TR), são verificadas divergências entre os segmentos que ultrapassam 30%, sendo segmentos 03, 04 e 06 com dados do FWD e segmentos 01 e 03 com a viga Benkelman. A diferença entre os valores de trincamento a partir dos dois equipamentos foi muito expressiva para os segmentos 01, 03 e 04: 13,9%, 25,4% e 18,7%, respectivamente.

Os resultados foram muito divergentes, principalmente ao se comparar o segmento 03 (TR = 69,4 e 44,0%) com os demais. Flores e Specht (2019) concluíram em sua pesquisa que o novo Método de Dimensionamento Nacional é sensível ao módulo de resiliência das camadas do pavimento, devendo-se, entre outros fatores, ao fato do método ser predominantemente mecanicista. Contrariamente, foi verificada a menor divergência entre os resultados para o segmento 05 (TR = 20,9 e 20,6%), onde houve homogeneidade e maior repetitividade das medidas de deflexão com ambos os aparelhos.

Tabela 38 - Porcentagem de trincamento ao final do período de projeto - classe 1

Seg.	FWD					Viga Benkelman					Comparativo
	Mr 5 cm	Mb 18 cm	Msb 30 cm	Msl 0 cm	TR %	Mr 5 cm	Mb 18 cm	Msb 30 cm	Msl 0 cm	TR %	Diferença TR _{VB} - TR _{FWD}
01	11741	906	589	191	20,6	8852	673	432	146	34,5	13,9
02	11710	882	570	221	20,8	10734	822	539	150	24,6	3,8
03	6441	383	283	160	69,4	7640	586	388	132	44,0	-25,4
04	7532	561	383	188	44,0	10547	792	512	179	25,3	-18,7
05	11759	869	530	262	20,9	11555	869	571	281	20,6	-0,3
06	9293	629	424	230	33,2	9655	724	459	193	29,2	-4,0

Onde:

M_r = módulo do revestimento asfáltico;

M_b = módulo da base em brita graduada;

M_{sb} = módulo da sub-base em macadame seco;

M_{sl} = módulo do subleito.

Em complemento, a Tabela 39 indica a vida útil do pavimento com relação ao número de repetições do eixo padrão (N) e de acordo com o período de meses ou anos. Notou-se que, ao avaliar o pavimento a partir das deflexões aferidas com o FWD, obteve-se a menor vida útil, sendo 6,2 anos para o segmento 03. As análises a partir dos dados de viga Benkelman indicaram uma sobrevida do pavimento, de aproximadamente dois anos, para o mesmo segmento. Estas avaliações permitem-nos concluir que futuras intervenções no pavimento podem ser adiadas a partir de avaliações realizadas com dados da viga Benkelman.

Tabela 39 - Vida útil do pavimento - classe 1

Segmento	FWD			Viga Benkelman		
	N	meses	anos	N	meses	anos
01	$9,377 \cdot 10^6$	146	12,2	$6,599 \cdot 10^6$	111	9,3
02	$9,377 \cdot 10^6$	146	12,2	$8,299 \cdot 10^6$	133	11,1
03	$4,061 \cdot 10^6$	74	6,2	$5,593 \cdot 10^6$	97	8,1
04	$5,593 \cdot 10^6$	97	8,1	$8,138 \cdot 10^6$	131	10,9
05	$9,292 \cdot 10^6$	145	12,1	$9,377 \cdot 10^6$	146	12,2
06	$6,747 \cdot 10^6$	113	9,4	$7,352 \cdot 10^6$	121	10,1

A Tabela 40 estabelece um comparativo entre os resultados obtidos na avaliação do desempenho dos pavimentos ao se considerar os parâmetros da classe 2. Ao analisar as colunas referentes ao trincamento previsto ao final do período de projeto (10 anos), verifica-se que os segmentos 03, 04 e 06 devem ultrapassar o limite de 30% da área trincada, conforme cálculos realizados a partir de dados obtidos com o FWD. A avaliação com a viga Benkelman indica que os segmentos 01 e 03 devem atingir o trincamento limite ao final do período de projeto. Nas colunas referentes à estimativa de vida útil dos pavimentos, é também verificada uma clara divergência, ao comparar os equipamentos, entre valores de número N e intervalo de tempo (em anos) até se atingir a vida útil quanto ao critério de fadiga.

Na avaliação segundo os parâmetros da classe 1 e classe 2, foram obtidos resultados próximos, sendo identificados os mesmos segmentos que ultrapassam o limite de 30% de área trincada ao final do período de projeto. Resultados semelhantes para classe 1 e classe 2 foram

também observados nas pesquisas de Flores e Specht (2019) e em alguns trechos avaliados por Souza Júnior (2018).

Tabela 40 - Comparativo entre o trincamento ao final do período de projeto e a vida útil estimada - classe 2

Seg.	FWD			Viga Benkelman			Comparativo
	TR (%) aos 10 anos	Vida útil		TR (%) aos 10 anos	Vida útil		Diferença $TR_{VB} - TR_{FWD}$
		N	anos		N	anos	
01	17,9	$1,042.10^7$	13,2	33,2	$6,747.10^6$	9,4	15,3
02	18,1	$1,033.10^7$	13,1	22,1	$8,955.10^6$	11,8	4,0
03	76,6	$3,684.10^6$	5,7	44,7	$5,524.10^6$	8,0	-31,9
04	44,8	$5,524.10^6$	8,0	22,8	$8,707.10^6$	11,5	-22,0
05	18,2	$1,033.10^7$	13,1	17,9	$1,042.10^7$	13,2	-0,3
06	31,7	$6,972.10^6$	9,3	27,1	$7,741.10^6$	10,5	-4,6

Estão dispostos na Tabela 41 os resultados alcançados a partir do emprego dos dados da mistura asfáltica classe 3. Ao se comparar as colunas referentes ao trincamento (TR), são verificadas divergências entre os segmentos que ultrapassam 30%, sendo segmentos 03 e 04 com dados do FWD e segmento 03 com a viga Benkelman. Dessa forma, houve uma redução da quantidade de segmentos que ultrapassa o trincamento limite ao final do período de projeto, em comparação com as análises realizadas com as classes 1 e 2. As diferenças entre os percentuais de trincamento foram reduzidas em relação às classes anteriores, mas de maneira discreta. Com relação ao cálculo da vida útil, foram também observadas melhorias, mas ainda modestas, não superiores ao valor de 1 ano com relação à classe 2.

Tabela 41 - Comparativo entre o trincamento ao final do período de projeto e a vida útil estimada - classe 3

Seg.	FWD			Viga Benkelman			Comparativo
	TR (%) aos 10 anos	Vida útil		TR (%) aos 10 anos	Vida útil		Diferença $TR_{VB} - TR_{FWD}$
		N	anos		N	anos	
01	16,6	$1,106.10^7$	13,8	29,3	$7,352.10^6$	10,1	12,7
02	16,8	$1,097.10^7$	13,7	20,1	$9,548.10^6$	12,3	3,3
03	66,4	$4,189.10^6$	6,3	38,8	$6,089.10^6$	8,7	-27,6
04	38,9	$6,089.10^6$	8,7	20,8	$9,377.10^6$	12,2	-18,1
05	16,9	$1,097.10^7$	13,7	16,6	$1,106.10^7$	13,8	-0,3
06	28,1	$7,585.10^6$	10,3	24,3	$8,380.10^6$	11,2	-3,8

Avanços significativos foram observados na Tabela 42 que indica os resultados obtidos com os parâmetros k_1 e k_2 da mistura asfáltica classe 4. Apenas um segmento ultrapassou o limite de 30% de trincamento ao final do período de projeto, sendo o segmento 03 e a partir dos cálculos realizados com os dados do equipamento FWD. Verificaram-se as menores diferenças entre o trincamento calculado a partir do FWD e da viga Benkelman. As melhores estimativas de vida útil também foram alcançadas, totalizando 14,3 anos para ambos os equipamentos no presente estudo. Lopes (2019) também avaliou a vida útil de trechos de pavimentos com base na classe 2 e classe 4 das misturas asfálticas, alcançando melhores resultados a partir de simulações com a mistura classe 4.

Tabela 42 - Comparativo entre o trincamento ao final do período de projeto e a vida útil estimada - classe 4

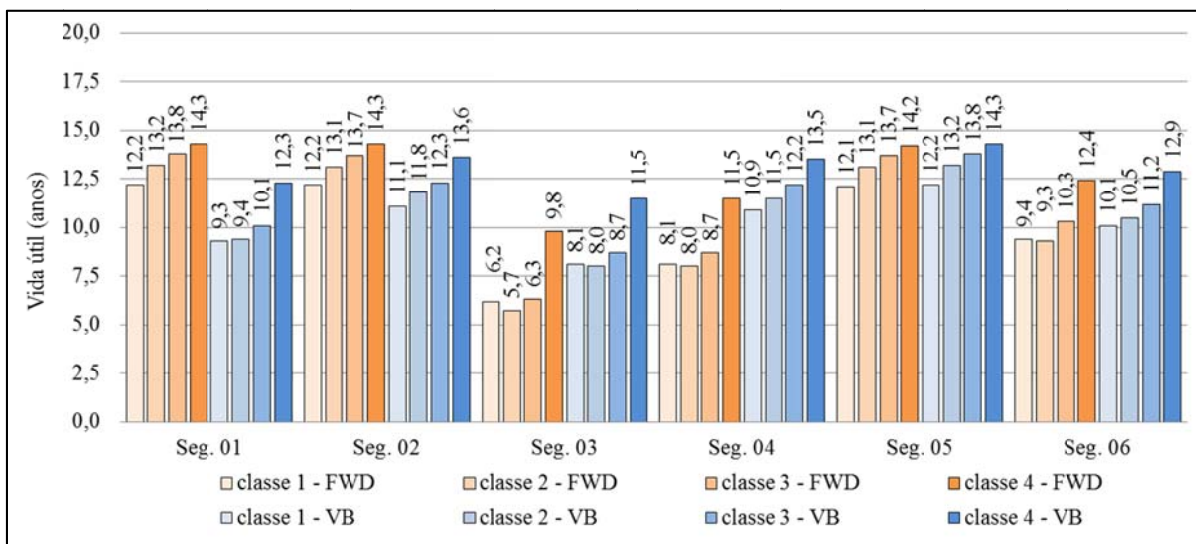
Seg.	FWD			Viga Benkelman			Comparativo
	TR (%) aos 10 anos	Vida útil		TR (%) aos 10 anos	Vida útil		Diferença $TR_{VB} - TR_{FWD}$
		N	anos		N	anos	
01	15,4	$1,171.10^7$	14,3	20,2	$9,548.10^6$	12,3	4,8
02	15,5	$1,171.10^7$	14,3	16,9	$1,088.10^7$	13,6	1,4
03	30,6	$7,123.10^6$	9,8	23,1	$8,707.10^6$	11,5	-7,5
04	23,1	$8,707.10^6$	11,5	17,2	$1,078.10^7$	13,5	-5,9
05	15,6	$1,162.10^7$	14,2	15,4	$1,171.10^7$	14,3	-0,2
06	19,9	$9,634.10^6$	12,4	18,5	$1,016.10^7$	12,9	-1,4

Conforme análises realizadas até o momento, foram verificadas divergências acentuadas nas análises comparativas realizadas através de dados do FWD e dados da viga Benkelman. Estas divergências foram minimizadas quando da avaliação de pavimentos com melhores características estruturais, como nos segmentos 02 e 05.

Na Figura 83 estão sintetizados os resultados obtidos no comparativo entre os equipamentos e as classes de projeto. Nota-se que, ao se realizar análises mecánísticas a partir de dados aferidos com a viga Benkelman, pode estar reduzida a vida útil do pavimento (a exemplo do segmento 01) ou majorada (segmento 03) quando em comparação com o FWD. Os resultados para a vida útil foram muito próximos, para viga Benkelman e FWD, no caso do segmento 05, que foi o segmento para o qual foi realizado o maior número de testes (30 pontos) e houve um dos menores coeficientes de variação ($CV = 14\%$) para as deflexões aferidas com a viga Benkelman. Com relação às classes de misturas asfálticas, verificam-se resultados mais diferenciados a partir do emprego da classe 4 com relação às demais,

principalmente quando em segmentos com menores módulos equivalentes retroanalizados (segmentos 03, 04 e 06).

Figura 83 - Comparativo entre resultados do cálculo de vida útil do pavimento



Na continuidade das análises buscou-se determinar a espessura de revestimento asfáltico (hr) necessária para garantir a vida útil do pavimento de 10 anos, considerando o mínimo de 5 cm e o trincamento limite de 30%. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 43. Em todas as hipóteses, considerando classes 1 até 4, são necessários ajustes na espessura da camada asfáltica para determinados segmentos a depender do equipamento empregado para a aferição das deflexões, seja FWD ou viga Benkelman. As espessuras necessárias para a camada asfáltica (além de 5 cm) estão destacadas na tabela. Novamente são verificadas divergências entre os valores calculados com os dados do FWD e da viga Benkelman. Considerando o FWD como referência em virtude de sua precisão, verifica-se que equívocos podem ser cometidos ao se avaliar o pavimento com base em deflexões e módulos retroanalizados a partir da viga Benkelman, a exemplo da classe 1 e segmento 04, em que se verifica a necessidade de uma camada asfáltica de 9,4 cm, através do FWD, para se atender a vida útil do pavimento, ao passo que com a viga Benkelman haveria o atendimento com 5 cm. Com relação às características das misturas asfálticas, assim como esperado, verificou-se que menores espessuras são necessárias ao se empregar os parâmetros da classe 4, com maior resistência à fadiga.

Conforme Método do DNER (1981) para dimensionamento de pavimentos flexíveis, com base no critério do CBR, a mínima espessura do concreto asfáltico deve ser 7,5 cm, para

o número de repetições do eixo padrão compreendido entre 5.10^6 e 1.10^7 (DNIT, 2006a), que é o intervalo em que se encontra o número N calculado nesta dissertação, resultando em $7,28.10^6$. O método não avalia os parâmetros da mistura asfáltica e a rigidez de cada camada da estrutura do pavimento e, ao indicar a espessura de 7,5 cm para a camada asfáltica, pode ocasionar o dimensionamento excessivo ou inferior ao necessário, ao se comparar com as espessuras informadas na tabela e que foram determinadas com base na análise mecanística-empírica do pavimento.

Tabela 43 - Espessura de revestimento (hr) para a vida útil de 10 anos

Classe 1					Classe 2				
Seg.	FWD		VB		Seg.	FWD		VB	
	hr (cm)	TR (%)	hr (cm)	TR (%)		hr (cm)	TR (%)	hr (cm)	TR (%)
01	5,0	20,6	7,5	28,8	01	5,0	17,9	6,9	28,6
02	5,0	20,8	5,0	24,6	02	5,0	18,1	5,0	22,1
03	11,9	29,7	9,4	29,6	03	11,7	28,4	8,8	30,0
04	9,4	28,4	5,0	25,3	04	8,8	28,7	5,0	22,8
05	5,0	20,9	5,0	20,6	05	5,0	18,2	5,0	17,9
06	6,9	28,3	5,0	29,2	06	6,3	28,1	5,0	27,1

Classe 3					Classe 4				
Seg.	FWD		VB		Seg.	FWD		VB	
	hr (cm)	TR (%)	hr (cm)	TR (%)		hr (cm)	TR (%)	hr (cm)	TR (%)
01	5,0	16,6	5,0	29,3	01	5,0	15,4	5,0	20,2
02	5,0	16,8	5,0	20,1	02	5,0	15,5	5,0	16,9
03	10,7	29,9	8,2	28,9	03	6,3	28,5	5,0	23,1
04	7,9	29,0	5,0	20,8	04	5,0	23,1	5,0	17,2
05	5,0	16,9	5,0	16,6	05	5,0	15,6	5,0	15,4
06	5,0	28,1	5,0	24,3	06	5,0	19,9	5,0	18,5

4.6 COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO PARA REFORÇO

As análises subsequentes referem-se ao comparativo entre espessuras de reforço dos pavimentos calculadas segundo o Método PRO 011/79 e o Método MeDiNa. Estas simulações, de cunho acadêmico, indicam uma situação futura de restauração, a partir de considerações explanadas no capítulo Metodologia, e que refletem o cenário mais otimista (para os resultados obtidos com o Método MeDiNa), frente aos dados que possivelmente sejam inventariados daqui a 10 anos para a estrutura do pavimento a ser restaurada.

Método PRO 011/79

Machado (2019) cita tabelas apresentadas pela ANTT (2017) para o enquadramento de segmentos conforme suas deflexões; nesta classificação, pavimentos com deflexões inferiores a 50 (0,01 mm) são considerados “Ótimos”; entre 50 e 70 (0,01 mm) são “Bons”; entre 70 e 100 (0,01 mm) enquadram-se na classe “Regular” e; pavimentos com deflexões superiores a 100 (0,01 mm) pertencem à classe “Ruim”.

A Tabela 44 indica os resultados obtidos através do dimensionamento realizado conforme norma PRO 011/79. Primeiramente foram calculadas as deflexões máximas previstas para um período de 10 anos conforme equações de desempenho de Marcon (1996) e Oliveira (2007) para as variáveis “idade” (idade do pavimento desde a construção, em anos) e “NA” (número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 tf, calculado pelo método da AASHTO). Considerando-se a “idade” de 10 anos, foram calculados os valores de deflexão 86,41 e 95,51 (0,01 mm), sendo o pavimento classificado como “Regular”. Considerando o número “NA” de projeto, as deflexões calculadas foram 111,93 e 131,90 (0,01 mm), classificando o pavimento como “Ruim”. A deflexão 131,90 (0,01 mm) é considerada alta para a Estrada Rio do Morro e acredita-se que dificilmente seja alcançada pelo pavimento (em virtude de suas ótimas condições atuais) após 10 anos da incidência do tráfego.

Na sequência da aplicação do Método PRO 011/79, foi calculada a deflexão admissível D_{adm} conforme Equação 21 para o novo período de projeto de 10 anos em função do número N_{USACE} igual a $1,18 \cdot 10^7$, obtendo-se $D_{adm} = 58,28$ (0,01 mm). As espessuras de reforço foram determinadas através da Equação 22, variando entre 6,8 e 14,2 cm. 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, 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.

Tabela 44 - Previsão da espessura de reforço segundo DNER-PRO 011/79

Modelo	Equação de desempenho	Deflexão prevista (0,01 mm)	Número N	Dadm (0,01 mm)	K	Espessura de reforço (cm)
Marcon (1996)	22 (variável idade)	95,51	$1,18 \cdot 10^7$	58,28	40	8,6
Marcon (1996)	23 (variável NA)	111,93	$1,18 \cdot 10^7$	58,28	40	11,3
Oliveira (2007)	25 (variável idade)	86,41	$1,18 \cdot 10^7$	58,28	40	6,8
Oliveira (2007)	24 (variável NA)	131,90	$1,18 \cdot 10^7$	58,28	40	14,2

Método MeDiNa

A Tabela 45 apresenta os resultados obtidos a partir do Método MeDiNa para cada segmento 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 anterior.

É notória a diferenciação entre as espessuras calculadas para as classes teóricas. De modo geral, as espessuras calculadas 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 45 - Previsão da espessura de reforço segundo o Método MeDiNa

Local	Espessura de reforço (cm)			
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Seg. 01 FWD	15,0	11,3	7,5	5,0
Seg. 02 FWD	14,7	11,3	7,5	5,0
Seg. 03 FWD	> 15,0	15,0	13,2	10,7
Seg. 04 FWD	> 15,0	13,8	11,7	8,8
Seg. 05 FWD	14,4	10,7	7,5	5,0
Seg. 06 FWD	> 15,0	12,9	10,7	7,5

O MeDiNa limita a camada de reforço em 15 cm, neste caso emite um alerta ao projetista para que seja revisada a estrutura do pavimento. Para os segmentos 03, 04 e 06, o dimensionamento do reforço com mistura asfáltica classe 1 foi complementado com a inclusão de uma camada antirreflexão de trincas (SAMI - *stress absorbing membrane interlayer*) e os resultados estão apresentados na Tabela 46.

Segundo anteriormente informado, os módulos retroanalizados empregados no dimensionamento do reforço segundo o Método MeDiNa traduzem as atuais condições do pavimento e, certamente, após uma futura inspeção para o projeto de restauração, serão

inferiores aos aqui considerados, logo conclui-se que as espessuras dimensionadas para uma futura camada de reforço serão superiores às apresentadas.

Tabela 46 - Previsão da espessura de reforço e camada antirreflexão de trincas

Local	Camada antirreflexão (SAMI)	Reforço (href) classe 1	TR (%)
Seg. 03 FWD	3,0 cm	15,0 cm	31,4
Seg. 04 FWD	2,5 cm	14,6 cm	29,9
Seg. 06 FWD	2,5 cm	13,7 cm	29,7

Discussões

Embora não se consiga precisar os valores de espessura de reforço, 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.

Franco *et al.* (2019) mencionam que as deficiências dos atuais métodos de dimensionamento do DNIT geralmente levam ao sub-dimensionamento da camada de reforço. Enfatizam que as medidas de deflexão não mais se restringem à deflexão máxima, logo a consideração das bacias de deflexão em métodos mecanicistas permite um diagnóstico mais detalhado da condição estrutural do pavimento e, por consequência, um projeto de restauração mais adequado.

Pandolfo, Echeverria e Specht (2016) realizaram um estudo junto ao pavimento da Rodovia BR-472/RS e indicaram que o cálculo das espessuras de reforço através do modelo mecanístico foi mais conservador em relação ao método PRO 011/79. Segundo os autores, para o estudo realizado no trecho compreendido entre as estacas 145+860 a 146+040, constatou-se pelo método PRO 011/79 que o trecho resistiria sem a aplicação de reforço a um N de $1,3 \cdot 10^7$, entretanto pelo método mecanístico seria necessária a aplicação de reforço para obtenção da mesma vida útil.

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.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A avaliação estrutural visa obter informações quanto à adequação do pavimento às solicitações do tráfego e conclusões quanto às necessidades de intervenções. As metodologias de avaliação e os métodos de dimensionamento devem estar atualizados e adequados às características dos pavimentos inspecionados. Neste contexto, ao realizar o comparativo entre medidas de deflexão, módulos retroanalizados, avaliação da vida útil e resultados de dimensionamento de reforço com o *software* MeDiNa, são indicadas as principais conclusões da dissertação:

- Para os segmentos 03, 04 e 06, avaliados estruturalmente a 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.
- Os levantamentos estruturais por meio do FWD apresentaram como principais vantagens a rapidez para obtenção dos dados, menor interferência na pista, maior segurança dos avaliadores, maior sensibilidade na diferenciação das deflexões entre os segmentos avaliados, menores valores de desvio padrão entre as leituras e maior precisão nos resultados na retroanálise, traduzidos pela resposta menos dispersa entre os módulos calculados.
- Tendo em vista que cada equipamento para aferição das deflexões apresenta diferentes configurações de carga e princípios de funcionamento, foram verificadas diferenças entre valores das deflexões aferidas. As variações observadas na dissertação também foram encontradas em estudos semelhantes identificados na literatura.
- Nas medições com o LWD foram obtidas deflexões mais elevadas do que nas medições com o FWD. A variabilidade nos resultados obtidos, principalmente com o LWD e nos segmentos reforçados com areia, não permitiu que se obtivessem correlações bem definidas na comparação entre os dois métodos. Apenas para o segmento 01 foi identificada correlação moderada e significativa entre as leituras com os dois equipamentos.
- As deflexões aferidas com a viga Benkelman foram próximas ou inferiores aos valores medidos com o FWD devido ao baixo nível deflectométrico do pavimento, inferior a

60.10^{-2} mm. A análise estatística entre os valores de deflexão obteve os melhores resultados nas regressões entre os dados obtidos com estes dois equipamentos.

- Não foram obtidos modelos de regressão estatisticamente significantes na comparação entre leituras com a viga Benkelman e o LWD, pois ambos os equipamentos apresentaram maior variabilidade nas leituras de campo.
- Ao se comparar os modelos de regressão obtidos na dissertação com modelos identificados na literatura, observou-se proximidade com as retas de tendência elaboradas em condições muito próximas às da dissertação, como por exemplo, mesma região geológica, nível de deflexão do pavimento, semelhança entre tipos de materiais e espessuras de revestimento asfáltico.
- O *software* BackMeDiNa mostrou-se apropriado para o cálculo da retroanálise a partir dos dados da pesquisa e considerações de cálculo, visto que foram encontrados valores próximos ao resultado de ensaio laboratorial para o módulo do revestimento asfáltico, realizado na oportunidade da obra, assim como valores de módulo identificados em estudos realizados por outros autores.
- Na avaliação das bacias deflectométricas, o segmento 06 esteve em evidência por apresentar baixas deflexões ao longo da linha de influência da deformada. Este comportamento proporcionou maiores valores de módulo ao subleito do segmento 06, o qual é composto por reforço em pedra pulmão.
- A metodologia proposta por Theisen *et al.* (2009) revelou-se adequada para a conversão do carregamento padrão de 8,2 tf empregado nos testes com a viga Benkelman e a inserção dos dados deste ensaio no *software* de retroanálise BackMeDiNa, obtendo-se resultados próximos aos cálculos realizados com o FWD para os dados da pesquisa a exemplo do segmento 05, local em que foram identificadas as maiores semelhanças entre os módulos de elasticidade equivalentes retroanalizados por ambos os equipamentos.
- Buscou-se elaborar modelos de regressão entre os módulos retroanalizados com a viga Benkelman e FWD e para camada do pavimento. Foi obtida fraca correlação para a camada de revestimento asfáltico, discretas melhorias ao se avaliar as camadas de base e sub-base e resultados mais expressivos para a camada de subleito, alcançando-se correlações moderadas. Notou-se a tendência para menores coeficientes de variação (CV) para o módulo do subleito, fato também observado nas pesquisas de Bueno (2016) e Lopes (2019).

- Correlações mais apuradas foram verificadas individualmente para cada equipamento através de gráficos que relacionam deflexões *versus* módulos retroanalizados.
- Assim como verificado por Souza Júnior (2018) e Lopes (2019), os resultados indicaram a importância da análise mecânica para o dimensionamento da estrutura do pavimento. Na presente pesquisa, a depender da curva de fadiga da mistura betuminosa e para determinados segmentos, a vida útil de projeto estipulada em 10 anos não atendeu ao critério de fadiga, ocasionando o trincamento demasiado do pavimento, superior ao limite de 30%.
- A maior variabilidade verificada entre as deflexões aferidas com a viga Benkelman e a menor precisão na determinação das bacias deflectométricas, contribuiu com a maior dispersão dos valores de módulo de elasticidade equivalente obtidos com este equipamento.
- Em virtude dos resultados verificados na pesquisa, não se aconselha o emprego do equipamento viga Benkelman na avaliação mecânica-empírica dos pavimentos, visto que os resultados podem levar ao dimensionamento excessivo ou inferior ao necessário. Exceção se faz nos casos em que houver grande homogeneidade e repetitividade das medidas de deflexão, conforme verificado para o segmento 05 em que ocorreu similaridade com os dados calculados com o FWD.
- É de fundamental importância a caracterização da mistura asfáltica quanto à curva de fadiga, visto que os resultados obtidos com o *software* MeDiNa na avaliação da vida útil do pavimento foram alterados substancialmente de acordo com as equações utilizadas.
- A partir da simulação de um projeto de reforço mediante o método DNER-PRO 011/79 e o método MeDiNa foram identificadas divergências entre resultados para as camadas de reforço e presume-se que as espessuras do Método MeDiNa sejam mais robustas em comparação ao método PRO 011/79, fato também identificado na bibliografia consultada. O método PRO 011/79 não considera as propriedades dos materiais da camada do pavimento, avaliando apenas a deflexão máxima D_0 e o tráfego para o novo período de projeto, desta forma apresentando limitações no cálculo da camada de reforço.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Sequencialmente são relacionadas recomendações para pesquisas futuras que possam complementar a presente dissertação:

- A realização de testes complementares com os equipamentos FWD e LWD em pavimentos delgados e solos da região em estudo;
- A continuidade do monitoramento da Estrada Rio do Morro, mediante um novo conjunto de ensaios deflectométricos em pontos coincidentes com os locais de teste desta pesquisa, avaliando-se o desempenho do pavimento e comparando-se os novos resultados com aqueles aqui encontrados;
- A realização de ensaios laboratoriais para a determinação do módulo de resiliência dos materiais empregados nas camadas do pavimento da Estrada Rio do Morro e a confrontação destes resultados com os valores obtidos por retroanálise;
- Acompanhar o surgimento e a propagação das trincas no pavimento, comparando-se os resultados de campo com as simulações realizadas por meio do *software* MeDiNa, para as quais se sugere a realização de ensaios de laboratório com os materiais asfálticos do revestimento para fins de obtenção dos parâmetros de regressão k_1 e k_2 da equação de fadiga.

REFERÊNCIAS

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

ANDRADE, Lucas Rodrigues de; VASCONCELOS, Kamila L.; BERNUCCI, Liedi Bariani. Avaliação do comportamento estrutural de pavimentos por meio de adoção de parâmetros de bacia deflectométrica. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 30., 2016, Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/324653347>>. Acesso em: 5 nov. 2020.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM E2835-11**: Standard test method for measuring deflections using a portable impulse plate load test device. 2015.

AYYANCHIRA, Mihir Murari. Introduction of light weight deflectometer. **International Journal of Engineering Research & Technology**, Gandhinagar, v. 3, n. 4, p. 303-305, abr. 2014. Disponível em: <<https://www.ijert.org/phocadownload/.../IJERTV3IS040740.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2018.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos asfálticos**: patologias e manutenção. São Paulo: Plêiade, 1997.

_____. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

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

BORGES, Clarissa Beatriz Sandoval. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. 2001. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/79447/188421.pdf?sequence>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

BUENO, Lucas Dotto. **Avaliação deflectométrica e de rigidez: estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria / RS**. 2016. 460 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7926/BUENO,%20LUCAS%20DOTTO.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 3 dez. 2019.

BURHANI, Ahmadudin. **Correlation study on the Falling Weight Deflectometer and Light Weight Deflectometer for the local pavement systems**. 2016. 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, Athens, 2016. Disponível em: <https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=ohiou1470663356&disposition=inline>. Acesso em: 18 jul. 2019.

CAMARINI, Guilherme Crepaldi; SILVA JUNIOR, Carlos Alberto Prado da; FONTENELE, Heliana Barbosa. Avaliação de bacias de deflexões retroanalizadas pelo programa BackMeDiNa (2018). In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE

DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. Disponível em: <<http://www.anpet.org.br/anais/?=Dimensionamento,%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20e%20Gest%C3%A3o%20de%20Pavimentos%20I>>. Acesso em: 4 jun. 2020.

CHIARELLO, Gabriéli Pires; PASCOAL, Paula Taiane; SANTOS, Thaís Aquino dos; PEREIRA, Deividi da Silva; BARONI, Magnos; GERGING Rafael Parmeggiani. Avaliação estrutural e financeira de pavimento flexível dimensionado pelo método do DNER (1981) e MeDiNa (2019): estudo de caso da duplicação da BR-287 - trecho Santa Cruz do Sul à Tabai/RS. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. Disponível em: <<http://www.anpet.org.br/anais/?=Dimensionamento,%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20e%20Gest%C3%A3o%20de%20Pavimentos%20I>>. Acesso em: 4 jun. 2020.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2018**: relatório gerencial. Brasília: SEST, SENAT, 2018. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>>. Acesso em: 07 out. 2019.

DAER-RS - Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **IS-110/10**: Instrução de serviço para estudos de tráfego. Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<https://www.daer.rs.gov.br/instrucoes-de-servico-projeto>>. Acesso em: 31 jul. 2020.

_____. **IS-112/17**: Instrução de serviço para estudos e projetos CREMA. Porto Alegre, 2017. Disponível em: <<https://www.daer.rs.gov.br/instrucoes-de-servico-projeto>>. Acesso em: 31 jul. 2020.

DEINFRA-SC - Departamento Estadual de Infraestrutura. **Projeto de Implantação**. Fase de Projeto Final de Engenharia. Estrada Rio do Morro. Trecho Joinville - BR-280. Joinville, 2009.

_____. **Relatórios mensais de supervisão das obras**. Estrada Rio do Morro. Trecho Joinville - BR-280. 2014.

_____. **DEINFRA-SC ES-P 05/16**: Pavimentação: camadas de misturas asfálticas usinadas a quente. Florianópolis, 2016. Disponível em: <<https://www.sie.sc.gov.br/doctecnicos#pane-C>>. Acesso em: 06 out. 2020.

_____. **Projeto de Implantação**. Fase de Projeto Final de Engenharia. Estrada Rio do Morro. Trecho Joinville - BR-280. 2017.

_____. **Relatório mensais de supervisão das obras**. Estrada Rio do Morro. Trecho Joinville - BR-280. 2019.

DER-SP - Departamento de Estradas de Rodagem. **IP-DE-P00/001**: Projeto de pavimentação: instrução de projeto. São Paulo, 2006a. Disponível em: <ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-P00-001_A.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2020.

_____. **IP-DE-P00/003**: Avaliação funcional e estrutural do pavimento: instrução de projeto. São Paulo, 2006b. Disponível em: <ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-P00-003_A.pdf>. Acesso em: 12 out. 2019.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-PRO 011/79**: Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis: Procedimento - B. Rio de Janeiro, 1979. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dner-pro011-79.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2020.

_____. **DNER-ME 024/94**: Pavimento - determinação das deflexões pela viga Benkelman: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me024-94.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

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

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes / IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **DNIT 133/2010 - ME**: Pavimentação asfáltica - delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010a. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit133_2010_me.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2018.

_____. **DNIT 132/2010 - PRO**: Pavimentos - calibração da célula de carga e de sensores de deflexão dos deflectômetros do tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”: procedimento. Rio de Janeiro, 2010b. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit132_2010_pro.pdf>. Acesso em: 24 out. 2018.

_____. **DNIT 134/2018 - ME**: Pavimentação - solos - determinação do módulo de resiliência: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018a. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/DNIT1342018ME.pdf>>. Acesso em: 04 out. 2019.

_____. **DNIT 135/2018 - ME**: Pavimentação asfáltica - misturas asfálticas - determinação do módulo de resiliência: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018b. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/copy_of_DNIT1352018ME.pdf>. Acesso em: 04 out. 2019.

_____. **Manual de pavimentação**. Publicação IPR - 719. Rio de Janeiro, 2006a. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/719_manual_de_pavimentacao.pdf>. Acesso em: 13 set. 2018.

_____. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Publicação IPR - 720. Rio de Janeiro, 2006b. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/720_manual_restauracao_pavimentos_afalticos.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2018.

_____. **Manual de estudos de tráfego**. Publicação IPR - 723. Rio de Janeiro, 2006c. Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/723_manual_estudos_trafego.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2020.

_____. **Manual de gerência de pavimentos**. Publicação IPR - 745. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/745_manual_de_gerencia_de_pavimentos.pdf>. Acesso em: 13 out. 2019.

ELHAKIM, Amr F.; ELBAZ, Khaled; AMER, Mohamed I. The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction. **HBRC Journal**, [S.l.], v. 10, n. 3, p. 298-307, dez. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.12.003>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

FERRI, Santi. **Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos defletoométricos**. 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: 04 set. 2018.

FLEMING, Paul R.; FROST, Matthew W.; LAMBERT, John P., 2007. Review of lightweight deflectometer for routine in situ assessment of pavement material stiffness. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, p. 80-87, 2004. Disponível em: <<https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/3523/1/trb%20lwd%2007.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2018.

FLORES, Guilherme Ceretta; SPECHT, Luciano Pivoto. Aplicação do software MeDiNa na análise e no projeto de reforço de pavimentos. In: GEORS - SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, 10., 2019, Santa Maria. Disponível em: <Geors2019.com.br/baixar/121>. Acesso em: 26 fev. 2020.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV**. 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Ciências)-Universidade Federal do Rio de Janeiro / Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/151-2007/1107-filipe-augusto-cinque-de-proenca-franco>>. Acesso em: 14 maio 2018.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Guia para utilização de método mecânico-empírico**: apresentação dos programas desenvolvidos. Relatório Parcial IV(A). Convênio UFRJ/DNIT. Projeto DNIT TED n. 682/2014. 2018. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manual-de-utilizacao-medina.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2019.

_____. **Manual para utilização de método mecânico-empírico MeDiNa**: apresentação dos programas. Convênio UFRJ/DNIT. Projeto DNIT TED n. 682/2014. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-versao-114>>. Acesso em: 28 out. 2020.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença; UBALDO, Mariluce de Oliveira; FRITZEN, Marcos Antonio; LIMA, Caroline Dias Amancio de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. Análise de projeto de reforço utilizando o método M-E de dimensionamento nacional MeDiNa. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. Disponível em: <<http://www.anpet.org.br/33anpet/index.php/pt/infraestrutura>>. Acesso em: 8 ago. 2020.

FRITZEN, Marcos Antonio. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos**. 2016. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio de Janeiro / Instituto Alberto Luiz Coimbra de

Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/391-2016/4707-marcos-antonio-fritzen>>. Acesso em: 19 fev. 2020.

GOMES, Luiz Henrique Costa; ALBERNAZ, Cláudio Ângelo Valadão; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar. Equivalência operacional entre equipamentos utilizados para avaliação estrutural de pavimentos. **Revista Pavimentação**, Associação Brasileira de Pavimentação ABPv, Rio de Janeiro, ano 9, n. 31/32, p. 46-55, jan-jun. 2014.

GOMES, Luiz Henrique Costa. **Equivalência operacional entre equipamentos deflectométricos - estudo de caso em rodovia localizada em Ouro Branco - MG**. 2012. 86 f. 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: 15 ago. 2018.

GRASMICK, Jacob G.; MOONEY, Michael A.; SENSENEY, Christopher T.; SURDAHL, Roger W.; VOTH, Michael. Comparison of multiple sensor deflection data from lightweight and falling weight deflectometer tests on layered soil. **Geotechnical Testing Journal**, [S.l.], v. 38, n. 6, p. 851-863, nov. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1520/GTJ20140172>>. Acesso em: 25 out. 2018.

HE, Li; LIN, Hong; ZOU Qin; ZHANG Dejin. Accurate measurement of pavement deflection velocity under dynamic loads. **Automation in Construction**, [S.l.], v. 83, p. 149-162, nov. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0926580517307331?via%3Dihub>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

HORAK, Emile. Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. **Journal of the South African Institution of Civil Engineers**, Joanesburgo, v. 50, n. 2, p. 2-9, jun. 2008. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/228663228>>. Acesso em: 05 nov. 2020.

HORAK, Emile; MAINA, J.; GUIAMBA, D.; HARTMAN, A. Correlation study with the light weight deflectometer in South Africa. In: SOUTHERN AFRICAN TRANSPORT CONFERENCE, 27., 2008, Pretoria, South Africa.

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: 25/02/2020.

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

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: 31 out. 2018.

MACHADO, Thiago Fávero de Oliveira. **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 em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Juiz de Fora, 2019. Disponível em: <<https://www2.ufjf.br/pec/dissertacoes/>>. Acesso em: 01 abr. 2020.

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: 31 out. 2018.

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

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://www-sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0950061817300028?via%3Dihub>>. Acesso em: 25 out. 2018.

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

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Rio de Janeiro: LTCF, 6ª ed., 2018.

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: 10 ago. 2018.

OBAZEE-IGBINEDION, Stella O.; OWOLABI, Oludare. Pavement sustainability index for highway infrastructures: a case study of Maryland. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, [S.l.], v. 12, n. 2, p. 192-200, jun. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11709-017-0413-y>>. Acesso em: 31 out. 2018.

OLIVEIRA, Alexandre de. **Contribuição à avaliação do desempenho dos pavimentos na região de rochas de embasamento cristalino em Santa Catarina**. 2007. 366 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: <<http://rodoviasverdes.paginas.ufsc.br/files/2010/04/Alexandre-de-Oliveira.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2018.

PANDOLFO, Daniel Koscrevic; ECHEVERRIA, José Antônio Santana; SPECHT, Luciano Pivoto. Análise mecanística de um pavimento flexível restaurado a partir do MR obtido em diferentes softwares de retroanálise com dados de viga Benkelman. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 3, p. 71-82, 2016. Disponível em: <<https://seer.imed.edu.br/index.php/revistaec/article/view/1593>>. Acesso em 24 mar. 2020.

PATERSON, W. D. O. **Road deterioration and maintenance effects**: models for planning and management. The Highway Design and Maintenance Standards Series. World Bank, The Johns Hopkins University Press. Maryland, Baltimore, 1987.

PINTO, Paulo C.; TAFFE JR., Elemar J.; GARCIA, Felipe T.; BITENCOURT, Francieli; PASSOS, Maria C.; BIANCHINI, Mara R. Metodologias de avaliação e diagnóstico da rede pavimentada do DAER-RS. **Revista Estradas**, Sociedade dos Técnicos Universitários do DAER / Sociedade dos Engenheiros Civis do DAER, Porto Alegre, ano 12, n. 18, p. 30-37, out. 2013. Disponível em: <<https://issuu.com/revistaestradas/docs/re18>>. Acesso em 30 out. 2018.

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto. **Pavimentação rodoviária**: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro: Synergia, IBP, 2ª ed., 2010.

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: 15 set. 2018.

ROCHA, Marcos Lamha. **Influência dos módulos de resiliência iniciais no procedimento de retroanálise de pavimentos flexíveis**. 2020. 244 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Juiz de Fora, 2020. Disponível em: <<https://www2.ufjf.br/pec/dissertacoes/>>. Acesso em: 05 nov. 2020.

RODRIGUES, Thays Nogueira. **Estudo comparativo do CBR “in situ” & LWD para determinação da capacidade de suporte de subleitos**. 2017. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017. Disponível em: <<http://ppgeca.ufcg.edu.br/dissertacoes-menu/dissertacoes-2017/send/17-dissertacoes-2017/37-estudo-comparativo-do-cbr-in-situ-lwd-para-determinacao-da-capacidade-de-suporte-de-subleitos>>. Acesso em: 10 ago. 2018.

RODRIGUES, Paulo Roberto. **Medidas de deflexão em pavimentos asfálticos urbanos com o deflectômetro de peso leve**. 2018. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2018. Disponível em: <https://www.udesc.br/arquivos/cct/id_cpmenu/706/2018_12_12_Paulo_Roberto_Rodrigues_15625993199081_706.pdf>. Acesso em: 20 set. 2019.

SALVIANO, Willian Renan de Araújo. **Análise do controle construtivo de um pavimento semirrígido por deflexão**. 2015. 271 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/en/documents2/mestrado/2015/2616-salviano-wra-tm-15-pdf>. Acesso em: 16 ago. 2018.

SANTOS, Adriana Goulart dos. **Estudo do comportamento resiliente de três solos da região de Campo Grande-MS e de relações entre o módulo de resiliência e resultados de ensaios de compressão simples**. 2003. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Escola de Engenharia de São Paulo / Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-06102009-093939/publico/1.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2018.

SANTOS, Paulo José Café Ribeiro dos. **Utilização de deflectômetro de peso leve (LWD) em pavimento rodoviário**. 2014. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)-Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://transportes.ime.eb.br/DISSERTA%C3%87%C3%95ES.htm>>. Acesso em: 15 set. 2018.

SOUZA JÚNIOR, José Geraldo de. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal**. 2018. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio de Janeiro / Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2018/3240-junior-jgs-tm-18-1>>. Acesso em: 11 out. 2019.

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

TMR - Queensland Department of Transport and Main Roads / Pavements, Materials & Geotechnical Branch. **Pavement rehabilitation manual**. Brisbane, 2012. Disponível em: <<https://www.tmr.qld.gov.au/business-industry/Technical-standards-publications/Pavement-Rehabilitation-Manual.aspx>>. Acesso em: 15 set. 2018.

VIEIRA, Gustavo Henrique Veronese. **Avaliação estrutural de pavimentos urbanos a partir de ensaios de campo e retroanálise**. 2020. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020. Disponível em: <https://www.udesc.br/arquivos/cct/id_cpmenu/706/2020_05_15_Gustavo_Henrique_Veronese_Vieira_15948262939816_706.pdf>. Acesso em: 03 out. 2020.

ZHENG, Yuanxun; ZHANG, Peng; LIU, Heng. Correlation between pavement temperature and deflection basin form factors of asphalt pavement. **International Journal of Pavement Engineering**, [S.l.], v. 20, n. 8, p. 874-883, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1356172>>. Acesso em: 12 out. 2019.

APÊNDICE A - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE TESTE

Tabela 47 - Localização dos pontos de teste

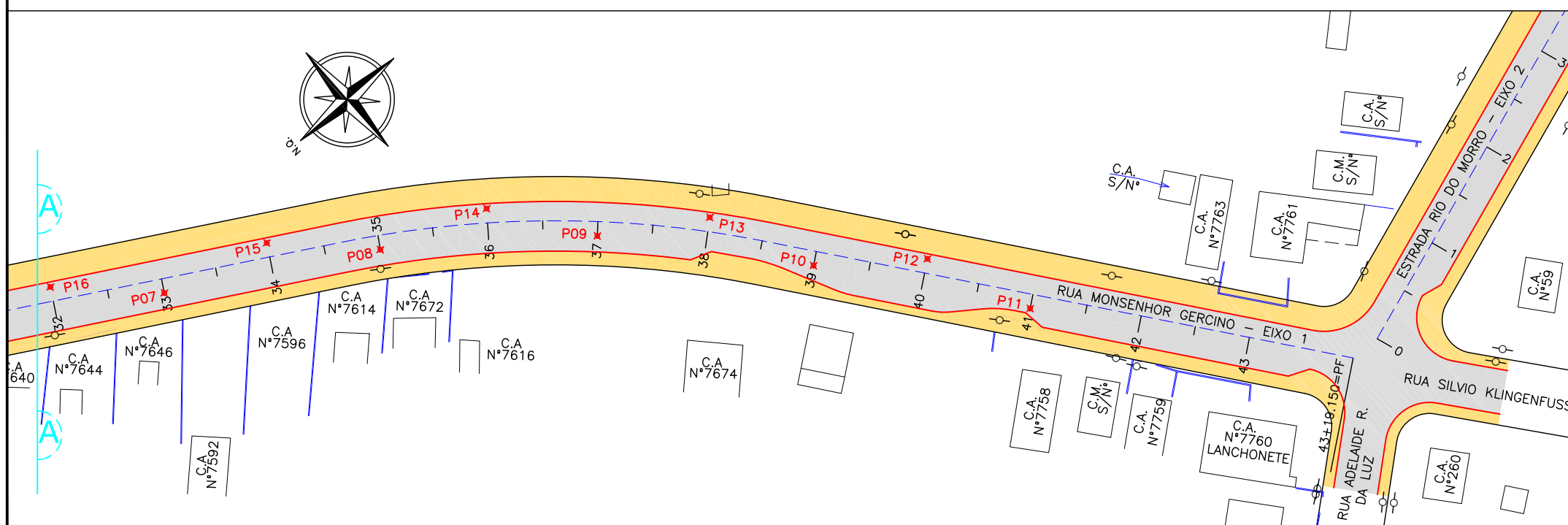
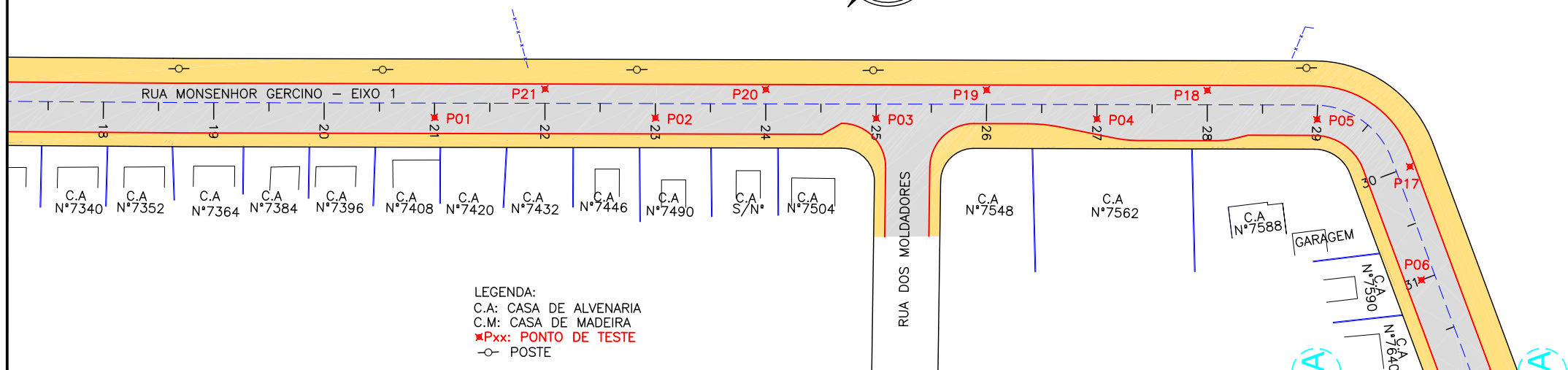
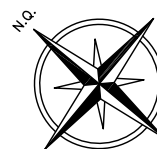
Ponto	Eixo	Estaca	Lado	Coordenada E	Coordenada N
01	1	21+0	direito	720755.464	7083619.075
02	1	23+0	direito	720780.436	7083587.828
03	1	25+0	direito	720805.407	7083556.580
04	1	27+0	direito	720830.378	7083525.332
05	1	29+0	direito	720855.273	7083494.162
06	1	31+0	direito	720844.403	7083461.217
07	1	33+0	direito	720823.877	7083426.884
08	1	35+0	direito	720803.297	7083392.693
09	1	37+0	direito	720778.630	7083361.973
10	1	39+0	direito	720748.253	7083336.661
11	1	41+0	direito	720716.055	7083312.928
12	1	40+0	esquerdo	720735.239	7083320.609
13	1	38+0	esquerdo	720767.376	7083344.654
14	1	36+0	esquerdo	720795.807	7083373.444
15	1	34+0	esquerdo	720818.078	7083407.050
16	1	32+0	esquerdo	720838.603	7083441.382
17	1	30+0	esquerdo	720859.128	7083475.714
18	1	28+0	esquerdo	720846.926	7083512.954
19	1	26+0	esquerdo	720821.955	7083544.202
20	1	24+0	esquerdo	720796.984	7083575.450
21	1	22+0	esquerdo	720772.012	7083606.698
22	2	19+0	direito	720786.338	7082924.760
23	2	21+0	direito	720820.259	7082902.599
24	2	23+0	direito	720857.625	7082887.026
25	2	25+0	direito	720897.271	7082878.570
26	2	27+0	direito	720937.137	7082874.753
27	2	26+0	esquerdo	720917.556	7082882.049
28	2	24+0	esquerdo	720878.360	7082887.560
29	2	22+0	esquerdo	720840.826	7082899.157
30	2	20+0	esquerdo	720806.109	7082917.730
31	2	18+0	esquerdo	720774.360	7082941.625
32	2	58+0	direito	721357.461	7082539.371
33	2	60+0	direito	721357.921	7082499.391
34	2	62+0	direito	721358.611	7082459.395
35	2	64+0	direito	721359.219	7082419.402
36	2	65+0	esquerdo	721365.223	7082399.524
37	2	63+0	esquerdo	721364.631	7082439.481
38	2	61+0	esquerdo	721364.057	7082479.477
39	2	59+0	esquerdo	721363.484	7082519.472

Ponto	Eixo	Estaca	Lado	Coordenada E	Coordenada N
40	2	57+0	esquerdo	721362.588	7082559.521
41	2	100+15	direito	721283.401	7081782.319
42	2	101+3	direito	721278.547	7081775.960
43	2	103+5	direito	721253.045	7081742.546
44	2	104+5	direito	721240.931	7081726.674
45	2	104+5	esquerdo	721245.462	7081723.216
46	2	103+5	esquerdo	721257.597	7081739.114
47	2	101+0	esquerdo	721284.898	7081774.886
48	2	100+5	esquerdo	721293.999	7081786.810
49	2	160+10	direito	721662.396	7080828.310
50	2	161+10	direito	721672.303	7080810.722
51	2	162+10	direito	721683.359	7080793.833
52	2	163+10	direito	721695.516	7080777.718
53	2	164+10	direito	721708.720	7080762.448
54	2	165+10	direito	721722.911	7080748.093
55	2	166+10	direito	721738.028	7080734.714
56	2	170+0	direito	721796.898	7080696.022
57	2	171+0	direito	721814.769	7080686.852
58	2	172+0	direito	721832.820	7080678.126
59	2	173+0	direito	721850.933	7080669.621
60	2	173+10	esquerdo	721862.399	7080670.496
61	2	172+10	esquerdo	721844.371	7080679.107
62	2	171+10	esquerdo	721826.259	7080687.582
63	2	170+10	esquerdo	721808.404	7080696.440
64	2	169+10	esquerdo	721790.861	7080705.820
65	2	166+0	esquerdo	721734.136	7080745.546
66	2	165+0	esquerdo	721719.750	7080759.159
67	2	164+0	esquerdo	721706.302	7080773.701
68	2	163+0	esquerdo	721693.854	7080789.107
69	2	162+0	esquerdo	721682.459	7080805.307
70	2	161+0	esquerdo	721672.169	7080822.231
71	2	330+0	direito	723398.129	7078349.234
72	2	332+0	direito	723422.508	7078317.550
73	2	334+0	direito	723446.579	7078285.630
74	2	336+0	direito	723470.859	7078253.841
75	2	338+0	direito	723494.911	7078221.864
76	2	340+0	direito	723519.098	7078190.022
77	2	342+0	direito	723543.295	7078158.148
78	2	344+0	direito	723567.653	7078126.370
79	2	346+0	direito	723594.105	7078095.985
80	2	348+0	direito	723625.242	7078070.259
81	2	350+0	direito	723658.550	7078048.085
82	2	352+0	direito	723689.978	7078024.149

Ponto	Eixo	Estaca	Lado	Coordenada E	Coordenada N
83	2	354+10	direito	723718.889	7077984.759
84	2	356+0	direito	723728.817	7077957.153
85	2	358+0	direito	723732.710	7077918.175
86	2	359+0	esquerdo	723736.393	7077897.722
87	2	357+0	esquerdo	723737.547	7077938.322
88	2	355+0	esquerdo	723727.820	7077977.810
89	2	353+0	esquerdo	723707.491	7078013.020
90	2	351+0	esquerdo	723678.289	7078041.179
91	2	349+0	esquerdo	723645.116	7078063.956
92	2	347+0	esquerdo	723612.694	7078086.851
93	2	345+0	esquerdo	723584.525	7078114.396
94	2	343+0	esquerdo	723559.910	7078145.650
95	2	341+0	esquerdo	723535.691	7078177.501
96	2	339+0	esquerdo	723511.601	7078209.412
97	2	337+0	esquerdo	723487.328	7078241.217
98	2	335+0	esquerdo	723463.238	7078273.146
99	2	333+0	esquerdo	723439.068	7078305.024
100	2	331+0	esquerdo	723414.887	7078336.885
101	2	376+0	direito	723641.345	7077571.379
102	2	377+0	direito	723634.464	7077552.600
103	2	378+0	direito	723627.583	7077533.821
104	2	379+0	direito	723620.701	7077515.042
105	2	380+5	direito	723612.100	7077491.568
106	2	381+0	direito	723606.939	7077477.484
107	2	382+0	direito	723600.057	7077458.705
108	2	383+0	direito	723593.176	7077439.926
109	2	384+0	direito	723586.295	7077421.147
110	2	385+0	direito	723579.413	7077402.369

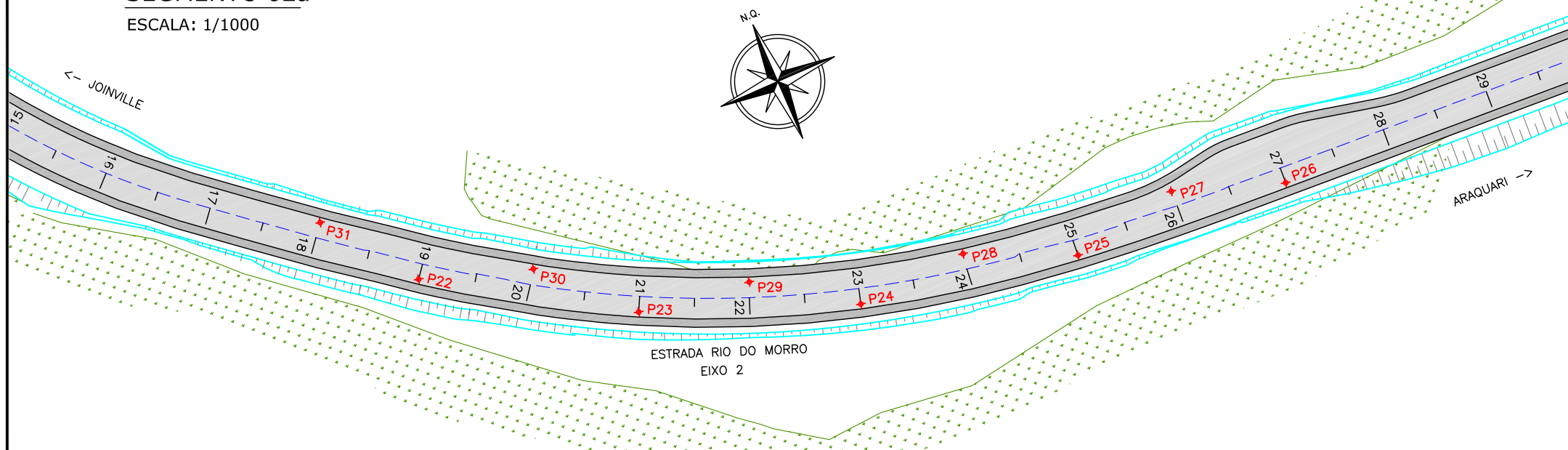
SEGMENTO 01

ESCALA: 1/1000



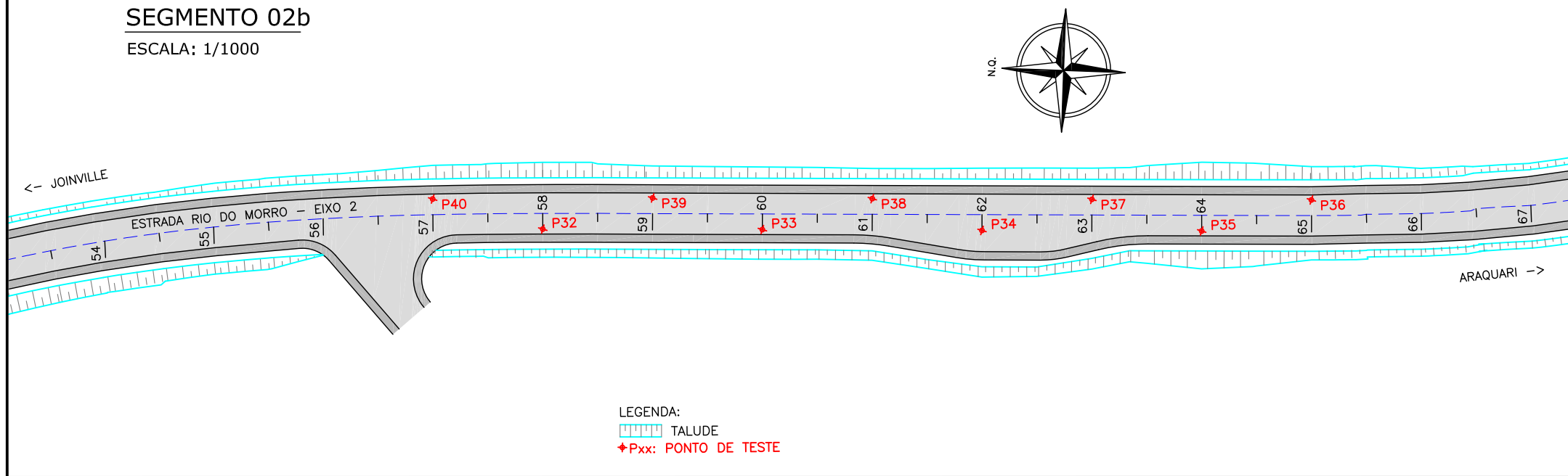
SEGMENTO 02a

ESCALA: 1/1000



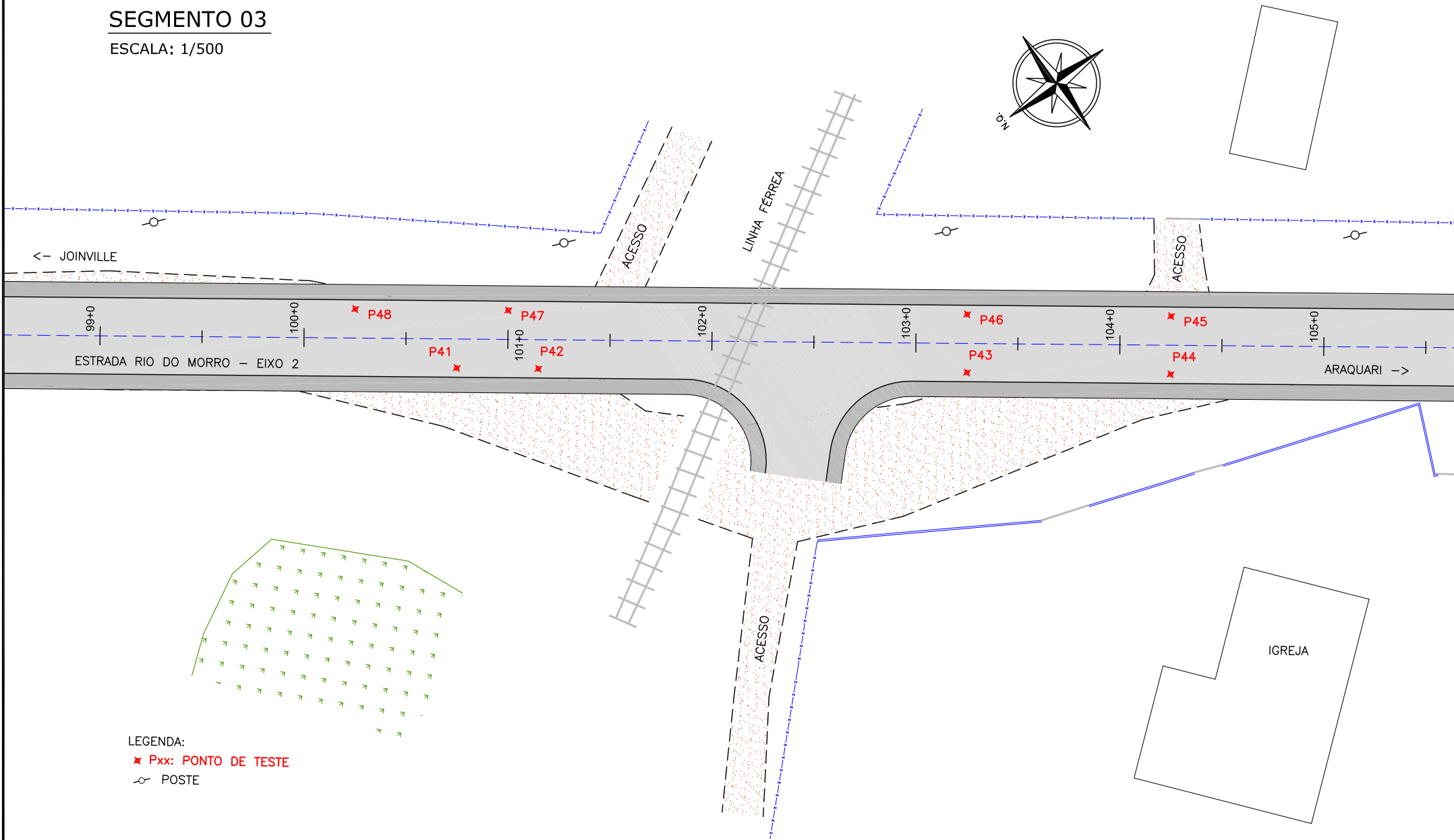
SEGMENTO 02b

ESCALA: 1/1000



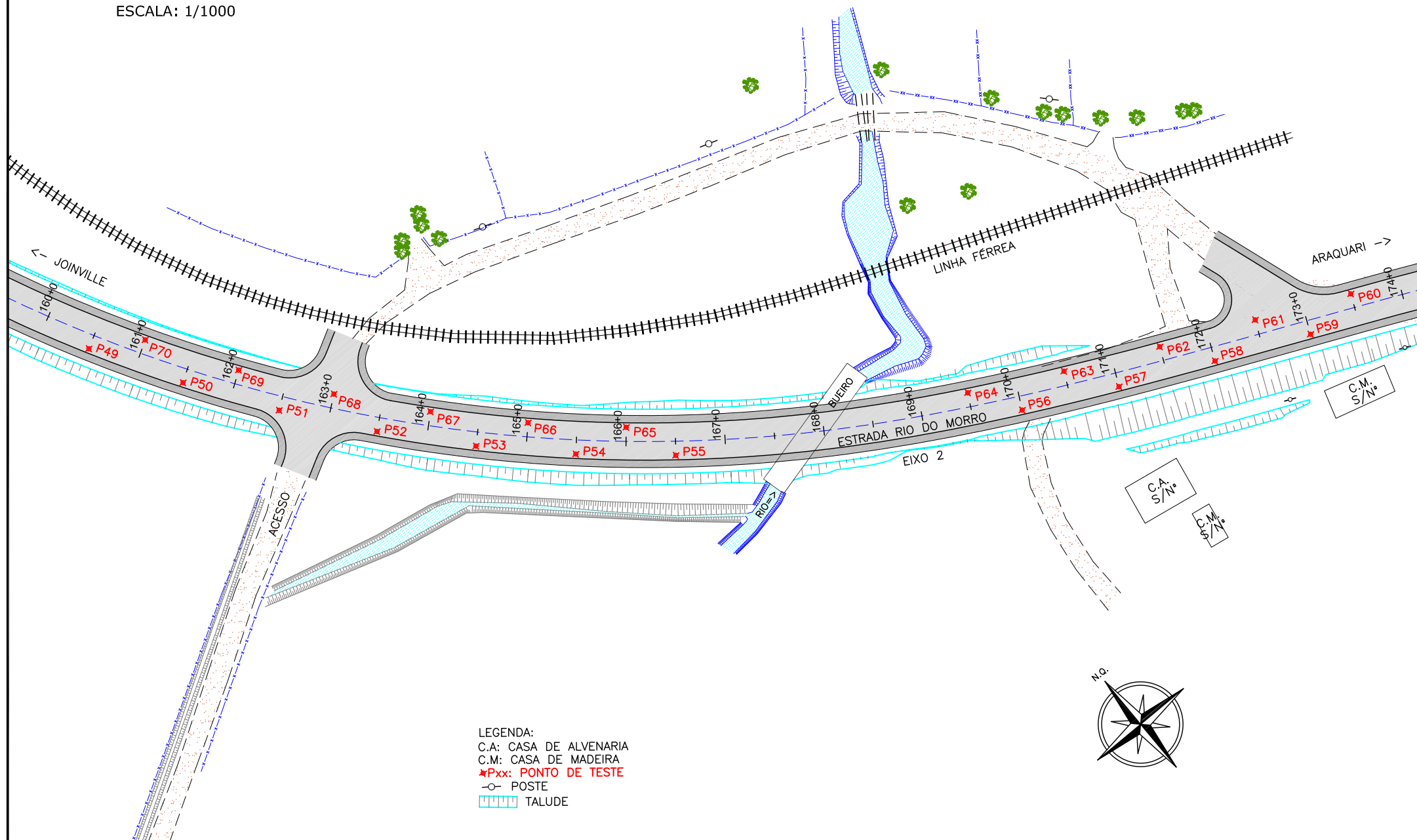
SEGMENTO 03

ESCALA: 1/500



SEGMENTO 04

ESCALA: 1/1000

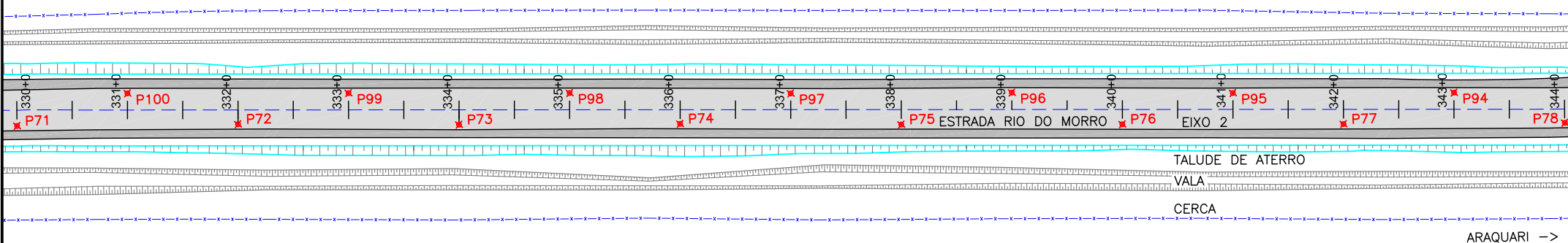


SEGMENTO 05

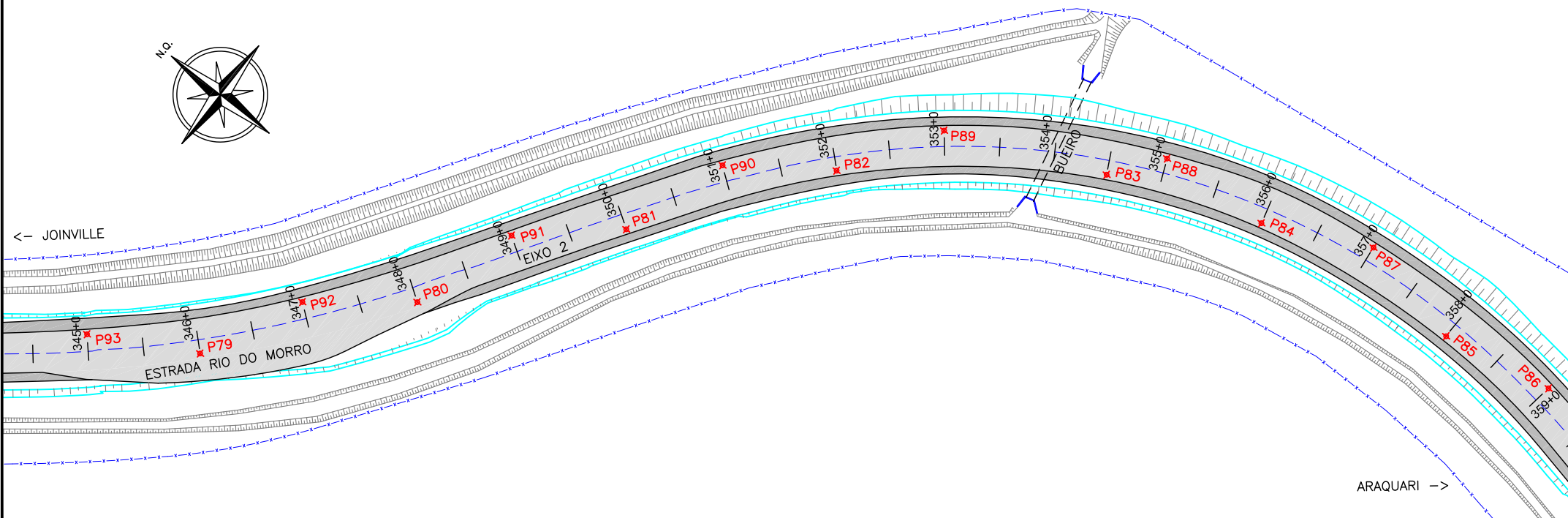
ESCALA: 1/1000



<- JOINVILLE

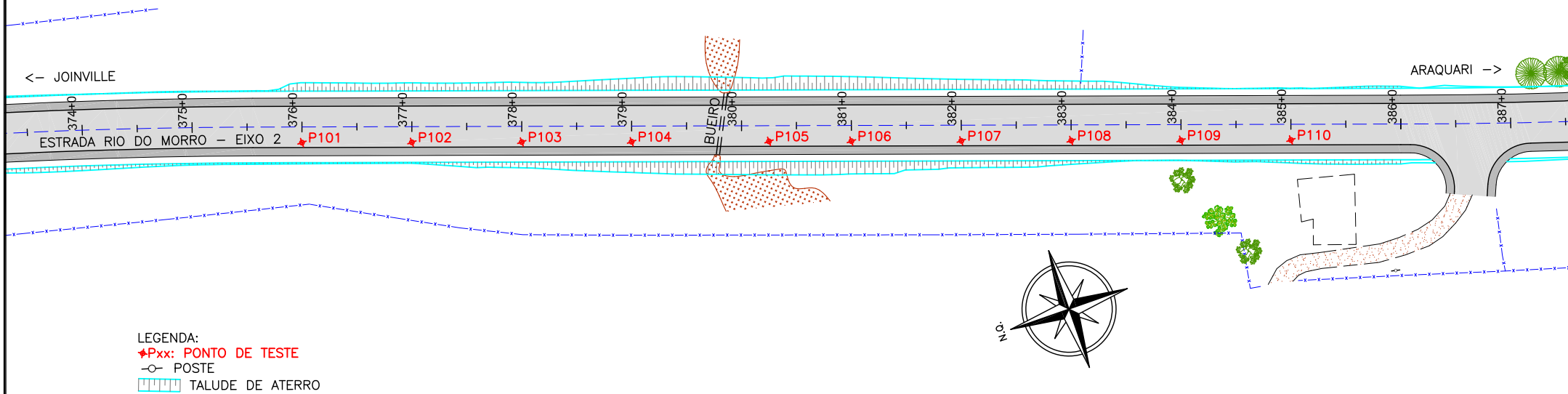


<- JOINVILLE



SEGMENTO 06

ESCALA: 1/1000



APÊNDICE B - DADOS OBTIDOS - FWD

Tabela 48 - Dados obtidos com o equipamento FWD

Ponto	Carga (Kgf)	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Temperatura		Data:
		FWD D0	FWD D1	FWD D2	FWD D3	FWD D4	FWD D5	FWD D6	Ar	Pav.	06/06/19
		(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)			Hora
SEGMENTO 01											
01	4160	45,8	34,3	28,0	20,8	16,5	11,5	8,5	21	22	13:08
02	4138	26,5	19,6	15,9	11,7	9,7	7,4	6,0	21	22	13:11
03	4023	26,8	19,9	15,8	11,4	9,0	6,2	4,8	21	22	13:12
04	4060	39,5	29,1	22,7	15,9	12,1	8,3	6,2	21	22	13:13
05	4038	42,2	29,2	21,5	14,6	10,9	7,6	6,0	21	22	13:14
06	4186	41,9	31,2	24,7	17,5	13,2	8,8	6,5	21	22	13:15
07	4060	28,1	20,4	15,4	10,0	7,2	4,5	3,5	21	22	13:16
08	4051	38,1	28,3	22,5	15,3	11,3	7,1	5,3	21	22	13:17
09	4124	28,0	21,1	16,9	12,0	9,3	6,1	4,7	21	22	13:17
10	4065	31,1	23,3	18,1	12,7	10,2	7,1	5,6	21	22	13:18
11	4144	32,0	22,8	17,0	11,3	8,5	5,3	4,1	21	22	13:20
12	4164	28,2	20,3	16,0	11,5	9,3	6,8	5,6	21	22	13:27
13	4128	33,9	25,5	20,1	14,3	11,3	7,4	5,7	21	22	13:27
14	4149	40,3	28,3	21,0	13,9	10,2	6,2	4,9	21	22	13:28
15	4202	40,9	29,7	22,7	15,0	10,8	6,3	4,6	21	22	13:29
16	4117	34,8	25,1	19,3	12,7	9,6	6,2	5,1	21	22	13:30
17	4172	42,2	31,9	25,7	18,0	13,9	8,9	6,8	21	22	13:31
18	4113	40,6	29,9	23,8	17,7	14,3	10,1	8,1	21	22	13:32
19	4107	30,2	22,3	17,8	12,7	10,2	7,4	6,2	21	23	13:33
20	4035	38,2	28,3	22,6	15,7	12,7	9,0	7,2	21	23	13:33
21	4055	42,2	32,6	27,3	20,6	17,5	12,2	9,6	21	22	13:34
SEGMENTO 02											
22	4125	31,0	22,0	16,1	10,6	7,7	4,5	3,3	22	23	13:51
23	4218	31,3	22,4	17,1	12,1	9,4	6,1	4,7	22	23	13:53
24	4166	31,6	22,8	17,4	12,4	9,6	6,1	4,7	22	23	13:54
25	4175	31,2	23,0	17,9	12,6	9,9	6,4	5,0	22	23	13:56
26	4123	37,7	27,1	20,0	13,3	10,1	6,4	4,9	22	23	13:56
27	4176	37,7	27,4	20,7	14,2	10,6	6,7	5,2	23	24	14:06
28	4154	37,0	28,0	22,1	15,6	12,0	7,6	5,8	23	24	14:07
29	4132	35,7	26,4	20,3	14,0	10,7	6,9	5,1	23	24	14:08
30	4162	35,4	26,2	19,6	13,1	9,8	6,5	4,9	23	24	14:09
31	4034	32,4	23,1	17,4	11,3	8,3	5,2	4,0	22	24	14:10
32	4209	32,5	23,4	18,0	12,7	9,8	6,5	4,9	23	24	14:20
33	4117	30,4	21,5	16,1	11,3	9,0	6,1	4,8	21	24	14:21
34	4049	30,0	22,0	17,0	12,1	9,3	6,0	4,5	23	24	14:21

Ponto	Carga (Kgf)	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Temperatura		Data:
		FWD D0	FWD D1	FWD D2	FWD D3	FWD D4	FWD D5	FWD D6	Ar	Pav.	06/06/19
		(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)			Hora
35	4169	20,6	15,0	12,0	9,8	9,0	6,5	4,8	19	24	14:22
36	4221	35,5	25,7	19,4	13,2	9,8	5,8	4,1	23	25	14:25
37	4076	32,2	22,7	16,8	11,5	8,7	5,5	4,1	23	25	14:26
38	4221	35,9	26,0	19,9	13,6	10,2	6,4	4,9	23	24	14:27
39	4194	32,8	23,0	17,7	12,4	9,5	6,2	4,7	23	25	14:28
40	4169	31,6	22,6	17,4	12,2	9,6	6,2	4,8	23	25	14:29

SEGMENTO 03

41	4130	56,3	38,4	26,5	16,8	12,5	8,2	6,2	22	27	14:57
42	4076	63,7	43,4	31,7	20,9	15,5	9,9	7,2	22	27	14:58
43	4168	61,4	40,2	28,2	18,2	13,4	9,0	6,6	23	27	15:02
44	4057	50,1	33,4	22,6	13,8	10,1	6,8	5,2	22	27	15:03
45	4135	68,7	45,3	30,6	17,5	11,1	6,5	5,1	23	27	15:07
46	4152	70,1	46,4	33,9	22,0	16,3	10,7	8,2	24	27	15:08
47	4084	59,8	44,0	33,3	22,8	17,4	11,5	8,5	25	27	15:12
48	4171	54,7	39,3	29,3	19,1	13,8	8,5	6,1	25	27	15:13

SEGMENTO 04

49	4062	41,2	29,3	21,8	14,9	11,3	7,2	5,6	23	27	15:29
50	4104	51,2	33,9	24,5	15,8	11,6	7,3	5,6	22	27	15:30
51	4063	45,0	29,2	20,6	13,4	10,0	6,5	5,0	23	27	15:31
52	4026	47,3	32,3	24,2	15,7	11,9	7,7	6,1	22	27	15:32
53	4125	44,3	29,5	21,4	14,1	10,5	6,6	5,2	22	27	15:33
54	4044	48,4	32,0	23,4	15,6	11,3	7,2	5,4	23	27	15:33
55	4138	49,0	32,3	23,5	15,7	11,6	7,4	5,7	23	27	15:34
56	4128	37,3	25,0	18,4	11,9	8,5	5,4	4,0	23	26	15:40
57	4128	49,0	34,7	25,9	17,7	13,4	9,1	6,9	23	26	15:41
58	4200	50,1	35,1	26,9	18,5	14,2	9,7	7,3	23	26	15:42
59	4178	49,5	33,1	24,1	15,9	12,0	7,9	6,2	23	26	15:43
60	4198	42,4	30,7	23,6	16,1	11,8	7,3	5,5	20	26	15:47
61	4157	48,5	33,5	24,5	16,5	12,6	8,5	6,6	23	26	15:48
62	4037	47,6	33,7	24,7	16,5	12,7	8,7	6,7	23	26	15:49
63	4216	46,4	31,5	21,8	13,6	9,7	6,0	4,5	23	26	15:49
64	4045	42,3	29,2	21,3	14,2	10,5	6,8	5,0	23	26	15:50
65	4197	47,4	34,2	25,6	17,1	12,5	8,0	6,0	23	27	15:54
66	4109	48,6	33,8	24,8	16,6	12,1	7,7	5,8	23	27	15:57
67	4055	51,3	37,2	27,8	19,4	14,8	9,8	7,7	23	27	15:57
68	4202	35,1	25,4	19,2	12,6	9,0	5,5	4,2	23	27	15:58
69	4039	52,7	35,9	26,0	16,7	12,1	7,7	5,7	23	26	15:59
70	4068	39,2	27,2	20,0	13,5	10,0	6,6	5,0	23	25	16:00

SEGMENTO 05

71	4122	39,5	27,5	20,4	13,5	9,7	5,8	4,3	22	26	16:18
----	------	------	------	------	------	-----	-----	-----	----	----	-------

Ponto	Carga (Kgf)	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Temperatura		Data:
		FWD D0	FWD D1	FWD D2	FWD D3	FWD D4	FWD D5	FWD D6	Ar	Pav.	06/06/19
		(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)			Hora
72	4192	34,1	23,5	17,1	10,8	7,4	4,3	3,0	22	26	16:19
73	4181	30,2	21,6	16,4	10,8	7,7	4,2	2,8	19	26	16:20
74	4104	31,4	21,9	16,2	10,7	7,6	4,4	3,1	22	26	16:21
75	4212	28,8	20,3	15,2	10,4	7,8	4,9	3,6	22	26	16:22
76	4074	29,3	20,3	14,8	9,6	7,1	4,2	3,0	18	26	16:22
77	4081	33,6	23,6	17,7	11,9	8,9	5,8	4,3	22	26	16:23
78	4176	33,4	22,9	16,8	10,9	7,9	4,6	3,3	22	26	16:24
79	4092	34,2	24,1	17,8	11,8	8,3	4,9	3,6	22	26	16:25
80	4114	34,4	24,0	17,6	11,7	8,5	5,2	4,0	22	26	16:26
81	4133	35,7	24,9	18,1	11,8	8,6	5,3	3,9	19	26	16:26
82	4101	35,1	25,1	18,5	12,0	8,5	5,0	3,5	22	26	16:27
83	4066	34,2	24,1	18,1	12,3	9,3	5,9	4,5	22	26	16:28
84	4197	35,4	25,0	18,5	12,4	9,4	6,0	4,6	22	26	16:30
85	4174	35,1	24,9	18,6	12,6	9,4	5,8	4,3	22	26	16:32
86	4079	30,1	21,5	16,3	11,4	8,6	5,4	4,0	23	26	16:37
87	4069	31,6	21,9	16,5	11,1	8,3	5,1	3,9	23	26	16:38
88	4217	32,0	22,2	16,5	11,4	9,0	6,1	4,7	23	26	16:39
89	4168	34,1	24,7	18,9	13,2	10,4	6,7	5,0	23	26	16:40
90	4173	31,8	23,0	17,4	11,7	8,6	5,1	3,7	23	26	16:41
91	4103	30,8	21,2	15,6	9,9	7,0	3,8	2,6	23	26	16:42
92	4175	27,8	19,1	13,4	8,1	5,2	2,9	2,2	23	26	16:43
93	4074	28,2	19,0	13,6	8,2	5,7	3,5	2,7	23	26	16:44
94	4220	29,7	21,5	16,1	10,9	8,1	4,9	3,7	23	26	16:44
95	4106	30,0	21,9	16,5	11,1	8,3	5,1	3,6	22	26	16:45
96	4180	29,4	21,3	16,2	11,0	8,3	5,2	3,9	22	26	16:46
97	4048	28,7	20,2	15,3	10,3	7,7	4,8	3,5	22	26	16:47
98	4093	30,2	21,1	15,4	10,4	8,0	5,2	3,8	22	25	16:47
99	4112	32,6	23,1	17,5	11,5	8,4	5,2	3,9	22	26	16:49
100	4161	31,6	22,3	16,9	11,3	8,5	5,2	3,9	22	26	16:49

SEGMENTO 06

101	4180	45,8	32,5	23,7	15,7	11,5	7,2	5,4	22	25	17:02
102	4071	38,9	27,1	19,3	12,0	8,4	5,1	3,9	22	25	17:03
103	4135	41,3	27,9	19,8	12,6	8,8	5,4	4,0	22	25	17:04
104	4151	34,1	24,1	17,9	11,9	8,7	5,4	4,2	22	25	17:04
105	4174	39,4	27,0	19,5	12,3	8,8	5,5	4,3	21	25	17:05
106	4066	36,4	24,7	17,9	11,5	8,5	5,5	4,4	21	25	17:06
107	4064	38,1	26,9	19,9	13,1	9,5	5,9	4,5	21	25	17:07
108	4050	30,7	21,0	14,7	9,2	6,6	4,3	3,5	21	25	17:08
109	4122	40,9	27,3	19,9	13,1	9,6	6,0	4,6	21	25	17:09
110	4064	48,8	35,7	26,4	16,9	12,5	8,1	6,2	21	25	17:10

APÊNDICE C - DADOS OBTIDOS - LWD

Tabela 49 - Dados obtidos com o equipamento LWD

Ponto	Deflexão (mm)					Evd (MN/m ²)		Veloc. (mm/s)	Temperatura		Data
	1	2	3	média 1	média 2	indiv.	média		Ar	Pav.	
1	0,751	0,733	0,686	0,723	0,774	31,12	29,15	44,0	13	15	05/09/19
	0,833	0,886	0,617	0,779		28,88		43,9	13	15	05/09/19
	0,788	1,109	0,564	0,820		27,44		47,0	13	15	05/09/19
2	1,004	1,078	0,656	0,913	0,785	24,64	29,04	49,0	13	15	05/09/19
	0,561	0,620	0,896	0,692		32,51		38,5	13	15	05/09/19
	0,713	0,785	0,754	0,751		29,96		43,5	13	15	05/09/19
3	0,780	0,648	0,620	0,683	0,681	32,94	33,03	41,3	13,5	16	05/09/19
	0,658	0,651	0,757	0,689		32,66		42,7	13,5	16	05/09/19
	0,679	0,701	0,635	0,672		33,48		44,1	13,5	16	05/09/19
4	0,830	0,721	0,644	0,732	0,828	30,74	28,15	41,5	13,5	16	05/09/19
	1,120	1,196	0,868	1,061		21,21		57,5	13,5	16	05/09/19
	0,663	0,691	0,722	0,692		32,51		43,8	13,5	16	05/09/19
5	0,799	0,753	0,881	0,811	0,819	27,74	27,73	41,7	27	29	11/09/19
	0,576	0,702	0,896	0,725		31,03		39,5	27	29	11/09/19
	1,111	0,591	1,061	0,921		24,43		52,0	27	29	11/09/19
6	0,641	0,780	0,741	0,721	0,905	31,21	27,92	40,3	27	34	11/09/19
	1,525	1,106	1,480	1,370		16,42		73,4	27	34	11/09/19
	0,435	0,658	0,775	0,623		36,12		36,6	27	34	11/09/19
7	0,563	0,498	0,468	0,510	0,712	44,12	33,44	30,5	27	33	11/09/19
	0,710	0,760	1,269	0,913		24,64		48,9	27	33	11/09/19
	0,613	0,727	0,798	0,713		31,56		38,6	27	33	11/09/19
8	0,797	0,728	0,593	0,706	0,801	31,87	28,94	37,4	26,5	33	11/09/19
	0,900	0,677	1,439	1,005		22,39		54,9	26,5	33	11/09/19
	0,655	0,968	0,451	0,691		32,56		39,2	26,5	33	11/09/19
9	0,802	0,706	0,837	0,782	0,789	28,77	28,51	42,6	26	32,5	11/09/19
	0,709	0,982	0,701	0,797		28,23		45,9	26	32,5	11/09/19
	0,696	0,842	0,829	0,789		28,52		44,3	26	32,5	11/09/19
10	0,676	0,706	0,817	0,733	0,761	30,70	32,02	42,3	25	33	11/09/19
	0,596	0,446	0,506	0,516		43,60		32,2	25	33	11/09/19
	1,066	1,003	1,032	1,034		21,76		58,7	25	33	11/09/19
11	0,726	0,840	1,026	0,864	0,792	26,04	28,74	48,7	25	32	11/09/19
	0,866	0,805	0,836	0,836		26,91		47,1	25	32	11/09/19
	0,671	0,686	0,672	0,676		33,28		38,3	25	32	11/09/19
12	0,761	0,723	0,853	0,779	0,780	28,88	29,93	47,9	19	21	13/09/19
	0,857	0,781	1,246	0,961		23,41		55,7	19	21	13/09/19
	0,672	0,514	0,614	0,600		37,50		38,6	19	21	13/09/19
13	1,122	0,890	0,995	1,002	0,799	22,46	30,53	54,5	19	21	13/09/19
	0,710	1,191	0,737	0,879		25,60		58,2	19	21	13/09/19
	0,511	0,582	0,457	0,517		43,52		42,9	19	21	13/09/19

Ponto	Deflexão (mm)					Evd (MN/m²)		Veloc. (mm/s)	Temperatura		Data
	1	2	3	média 1	média 2	indiv.	média		Ar	Pav.	
14	0,981	0,760	0,836	0,859	0,827	26,19	27,23	46,4	18	20,5	13/09/19
	0,638	0,856	0,878	0,791		28,45		45,4	18	20,5	13/09/19
	0,816	0,849	0,830	0,832		27,04		45,3	18	20,5	13/09/19
15	0,620	0,771	0,677	0,689	0,815	32,66	28,69	39,4	18	20,5	13/09/19
	1,059	1,070	1,028	1,052		21,39		58,3	18	20,5	13/09/19
	0,776	0,759	0,575	0,703		32,01		42,0	18	20,5	13/09/19
16	0,570	0,489	0,598	0,552	0,762	40,76	30,92	39,7	18	21	13/09/19
	0,856	0,833	0,807	0,832		27,04		45,9	18	21	13/09/19
	0,995	0,898	0,809	0,901		24,97		49,9	18	21	13/09/19
17	0,827	0,861	0,794	0,827	0,835	27,21	26,98	50,0	18	22,5	13/09/19
	0,932	0,708	0,994	0,878		25,63		48,0	18	22,5	13/09/19
	0,925	0,798	0,679	0,801		28,09		44,9	18	22,5	13/09/19
18	0,797	0,838	0,765	0,800	0,813	28,13	28,77	43,6	28	37	11/09/19
	1,044	1,009	0,982	1,012		22,23		54,3	28	37	11/09/19
	0,679	0,610	0,589	0,626		35,94		37,5	28	37	11/09/19
19	0,781	0,662	0,807	0,750	0,886	30,00	25,77	40,8	18,5	23	13/09/19
	1,084	0,948	1,006	1,013		22,21		54,7	18,5	23	13/09/19
	0,830	0,869	0,989	0,896		25,11		51,0	18,5	23	13/09/19
20	0,922	1,030	0,944	0,965	0,821	23,32	27,80	56,4	18	22	13/09/19
	0,692	0,802	0,770	0,755		29,80		42,8	18	22	13/09/19
	0,843	0,777	0,610	0,743		30,28		45,1	18	22	13/09/19
21	1,045	0,999	0,830	0,958	0,854	23,49	26,53	54,7	18	21	13/09/19
	0,823	0,804	0,787	0,805		27,95		45,7	18	21	13/09/19
	0,436	1,390	0,572	0,799		28,16		43,7	18	21	13/09/19
22	0,607	0,700	0,701	0,669	0,720	33,63	31,38	36,5	13	15	05/09/19
	0,812	0,669	0,657	0,713		31,56		48,4	13	15	05/09/19
	0,843	0,780	0,709	0,777		28,96		47,4	13	15	05/09/19
23	0,767	0,962	0,601	0,777	0,868	28,96	26,08	44,8	13	15	05/09/19
	1,065	0,882	0,851	0,933		24,12		52,8	13	15	05/09/19
	0,780	0,915	0,988	0,894		25,17		51,5	13	15	05/09/19
24	0,869	0,794	0,800	0,821	0,795	27,41	28,42	47,8	12	15	05/09/19
	0,675	0,494	1,360	0,843		26,69		47,8	12	15	05/09/19
	0,669	0,889	0,609	0,722		31,16		40,6	12	15	05/09/19
25	0,497	0,759	0,863	0,706	0,678	31,87	33,33	40,1	12	14	05/09/19
	0,712	0,530	0,598	0,613		36,70		38,7	12	14	05/09/19
	0,766	0,710	0,672	0,716		31,42		45,3	12	14	05/09/19
26	0,477	0,829	0,330	0,545	0,578	41,28	39,11	37,5	12	14	05/09/19
	0,760	0,635	0,268	0,554		40,61		39,1	12	14	05/09/19
	0,531	0,652	0,722	0,635		35,43		40,3	12	14	05/09/19
27	1,078	0,948	1,069	1,032	0,867	21,80	26,42	57,3	12	15	05/09/19
	0,796	0,650	0,812	0,753		29,88		48,3	12	15	05/09/19
	0,719	0,880	0,848	0,816		27,57		46,4	12	15	05/09/19

Ponto	Deflexão (mm)					Evd (MN/m²)		Veloc. (mm/s)	Temperatura		Data
	1	2	3	média 1	média 2	indiv.	média		Ar	Pav.	
28	0,478	0,578	0,482	0,513	0,723	43,86	32,75	29,4	14	16	05/09/19
	0,694	0,625	1,193	0,837		26,88		45,4	14	16	05/09/19
	1,100	0,673	0,680	0,818		27,51		44,2	14	16	05/09/19
29	0,756	0,740	0,756	0,751	1,032	29,96	23,07	44,3	14	16	05/09/19
	1,998	1,067	0,979	1,348		16,69		76,2	14	16	05/09/19
	0,990	1,123	0,878	0,997		22,57		55,1	14	16	05/09/19
30	1,253	1,223	0,619	1,032	1,100	21,80	20,50	61,3	25,5	30	03/09/19
	1,097	1,171	1,085	1,118		20,13		64,2	25,5	30	03/09/19
	1,214	1,214	1,020	1,149		19,58		62,5	25,5	30	03/09/19
31	1,595	1,257	1,516	1,456	1,230	15,45	18,59	76,0	24	29	03/09/19
	1,368	1,043	1,031	1,147		19,62		68,1	24	29	03/09/19
	1,110	1,178	0,973	1,087		20,70		57,2	24	29	03/09/19
32	0,923	0,891	0,847	0,887	0,879	25,37	25,61	50,5	19,5	25,5	03/09/19
	0,813	0,880	0,852	0,848		26,53		47,2	19,5	25,5	03/09/19
	1,313	0,682	0,711	0,902		24,94		51,2	19,5	25,5	03/09/19
33	0,389	0,624	0,979	0,664	0,836	33,89	27,80	40,7	18,5	23	03/09/19
	0,568	0,971	0,905	0,815		27,61		48,5	18,5	23	03/09/19
	1,003	1,055	1,026	1,028		21,89		59,2	18,5	23	03/09/19
34	0,971	0,785	0,814	0,857	0,956	26,25	23,81	48,1	18	22	03/09/19
	1,131	0,894	0,701	0,909		24,75		49,6	18	22	03/09/19
	0,861	1,441	1,004	1,102		20,42		61,9	18	22	03/09/19
35	1,152	0,894	0,742	0,929	0,851	24,22	26,85	50,6	18	20,5	03/09/19
	0,635	0,780	0,705	0,707		31,82		41,2	18	20,5	03/09/19
	0,765	0,838	1,150	0,918		24,51		52,0	18	20,5	03/09/19
36	1,338	1,410	1,440	1,396	1,217	16,12	19,15	81,8	22	28	03/09/19
	1,125	0,902	0,729	0,919		24,48		58,5	22	28	03/09/19
	1,393	1,203	1,413	1,336		16,84		77,4	22	28	03/09/19
37	1,578	1,470	0,956	1,335	1,164	16,85	19,77	71,9	22	26	03/09/19
	0,794	1,120	0,897	0,937		24,01		53,2	22	26	03/09/19
	1,220	0,717	1,722	1,220		18,44		64,8	22	26	03/09/19
38	0,698	0,865	0,837	0,800	1,022	28,13	22,73	47,4	23	27	03/09/19
	0,906	1,104	1,069	1,026		21,93		61,7	23	27	03/09/19
	1,077	1,331	1,314	1,241		18,13		69,0	23	27	03/09/19
39	0,782	0,397	0,637	0,605	0,795	37,19	29,35	37,1	22	28	03/09/19
	1,174	0,800	0,905	0,960		23,44		54,6	22	28	03/09/19
	1,020	0,808	0,634	0,821		27,41		46,5	22	28	03/09/19
40	0,995	0,940	1,389	1,108	1,023	20,31	22,19	63,0	20	26	03/09/19
	1,188	0,801	1,225	1,071		21,01		65,2	20	26	03/09/19
	0,615	1,168	0,890	0,891		25,25		54,1	20	26	03/09/19
41	0,907	1,193	0,884	0,995	1,059	22,61	21,28	58,7	16	18	04/09/19
	1,101	0,783	1,406	1,097		20,51		60,5	16	18	04/09/19
	1,114	0,935	1,209	1,086		20,72		61,6	16	18	04/09/19

Ponto	Deflexão (mm)					Evd (MN/m²)		Veloc. (mm/s)	Temperatura		Data
	1	2	3	média 1	média 2	indiv.	média		Ar	Pav.	
42	0,413	0,764	0,740	0,639	0,964	35,21	25,51	41,3	16	18	04/09/19
	1,502	1,183	1,305	1,330		16,92		74,1	16	18	04/09/19
	0,667	1,100	0,999	0,922		24,40		60,7	16	18	04/09/19
43	0,846	0,929	0,729	0,835	0,857	26,95	26,45	50,5	15	16	04/09/19
	0,901	1,035	0,935	0,957		23,51		56,5	15	16	04/09/19
	1,075	0,663	0,599	0,779		28,88		46,2	15	16	04/09/19
44	0,807	0,668	0,918	0,798	0,919	28,20	24,72	50,3	16	17	04/09/19
	0,731	1,041	1,236	1,003		22,43		59,5	16	17	04/09/19
	0,892	1,009	0,967	0,956		23,54		60,7	16	17	04/09/19
45	0,915	0,900	0,774	0,863	0,778	26,07	29,11	57,0	16	17	04/09/19
	0,517	1,014	0,718	0,750		30,00		53,0	16	17	04/09/19
	0,962	0,834	0,364	0,720		31,25		46,0	16	17	04/09/19
46	0,633	0,979	1,051	0,888	0,903	25,34	24,93	50,5	16	16	04/09/19
	0,579	1,167	1,006	0,917		24,54		52,7	16	16	04/09/19
	1,064	0,822	0,822	0,903		24,92		55,3	16	16	04/09/19
47	0,920	0,740	0,581	0,747	0,827	30,12	27,83	44,2	15	16	04/09/19
	0,961	1,045	1,024	1,010		22,28		59,2	15	16	04/09/19
	0,685	0,638	0,850	0,724		31,08		47,3	15	16	04/09/19
48	1,141	0,762	0,901	0,935	0,984	24,06	23,01	55,8	17	19	04/09/19
	0,842	0,848	1,064	0,918		24,51		52,2	17	19	04/09/19
	1,182	1,529	0,589	1,100		20,45		62,3	17	19	04/09/19
49	0,745	0,849	0,874	0,823	0,709	27,34	32,53	47,9	18,5	23	30/08/19
	0,669	0,578	0,452	0,566		39,75		38,6	18,5	23	30/08/19
	0,694	0,796	0,724	0,738		30,49		43,1	18,5	23	30/08/19
50	0,679	0,618	0,563	0,620	0,870	36,29	27,36	38,0	24	30	30/08/19
	1,179	0,950	1,174	1,101		20,44		61,3	24	30	30/08/19
	0,731	1,159	0,774	0,888		25,34		51,3	24	30	30/08/19
51	0,823	0,815	0,623	0,754	0,705	29,84	32,31	43,1	24	32	30/08/19
	0,790	0,723	0,780	0,764		29,45		46,2	24	32	30/08/19
	0,686	0,580	0,529	0,598		37,63		38,2	24	32	30/08/19
52	1,032	1,196	1,220	1,149	1,085	19,58	20,85	62,0	23	33	30/08/19
	1,113	1,126	1,143	1,127		19,96		62,5	23	33	30/08/19
	0,754	0,597	1,583	0,978		23,01		51,0	23	33	30/08/19
53	0,848	1,195	0,683	0,909	0,951	24,75	23,87	54,8	22	29,5	30/08/19
	1,012	1,065	1,167	1,081		20,81		59,6	22	29,5	30/08/19
	0,898	0,684	1,009	0,864		26,04		46,8	22	29,5	30/08/19
54	0,996	0,710	0,792	0,833	0,788	27,01	28,71	47,4	23	28,5	30/08/19
	0,530	0,593	0,997	0,707		31,82		40,2	23	28,5	30/08/19
	0,776	1,060	0,636	0,824		27,31		46,0	23	28,5	30/08/19
55	0,963	1,555	0,601	1,040	0,807	21,63	28,92	55,9	20	26	30/08/19
	0,668	0,736	0,658	0,687		32,75		38,8	20	26	30/08/19
	0,726	0,669	0,691	0,695		32,37		40,9	20	26	30/08/19

Ponto	Deflexão (mm)					Evd (MN/m²)		Veloc. (mm/s)	Temperatura		Data
	1	2	3	média 1	média 2	indiv.	média		Ar	Pav.	
56	0,815	0,733	0,768	0,772	0,846	29,15	27,70	42,4	21	26	30/08/19
	0,675	0,618	0,731	0,675		33,33		37,2	21	26	30/08/19
	1,678	0,884	0,712	1,091		20,62		60,0	21	26	30/08/19
57	1,229	1,225	0,850	1,101	1,076	20,44	20,95	62,5	19	25	30/08/19
	1,074	0,945	1,325	1,115		20,18		63,8	19	25	30/08/19
	1,039	0,719	1,278	1,012		22,23		56,8	19	25	30/08/19
58	1,195	0,549	0,788	0,844	0,943	26,66	24,01	47,5	18	24	30/08/19
	1,136	0,822	1,011	0,990		22,73		56,1	18	24	30/08/19
	1,054	0,973	0,955	0,994		22,64		56,7	18	24	30/08/19
59	0,581	1,098	0,921	0,867	0,897	25,95	25,71	52,7	17	23	30/08/19
	0,729	0,821	0,668	0,739		30,45		42,8	17	23	30/08/19
	0,799	1,243	1,215	1,086		20,72		60,6	17	23	30/08/19
60	0,986	0,790	0,656	0,811	0,805	27,74	28,15	49,6	15	21,5	03/09/19
	0,573	0,735	0,849	0,719		31,29		39,7	15	21,5	03/09/19
	0,953	1,025	0,677	0,885		25,42		52,2	15	21,5	03/09/19
61	0,761	0,758	1,074	0,864	0,863	26,04	26,27	49,0	16	21	03/09/19
	0,656	0,703	0,960	0,773		29,11		44,9	16	21	03/09/19
	0,977	0,832	1,043	0,951		23,66		54,1	16	21	03/09/19
62	0,897	0,645	0,854	0,799	0,849	28,16	26,81	44,4	15	19	03/09/19
	0,751	0,775	0,775	0,767		29,34		47,5	15	19	03/09/19
	1,022	0,952	0,968	0,981		22,94		54,9	15	19	03/09/19
63	0,694	0,504	0,448	0,549	0,584	40,98	39,95	38,8	15	17,5	03/09/19
	0,539	0,505	0,350	0,465		48,39		37,3	15	17,5	03/09/19
	0,680	0,747	0,787	0,738		30,49		44,9	15	17,5	03/09/19
64	1,208	0,831	1,004	1,014	0,807	22,19	28,73	56,0	15	18	03/09/19
	0,753	0,523	0,850	0,709		31,73		44,9	15	18	03/09/19
	0,762	0,525	0,804	0,697		32,28		41,6	15	18	03/09/19
65	0,976	0,674	0,747	0,799	0,696	28,16	32,79	43,8	26	36,5	30/08/19
	0,839	0,603	0,633	0,692		32,51		43,5	26	36,5	30/08/19
	0,754	0,689	0,349	0,597		37,69		36,0	26	36,5	30/08/19
66	0,711	0,325	0,743	0,593	0,631	37,94	36,64	39,6	25	36	30/08/19
	0,228	0,743	0,602	0,524		42,94		39,6	25	36	30/08/19
	0,661	0,735	0,928	0,775		29,03		48,6	25	36	30/08/19
67	0,644	1,118	0,609	0,790	0,824	28,48	27,34	48,4	25	36	30/08/19
	0,654	0,899	1,046	0,866		25,98		50,4	25	36	30/08/19
	1,189	0,869	0,391	0,816		27,57		50,2	25	36	30/08/19
68	0,774	0,645	0,996	0,805	0,846	27,95	26,91	44,9	25	35	30/08/19
	1,424	0,848	0,661	0,978		23,01		54,1	25	35	30/08/19
	1,296	0,417	0,554	0,756		29,76		42,8	25	35	30/08/19
69	0,972	1,201	0,820	0,998	0,804	22,55	28,77	56,1	24	34	30/08/19
	0,864	0,411	0,773	0,683		32,94		44,5	24	34	30/08/19
	0,910	1,086	0,193	0,730		30,82		47,3	24	34	30/08/19

Ponto	Deflexão (mm)					Evd (MN/m²)		Veloc. (mm/s)	Temperatura		Data
	1	2	3	média 1	média 2	indiv.	média		Ar	Pav.	
70	1,192	0,839	0,693	0,908	0,744	24,78	32,26	54,3	25	34	30/08/19
	0,859	0,705	0,897	0,820		27,44		52,2	25	34	30/08/19
	0,423	0,576	0,517	0,505		44,55		34,0	25	34	30/08/19
71	0,799	0,473	1,103	0,792	0,586	28,41	40,63	57,5	19	23,5	28/08/19
	0,531	0,471	0,547	0,516		43,60		43,4	19	23,5	28/08/19
	0,478	0,410	0,465	0,451		49,89		36,1	19	23,5	28/08/19
72	1,301	0,700	0,784	0,928	0,932	24,25	24,21	56,9	20	23	28/08/19
	0,631	1,017	0,960	0,869		25,89		58,5	20	23	28/08/19
	1,138	0,794	1,069	1,000		22,50		57,5	20	23	28/08/19
73	1,222	0,670	1,272	1,055	0,948	21,33	23,95	63,1	18	21	28/08/19
	0,962	0,687	0,846	0,832		27,04		56,3	18	21	28/08/19
	1,014	0,747	1,112	0,958		23,49		55,4	18	21	28/08/19
74	0,913	0,995	0,689	0,866	0,865	25,98	26,02	49,5	20	24	13/09/19
	1,187	0,849	0,471	0,836		26,91		48,2	20	24	13/09/19
	0,933	0,899	0,850	0,894		25,17		50,2	20	24	13/09/19
75	0,756	1,221	0,924	0,967	0,915	23,27	24,64	64,2	25	28	27/08/19
	0,596	0,859	1,189	0,881		25,54		59,1	25	28	27/08/19
	0,740	1,324	0,623	0,896		25,11		58,3	25	28	27/08/19
76	0,858	1,074	0,476	0,803	0,710	28,02	32,09	54,9	19	24	27/08/19
	0,832	0,764	0,563	0,720		31,25		48,3	19	24	27/08/19
	0,788	0,538	0,497	0,608		37,01		50,3	19	24	27/08/19
77	1,239	0,643	1,043	0,975	0,962	23,08	23,42	60,0	20	24	27/08/19
	0,941	0,969	1,094	1,001		22,48		63,0	20	24	27/08/19
	1,467	0,597	0,668	0,911		24,70		59,7	20	24	27/08/19
78	1,180	1,025	0,688	0,964	0,722	23,34	32,81	60,4	20	25	27/08/19
	0,266	0,640	0,814	0,573		39,27		55,0	20	25	27/08/19
	0,570	0,487	0,827	0,628		35,83		44,4	20	25	27/08/19
79	0,808	1,464	0,651	0,974	0,729	23,10	36,04	58,4	23	26	27/08/19
	0,732	1,060	0,676	0,823		27,34		54,0	23	26	27/08/19
	0,136	0,593	0,442	0,390		57,69		40,5	23	26	27/08/19
80	1,135	0,688	1,215	1,013	0,677	22,21	40,81	64,3	19	23,5	27/08/19
	0,532	0,334	0,137	0,334		67,37		34,2	19	23,5	27/08/19
	0,701	0,733	0,621	0,685		32,85		49,7	19	23,5	27/08/19
81	0,247	1,318	1,038	0,868	0,718	25,92	33,72	50,9	19	23	27/08/19
	0,550	0,904	0,985	0,813		27,68		45,6	19	23	27/08/19
	0,377	0,406	0,637	0,473		47,57		38,2	19	23	27/08/19
82	0,305	0,365	0,408	0,359	0,501	62,67	47,25	39,6	21	25	27/08/19
	0,335	0,633	0,623	0,530		42,45		50,2	21	25	27/08/19
	0,371	0,685	0,785	0,614		36,64		43,6	21	25	27/08/19
83	0,510	0,349	0,311	0,390	0,370	57,69	64,20	34,0	20	24	27/08/19
	0,285	0,181	0,320	0,262		85,88		44,1	20	24	27/08/19
	0,446	0,321	0,610	0,459		49,02		49,6	20	24	27/08/19

Ponto	Deflexão (mm)					Evd (MN/m²)		Veloc. (mm/s)	Temperatura		Data
	1	2	3	média 1	média 2	indiv.	média		Ar	Pav.	
84	0,409	0,123	0,944	0,492	0,659	45,73	37,83	39,4	18	24	27/08/19
	0,401	0,431	0,670	0,501		44,91		49,1	18	24	27/08/19
	0,703	0,547	1,704	0,985		22,84		61,9	18	24	27/08/19
85	0,528	0,406	1,099	0,678	0,675	33,19	34,70	44,0	17,5	21	27/08/19
	0,669	1,002	0,841	0,837		26,88		57,0	17,5	21	27/08/19
	0,559	0,743	0,230	0,511		44,03		40,2	17,5	21	27/08/19
86	0,800	0,606	0,657	0,688	0,722	32,70	32,19	46,1	20	25	13/09/19
	0,498	0,578	0,664	0,580		38,79		38,9	20	25	13/09/19
	0,965	0,771	0,954	0,897		25,08		50,3	20	25	13/09/19
87	0,584	0,557	0,536	0,559	0,756	40,25	31,27	38,7	20	26	28/08/19
	0,776	0,505	0,946	0,742		30,32		43,6	20	26	28/08/19
	1,003	0,966	0,935	0,968		23,24		57,3	20	26	28/08/19
88	0,334	0,439	0,526	0,433	0,662	51,96	43,22	38,4	20,5	26	28/08/19
	1,306	0,999	1,203	1,169		19,25		62,6	20,5	26	28/08/19
	0,478	0,245	0,431	0,385		58,44		34,3	20,5	26	28/08/19
89	0,597	0,705	0,709	0,670	0,772	33,58	30,11	46,2	20,5	25,5	28/08/19
	0,490	0,441	1,066	0,666		33,78		47,9	20,5	25,5	28/08/19
	1,324	0,655	0,960	0,980		22,96		55,5	20,5	25,5	28/08/19
90	0,581	0,973	1,703	1,086	0,856	20,72	27,15	65,4	21	25	28/08/19
	0,950	0,481	0,778	0,736		30,57		46,1	21	25	28/08/19
	0,494	0,743	1,002	0,746		30,16		49,9	21	25	28/08/19
91	0,984	0,758	1,001	0,914	0,765	24,62	30,26	55,2	19	23,5	28/08/19
	0,566	0,968	0,800	0,778		28,92		44,0	20	24	13/09/19
	0,566	0,615	0,630	0,604		37,25		37,4	20	24	13/09/19
92	0,721	0,618	0,800	0,713	0,815	31,56	28,08	45,5	19,5	24	28/08/19
	0,876	0,528	0,891	0,765		29,41		42,7	19,5	24	28/08/19
	0,971	1,009	0,921	0,967		23,27		54,2	19,5	24	28/08/19
93	0,340	0,276	0,309	0,308	0,700	73,05	41,39	34,6	19,5	24	28/08/19
	0,852	1,045	1,151	1,016		22,15		61,7	19,5	24	28/08/19
	0,774	0,654	0,903	0,777		28,96		47,9	19,5	24	28/08/19
94	0,490	1,377	0,816	0,894	0,867	25,17	27,09	63,3	21	24	28/08/19
	0,493	1,079	0,360	0,644		34,94		45,0	21	24	28/08/19
	0,741	0,678	1,772	1,064		21,15		71,8	21	24	28/08/19
95	1,073	0,271	0,742	0,695	0,843	32,37	27,67	56,2	19	22	28/08/19
	0,700	0,715	0,852	0,756		29,76		50,4	19	22	28/08/19
	0,943	1,311	0,977	1,077		20,89		69,4	19	22	28/08/19
96	0,753	0,883	0,610	0,749	0,779	30,04	28,97	44,6	20	24	13/09/19
	0,925	0,742	0,867	0,845		26,63		48,4	20	24	13/09/19
	0,701	0,684	0,846	0,744		30,24		40,4	20	24	13/09/19
97	0,695	0,739	0,619	0,684	0,728	32,89	31,01	41,5	19	22	28/08/19
	0,472	1,081	0,784	0,779		28,88		55,6	19	22	28/08/19
	0,753	0,409	0,999	0,720		31,25		46,7	19	22	28/08/19

Ponto	Deflexão (mm)					Evd (MN/m²)		Veloc. (mm/s)	Temperatura		Data
	1	2	3	média 1	média 2	indiv.	média		Ar	Pav.	
98	0,739	0,240	0,497	0,492	0,598	45,73	38,28	41,4	18,5	23	28/08/19
	0,602	0,713	0,684	0,666		33,78		52,0	18,5	23	28/08/19
	0,876	0,529	0,507	0,637		35,32		48,9	18,5	23	28/08/19
99	0,488	0,556	0,773	0,606	0,658	37,13	35,95	43,8	19	23	28/08/19
	0,740	0,993	0,865	0,866		25,98		51,5	19	23	28/08/19
	0,327	0,643	0,538	0,503		44,73		43,8	19	23	28/08/19
100	0,903	0,806	0,542	0,750	0,858	30,00	26,53	56,2	19	23	28/08/19
	0,973	0,455	1,116	0,848		26,53		65,4	19	23	28/08/19
	0,796	0,940	1,192	0,976		23,05		61,1	19	23	28/08/19
101	0,257	0,650	1,036	0,648	0,878	34,72	26,70	45,2	18	20	27/08/19
	0,734	0,774	1,368	0,959		23,46		58,3	18	20	27/08/19
	0,692	1,257	1,129	1,026		21,93		59,5	18	20	27/08/19
102	0,824	0,895	0,791	0,837	0,907	26,88	24,88	44,5	19	23	13/09/19
	0,987	0,965	0,911	0,954		23,58		53,2	19	23	13/09/19
	0,935	0,984	0,874	0,931		24,17		53,8	19	23	13/09/19
103	0,544	1,665	0,370	0,860	0,629	26,16	38,17	56,8	18	22	26/08/19
	0,328	0,401	0,678	0,469		47,97		39,2	18	22	26/08/19
	0,373	0,615	0,682	0,557		40,39		38,4	18	22	26/08/19
104	0,705	0,464	0,990	0,720	0,815	31,25	28,64	45,7	18	20,5	26/08/19
	0,696	0,733	1,706	1,045		21,53		58,7	18	20,5	26/08/19
	0,581	0,638	0,818	0,679		33,14		46,0	18	20,5	26/08/19
105	0,395	0,491	0,723	0,536	0,594	41,98	38,30	41,3	18,5	21,5	26/08/19
	0,594	0,645	0,455	0,565		39,82		40,1	18,5	21,5	26/08/19
	0,514	0,601	0,924	0,680		33,09		46,5	18,5	21,5	26/08/19
106	0,626	1,366	0,308	0,767	0,732	29,34	31,72	49,6	18	22	26/08/19
	0,691	0,283	1,621	0,865		26,01		57,4	18	22	26/08/19
	0,529	0,661	0,505	0,565		39,82		36,0	18	22	26/08/19
107	0,385	0,961	0,842	0,729	0,777	30,86	29,04	46,7	20	23	13/09/19
	0,775	0,815	0,922	0,837		26,88		48,5	20	23	13/09/19
	0,719	0,790	0,789	0,766		29,37		43,8	20	23	13/09/19
108	0,976	0,978	0,539	0,831	0,750	27,08	30,77	53,2	17	18,5	04/09/19
	0,507	0,685	0,585	0,592		38,01		40,4	17	18,5	04/09/19
	0,820	0,654	1,006	0,827		27,21		48,0	17	18,5	04/09/19
109	0,531	0,629	0,821	0,660	0,859	34,09	27,02	41,7	17	18	04/09/19
	0,939	1,282	0,733	0,985		22,84		58,5	17	18	04/09/19
	0,891	0,769	1,139	0,933		24,12		54,1	17	18	04/09/19
110	0,627	0,703	0,791	0,707	0,758	31,82	29,81	41,8	17	19	04/09/19
	0,717	0,668	0,848	0,744		30,24		46,4	17	19	04/09/19
	0,799	0,747	0,919	0,822		27,37		50,2	17	19	04/09/19

APÊNDICE D - DADOS OBTIDOS - VIGA BENKELMAN

Tabela 50 - Dados obtidos com a viga Benkelman

Ponto	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Temperatura		Constante:
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Ar	Pav.	2,056
	(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)			Data
SEGMENTO 01										
01	47,3	43,2	37,0	26,7	20,6	14,4	8,2	31	44	06/12/19
02	84,3	82,2	74,0	53,5	39,1	32,9	30,8	31	44	06/12/19
03	26,7	18,5	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1	32	44,5	06/12/19
04	39,1	35,0	26,7	18,5	14,4	10,3	8,2	32	45	06/12/19
05	41,1	26,7	20,6	14,4	8,2	4,1	2,1	32	45	06/12/19
06	41,1	37,0	28,8	20,6	16,4	8,2	6,2	31	44	06/12/19
07	32,9	26,7	18,5	10,3	6,2	4,1	2,1	30	43	06/12/19
08	43,2	39,1	32,9	22,6	20,6	14,4	12,3	30	41	06/12/19
09	30,8	26,7	22,6	18,5	14,4	10,3	8,2	30	42	06/12/19
10	28,8	26,7	18,5	16,4	12,3	8,2	6,2	29	41	06/12/19
11	32,9	24,7	20,6	12,3	10,3	6,2	4,1	29	39,5	06/12/19
12	53,5	43,2	37,0	28,8	24,7	20,6	14,4	29	38,5	06/12/19
13	53,5	43,2	32,9	28,8	20,6	16,4	10,3	29	39,5	06/12/19
14	51,4	41,1	30,8	22,6	14,4	8,2	4,1	29	40	06/12/19
15	51,4	41,1	37,0	32,9	28,8	20,6	16,4	29	42	06/12/19
16	30,8	26,7	24,7	22,6	18,5	10,3	8,2	30	43	06/12/19
17	59,6	55,5	49,3	45,2	39,1	28,8	20,6	30	43	06/12/19
18	65,8	51,4	41,1	35,0	24,7	14,4	8,2	30	43,5	06/12/19
19	43,2	32,9	24,7	18,5	12,3	8,2	6,2	30	43,5	06/12/19
20	51,4	39,1	28,8	22,6	14,4	10,3	8,2	31	44	06/12/19
21	26,7	22,6	16,4	14,4	12,3	6,2	4,1	31	43,5	06/12/19
SEGMENTO 02										
22	30,8	20,6	16,4	12,3	10,3	6,2	4,1	26	31	06/12/19
23	41,1	30,8	26,7	22,6	18,5	14,4	10,3	25	29,5	06/12/19
24	41,1	30,8	24,7	20,6	16,4	10,3	8,2	25	29,5	06/12/19
25	32,9	26,7	18,5	14,4	12,3	10,3	8,2	24,5	28	06/12/19
26	43,2	35,0	24,7	16,4	14,4	10,3	8,2	24,5	28	06/12/19
27	43,2	35,0	28,8	16,4	14,4	6,2	4,1	27,5	34,5	06/12/19
28	55,5	49,3	43,2	32,9	28,8	18,5	14,4	27,5	33	06/12/19
29	37,0	26,7	20,6	16,4	14,4	10,3	8,2	27	32	06/12/19
30	55,5	45,2	37,0	26,7	16,4	10,3	8,2	26,5	31,5	06/12/19
31	41,1	37,0	30,8	22,6	16,4	12,3	8,2	26	31	06/12/19
32	28,8	22,6	18,5	14,4	12,3	10,3	8,2	24	26	06/12/19
33	20,6	18,5	16,4	14,4	10,3	8,2	6,2	24	26,5	06/12/19
34	26,7	24,7	22,6	18,5	14,4	10,3	8,2	24	27	06/12/19
35	26,7	24,7	18,5	14,4	12,3	10,3	8,2	24	27	06/12/19

Ponto	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Temperatura		Constante: 2,056
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Ar	Pav.	
	(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)			Data
36	30,8	22,6	18,5	16,4	14,4	10,3	8,2	24	28	06/12/19
37	26,7	20,6	18,5	16,4	14,4	6,2	4,1	23,5	28	06/12/19
38	30,8	22,6	18,5	14,4	10,3	8,2	6,2	23,5	27	06/12/19
39	26,7	24,7	20,6	16,4	12,3	8,2	6,2	23	26	06/12/19
40	24,7	22,6	18,5	14,4	12,3	8,2	6,2	23	26	06/12/19
SEGMENTO 03										
41	41,1	37,0	28,8	24,7	20,6	16,4	12,3	28	38	06/12/19
42	39,1	32,9	24,7	20,6	16,4	12,3	8,2	28	38	06/12/19
43	39,1	28,8	20,6	16,4	10,3	4,1	4,1	27	36	06/12/19
44	28,8	24,7	16,4	14,4	12,3	8,2	4,1	27	36	06/12/19
45	53,5	45,2	32,9	26,7	22,6	14,4	12,3	29	39	06/12/19
46	59,6	51,4	39,1	32,9	26,7	18,5	10,3	28	40	06/12/19
47	51,4	43,2	32,9	24,7	16,4	12,3	6,2	28	37	06/12/19
48	49,3	35,0	28,8	20,6	18,5	10,3	8,2	28	38	06/12/19
SEGMENTO 04										
49	20,6	18,5	14,4	12,3	8,2	4,1	4,1	27	37	06/12/19
50	37,0	32,9	28,8	20,6	12,3	8,2	6,2	27	37	06/12/19
51	28,8	26,7	24,7	18,5	14,4	8,2	6,2	27	37,5	06/12/19
52	32,9	26,7	20,6	16,4	12,3	10,3	6,2	27	38	06/12/19
53	26,7	24,7	16,4	12,3	10,3	8,2	6,2	27	38	06/12/19
54	28,8	26,7	20,6	16,4	10,3	6,2	4,1	27	38	06/12/19
55	32,9	28,8	20,6	14,4	12,3	10,3	6,2	28	38,5	06/12/19
56	24,7	22,6	18,5	12,3	8,2	6,2	4,1	28	37	06/12/19
57	28,8	24,7	20,6	16,4	12,3	8,2	6,2	29	38	06/12/19
58	39,1	30,8	20,6	14,4	10,3	8,2	6,2	29	38	06/12/19
59	30,8	26,7	22,6	16,4	12,3	8,2	8,2	29	38	06/12/19
60	35,0	22,6	16,4	12,3	8,2	6,2	4,1	26	36	06/12/19
61	28,8	26,7	18,5	14,4	12,3	8,2	4,1	26	36	06/12/19
62	39,1	35,0	26,7	22,6	18,5	12,3	8,2	26	35,5	06/12/19
63	39,1	35,0	28,8	18,5	12,3	8,2	6,2	26	36	06/12/19
64	28,8	24,7	16,4	12,3	8,2	6,2	4,1	26	36	06/12/19
65	41,1	35,0	30,8	24,7	20,6	14,4	10,3	27	37	06/12/19
66	32,9	30,8	24,7	18,5	16,4	8,2	4,1	27	37,5	06/12/19
67	57,6	49,3	39,1	30,8	26,7	20,6	16,4	27	37,5	06/12/19
68	22,6	20,6	18,5	14,4	10,3	6,2	4,1	27	37	06/12/19
69	39,1	32,9	26,7	18,5	16,4	10,3	8,2	27	37,5	06/12/19
70	20,6	18,5	14,4	12,3	8,2	6,2	4,1	27	37,5	06/12/19
SEGMENTO 05										
71	32,9	24,7	14,4	8,2	6,2	4,1	2,1	26	33	03/12/19
72	20,6	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1	2,1	26	33	03/12/19
73	26,7	20,6	16,4	10,3	8,2	6,2	4,1	26	32,5	03/12/19

Ponto	Deflexão (1×10^{-2} mm)							Temperatura		Constante:
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Ar	Pav.	2,056
	(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)			Data
74	22,6	18,5	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1	26	33,5	03/12/19
75	22,6	20,6	16,4	8,2	6,2	4,1	2,1	26,5	34	03/12/19
76	18,5	16,4	12,3	8,2	6,2	4,1	2,1	26	33	03/12/19
77	22,6	18,5	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1	26,5	33	03/12/19
78	20,6	18,5	10,3	6,2	5,1	4,1	2,1	27	33	03/12/19
79	30,8	20,6	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1	26	32,5	03/12/19
80	22,6	18,5	12,3	8,2	6,2	4,1	2,1	26	32	03/12/19
81	24,7	20,6	16,4	10,3	8,2	4,1	4,1	26	31,5	03/12/19
82	30,8	28,8	22,6	16,4	14,4	10,3	6,2	26	32	03/12/19
83	26,7	22,6	14,4	10,3	8,2	4,1	2,1	26	33	03/12/19
84	26,7	22,6	16,4	10,3	6,2	4,1	2,1	26	33	03/12/19
85	26,7	18,5	16,4	12,3	10,3	8,2	6,2	26	32,5	03/12/19
86	24,7	16,4	14,4	10,3	6,2	4,1	2,1	24	33	03/12/19
87	20,6	18,5	12,3	8,2	6,2	4,1	4,1	24	32,5	03/12/19
88	20,6	18,5	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1	24	32	03/12/19
89	26,7	20,6	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1	24	32	03/12/19
90	22,6	18,5	12,3	10,3	8,2	6,2	4,1	24,5	32,5	03/12/19
91	24,7	16,4	14,4	8,2	6,2	4,1	4,1	24,5	31,5	03/12/19
92	22,6	20,6	12,3	8,2	6,2	4,1	2,1	24,5	32	03/12/19
93	20,6	18,5	12,3	10,3	6,2	4,1	2,1	24,5	31	03/12/19
94	22,6	18,5	14,4	10,3	6,2	4,1	2,1	25	32	03/12/19
95	24,7	20,6	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1	25	33,5	03/12/19
96	20,6	16,4	14,4	10,3	8,2	4,1	2,1	25	32,5	03/12/19
97	20,6	16,4	12,3	10,3	8,2	6,2	4,1	25	32	03/12/19
98	22,6	20,6	12,3	8,2	6,2	4,1	2,1	25	31,5	03/12/19
99	26,7	20,6	14,4	8,2	6,2	4,1	2,1	25	33	03/12/19
100	24,7	20,6	14,4	10,3	8,2	6,2	4,1	25,5	32,5	03/12/19

SEGMENTO 06

101	32,9	30,8	22,6	18,5	14,4	10,3	6,2	27	34	03/12/19
102	35,0	30,8	24,7	18,5	14,4	10,3	6,2	27	32,5	03/12/19
103	30,8	24,7	18,5	14,4	10,3	4,1	2,1	27	30	03/12/19
104	28,8	22,6	20,6	12,3	8,2	6,2	4,1	27	31	03/12/19
105	30,8	26,7	16,4	12,3	8,2	6,2	2,1	27	30	03/12/19
106	28,8	24,7	18,5	12,3	10,3	8,2	6,2	27	31	03/12/19
107	32,9	26,7	20,6	14,4	10,3	6,2	4,1	27	30	03/12/19
108	24,7	20,6	16,4	12,3	10,3	8,2	6,2	27	31	03/12/19
109	30,8	24,7	18,5	14,4	12,3	8,2	6,2	27	32	03/12/19
110	35,0	24,7	18,5	12,3	8,2	4,1	4,1	27	32,5	03/12/19

APÊNDICE E - CONTAGEM DE TRÁFEGO

Tabela 51 - Contagem de tráfego na Estrada Rio do Morro realizada em 18/03/2020

Horário	Veículos Leves			Caminhões								Ônibus	Outros	Total
	Motos	Carros	Camionetas	2C	3C	2S2	2S3	3S2	3S3	3Q6	3T6	2CB	Retro	
das 06:00 até 07:00	110	215	27	8	6		2		4			2	1	375
das 07:00 até 08:00	100	337	23	8	11				1	1		1		482
das 08:00 até 09:00	36	215	17	13	13	1	1		3			5		304
das 09:00 até 10:00	28	148	16	16	17		2		1		1	1		230
das 10:00 até 11:00	30	174	13	17	20	2			1	1				258
das 11:00 até 12:00	33	166	16	20	14	2					1	1		253
das 12:00 até 13:00	47	156	18	6	6	1								234
das 13:00 até 14:00	45	168	21	14	13		2	1						264
das 14:00 até 15:00	44	198	26	18	23	1								310
das 15:00 até 16:00	35	208	20	22	20		1	1				2	2	311
das 16:00 até 17:00	40	265	19	16	15	1		1	2					359
das 17:00 até 18:00	111	343	34	7	5							1	1	502
das 18:00 até 19:00	64	276	21	6	7									374
das 19:00 até 20:00	34	196	11	1	1									243
das 20:00 até 21:00	15	116	5	3	1				1					141
das 21:00 até 22:00	21	76	3	1										101
Totais	793	3.257	290	176	172	8	8	3	13	2	2	13	4	4.741
	4.340			401										

APÊNDICE F - ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Tabela 52 - Análise estatística descritiva com as leituras de deflexão convertidas para a temperatura de 25°C e corrigidas em função do carregamento aplicado

Segmento 01				Segmento 02				Segmento 03			
ponto	deflexão (0,01 mm)			ponto	deflexão (0,01 mm)			ponto	deflexão (0,01 mm)		
	FWD	LWD	VB		FWD	LWD	VB		FWD	LWD	VB
01	45,8	81,5	43,9	22	31,1	75,8	30,4	41	55,3	109,7	39,3
02	26,7	82,6	78,3	23	30,7	91,4	40,9	42	63,4	99,9	37,4
03	27,7	71,3	24,8	24	31,4	83,7	40,9	43	59,8	89,7	37,7
04	40,5	86,7	36,2	25	30,9	71,7	33,0	44	50,1	95,7	27,8
05	43,5	80,3	38,0	26	37,9	61,2	43,3	45	67,4	81,0	50,9
06	41,7	86,6	38,2	27	37,2	91,3	42,0	46	68,5	94,6	56,4
07	28,8	68,5	30,7	28	36,7	75,7	54,3	47	59,4	86,6	49,3
08	39,1	77,0	40,7	29	35,6	108,1	36,4	48	53,2	101,4	47,1
09	28,3	76,0	28,9	30	35,0	107,3	54,7				
10	31,8	73,2	27,1	31	33,1	120,6	40,6				
11	32,1	76,5	31,2	32	31,8	87,7	29,2				
12	28,2	79,6	51,0	33	30,4	84,4	20,8				
13	34,2	81,5	50,7	34	30,5	97,1	26,9				
14	40,4	84,6	48,6	35	20,4	87,1	26,9				
15	40,5	83,4	48,2	36	34,5	119,9	30,9				
16	35,2	77,8	28,7	37	32,4	115,8	26,8				
17	42,1	84,6	55,6	38	35,0	101,2	31,0				
18	41,1	76,7	61,3	39	32,1	78,3	27,0				
19	30,5	89,5	40,2	40	31,1	101,8	25,0				
20	39,2	83,4	47,8								
21	43,3	87,1	24,9								
X	36,2	80,4	39,8	X	33,2	92,6	34,8	X	59,7	94,8	43,2
σ	6,2	5,5	10,8	σ	2,5	16,8	9,5	σ	6,6	9,1	9,3
DC	42,4	85,9	50,6	DC	35,7	109,4	44,3	DC	66,3	103,9	52,5
D _{min}	26,7	68,5	24,8	D _{min}	30,4	61,2	20,8	D _{min}	50,1	81,0	27,8
D _{max}	45,8	89,5	61,3	D _{max}	37,9	120,6	54,7	D _{max}	68,5	109,7	56,4
CV%	17	7	27	CV%	8	18	27	CV%	11	10	22
N	21	21	20	N	18	19	19	N	8	8	8

Segmento 04				Segmento 05				Segmento 06			
ponto	deflexão (0,01 mm)			ponto	deflexão (0,01 mm)			ponto	deflexão (0,01 mm)		
	FWD	LWD	VB		FWD	LWD	VB		FWD	LWD	VB
49	41,2	71,6	19,8	71	39,1	59,0	32,1	101	44,9	90,1	32,0
50	50,6	84,8	35,5	72	33,2	94,1	20,1	102	39,2	91,6	34,2
51	45,0	68,1	27,6	73	29,5	96,7	26,1	103	41,0	63,9	30,5
52	47,7	104,3	31,4	74	31,2	86,9	22,0	104	33,7	83,4	28,4
53	43,6	93,0	25,5	75	27,9	90,1	21,9	105	38,7	60,5	30,5
54	48,6	77,4	27,5	76	29,3	71,4	18,1	106	36,7	74,3	28,4
55	48,1	80,3	31,4	77	33,6	96,7	22,1	107	38,4	78,5	32,6
56	36,9	84,2	23,7	78	32,6	72,2	20,1	108	31,1	77,5	24,3
57	48,4	107,6	27,5	79	34,1	72,5	30,1	109	40,7	89,0	30,2
58	48,7	94,7	37,4	80	34,1	68,2	22,2	110	49,2	78,1	34,2
59	48,3	90,6	29,4	81	35,2	72,5	24,3				
60	41,2	81,9	33,8	82	34,9	50,1	30,2				
61	47,6	88,0	27,8	83	34,3	37,2	26,1				
62	48,1	87,5	37,8	84	34,4	66,2	26,1				
63	44,9	60,7	37,7	85	34,3	68,9	26,1				
64	42,7	83,6	27,8	86	30,1	72,2	24,1				
65	45,8	65,8	39,4	87	31,7	75,2	20,2				
66	48,0	59,8	31,5	88	31,0	65,9	20,2				
67	51,4	78,1	55,2	89	33,4	77,0	26,2				
68	33,9	80,6	21,7	90	31,1	85,6	22,1				
69	53,2	76,9	37,4	91	30,6	76,9	24,3				
70	39,5	71,2	19,7	92	27,2	81,9	22,2				
				93	28,2	70,4	20,3				
				94	28,7	87,1	22,2				
				95	29,8	85,6	24,0				
				96	28,7	78,3	20,2				
				97	28,9	73,9	20,2				
				98	30,3	60,4	22,2				
				99	32,3	66,5	26,1				
				100	31,0	86,7	24,2				
X	45,6	81,4	30,1	X	31,7	76,2	23,5	X	39,4	78,7	30,5
σ	4,8	12,5	6,1	σ	2,7	11,5	3,4	σ	5,2	10,5	3,0
DC	50,4	93,9	36,2	DC	34,4	87,7	26,9	DC	44,6	89,2	33,5
D _{min}	33,9	59,8	19,7	D _{min}	27,2	50,1	18,1	D _{min}	31,1	60,5	24,3
D _{max}	53,2	107,6	39,4	D _{max}	39,1	96,7	32,1	D _{max}	49,2	91,6	34,2
CV%	11	15	20	CV%	9	15	14	CV%	13	13	10
N	22	22	21	N	30	29	30	N	10	10	10

APÊNDICE G - RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM FWD

Tabela 53 - Módulos de elasticidade equivalentes retroanalizados através do *software* BackMeDiNa a partir das deflexões medidas com o equipamento FWD

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalizado (MPa)				RMS (μm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Subleito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
SEGMENTO 01													
01	campo	45,8	34,3	28,0	20,8	16,5	11,5	8,5	10251	793	527	130	5,750
	retro	45,8	34,4	27,9	21,2	16,5	10,6	7,4					
02	campo	26,5	19,6	15,9	11,7	9,7	7,4	6,0	15243	1450	966	218	7,937
	retro	26,4	19,8	16,1	12,4	9,7	6,3	4,4					
03	campo	26,8	19,9	15,8	11,4	9,0	6,2	4,8	15989	1198	798	229	4,139
	retro	27,1	19,9	15,9	11,9	9,1	5,7	4,0					
04	campo	39,5	29,1	22,7	15,9	12,1	8,3	6,2	10820	749	524	169	4,899
	retro	39,7	28,7	22,5	16,5	12,5	7,8	5,4					
05	campo	42,2	29,2	21,5	14,6	10,9	7,6	6,0	7452	639	446	187	6,583
	retro	42,2	28,9	21,8	15,3	11,3	6,8	4,8					
06	campo	41,9	31,2	24,7	17,5	13,2	8,8	6,5	10820	811	475	160	4,097
	retro	42,1	30,9	24,4	18,0	13,6	8,5	5,9					
07	campo	28,1	20,4	15,4	10,0	7,2	4,5	3,5	12460	933	620	279	4,534
	retro	28,7	19,8	14,9	10,4	7,6	4,6	3,2					
08	campo	38,1	28,3	22,5	15,3	11,3	7,1	5,3	10820	811	466	181	4,690
	retro	38,7	27,9	21,8	15,7	11,8	7,2	5,0					
09	campo	28,0	21,1	16,9	12,0	9,3	6,1	4,7	15077	1129	750	228	4,042
	retro	28,7	21,0	16,6	12,3	9,4	5,9	4,1					
10	campo	31,1	23,3	18,1	12,7	10,2	7,1	5,6	13885	1025	692	204	5,898
	retro	31,2	22,9	18,2	13,5	10,3	6,5	4,5					
11	campo	32,0	22,8	17,0	11,3	8,5	5,3	4,1	11327	848	556	254	3,569
	retro	32,4	22,3	16,8	11,7	8,6	5,2	3,6					
12	campo	28,2	20,3	16,0	11,5	9,3	6,8	5,6	13808	1198	798	233	7,399
	retro	28,2	20,5	16,3	12,1	9,3	5,8	4,0					
13	campo	33,9	25,5	20,1	14,3	11,3	7,4	5,7	12623	946	629	191	4,484
	retro	34,3	25,1	19,9	14,7	11,2	7,0	4,9					
14	campo	40,3	28,3	21,0	13,9	10,2	6,2	4,9	8942	670	419	211	3,743
	retro	40,6	27,8	20,8	14,3	10,4	6,2	4,3					
15	campo	40,9	29,7	22,7	15,0	10,8	6,3	4,6	10820	798	329	203	3,268
	retro	41,2	29,3	22,4	15,5	11,1	6,5	4,5					
16	campo	34,8	25,1	19,3	12,7	9,6	6,2	5,1	10432	782	520	222	5,874
	retro	35,5	24,7	18,8	13,2	9,7	5,9	4,1					
17	campo	42,2	31,9	25,7	18,0	13,9	8,9	6,8	10820	811	491	152	4,863
	retro	42,7	31,5	25,1	18,6	14,2	8,9	6,2					

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Subleito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
18	campo	40,6	29,9	23,8	17,7	14,3	10,1	8,1	9794	860	629	147	7,692
	retro	40,5	30,0	24,2	18,4	14,4	9,2	6,4					
19	campo	30,2	22,3	17,8	12,7	10,2	7,4	6,2	15077	1129	750	203	7,516
	retro	30,2	22,4	18,0	13,5	10,4	6,6	4,6					
20	campo	38,2	28,3	22,6	15,7	12,7	9,0	7,2	11361	838	594	160	7,760
	retro	38,2	28,2	22,5	16,8	13,0	8,2	5,7					
21	campo	42,2	32,6	27,3	20,6	17,5	12,2	9,6	10940	1025	692	116	7,041
	retro	42,0	32,7	27,4	21,8	17,5	11,7	8,3					
SEGMENTO 02													
22	campo	31,0	22,0	16,1	10,6	7,7	4,5	3,3	11327	848	513	280	3,180
	retro	31,5	21,4	15,9	10,8	7,8	4,6	3,2					
23	campo	31,3	22,4	17,1	12,1	9,4	6,1	4,7	12668	964	682	233	3,251
	retro	31,3	22,2	17,3	12,5	9,4	5,8	4,0					
24	campo	31,6	22,8	17,4	12,4	9,6	6,1	4,7	12460	933	620	233	3,531
	retro	31,9	22,6	17,4	12,5	9,4	5,7	4,0					
25	campo	31,2	23,0	17,9	12,6	9,9	6,4	5,0	13706	1026	682	218	3,609
	retro	31,3	22,7	17,9	13,1	10,0	6,2	4,3					
26	campo	37,7	27,1	20,0	13,3	10,1	6,4	4,9	9836	726	476	210	4,772
	retro	38,1	26,4	20,0	14,0	10,3	6,2	4,3					
27	campo	37,7	27,4	20,7	14,2	10,6	6,7	5,2	10820	811	458	204	3,940
	retro	38,0	26,9	20,7	14,7	10,8	6,5	4,5					
28	campo	37,0	28,0	22,1	15,6	12,0	7,6	5,8	11902	892	540	178	4,149
	retro	37,5	27,5	21,8	16,0	12,2	7,6	5,2					
29	campo	35,7	26,4	20,3	14,0	10,7	6,9	5,1	11475	860	546	197	3,919
	retro	36,0	25,8	20,1	14,6	11,0	6,7	4,7					
30	campo	35,4	26,2	19,6	13,1	9,8	6,5	4,9	10432	782	520	216	6,181
	retro	36,4	25,4	19,4	13,7	10,1	6,1	4,3					
31	campo	32,4	23,1	17,4	11,3	8,3	5,2	4,0	10432	782	520	250	4,534
	retro	33,1	22,6	16,9	11,7	8,5	5,1	3,5					
32	campo	32,5	23,4	18,0	12,7	9,8	6,5	4,9	12460	933	620	225	3,706
	retro	32,7	23,3	18,1	13,0	9,8	6,0	4,2					
33	campo	30,4	21,5	16,1	11,3	9,0	6,1	4,8	12460	933	620	249	5,875
	retro	30,6	21,4	16,4	11,7	8,7	5,3	3,7					
34	campo	30,0	22,0	17,0	12,1	9,3	6,0	4,5	13706	995	672	225	2,582
	retro	30,2	21,7	17,0	12,4	9,4	5,8	4,0					
35	campo	20,6	15,0	12,0	9,8	9,0	6,5	4,8	23690	2020	1343	262	8,480
	retro	20,4	15,7	13,0	10,1	8,1	5,3	3,7					
36	campo	35,5	25,7	19,4	13,2	9,8	5,8	4,1	11475	860	459	226	2,573
	retro	35,9	25,3	19,3	13,5	9,9	5,9	4,1					
37	campo	32,2	22,7	16,8	11,5	8,7	5,5	4,1	11475	821	572	245	2,760
	retro	32,3	22,3	16,9	11,8	8,7	5,3	3,7					

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Subleito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
38	campo	35,9	26,0	19,9	13,6	10,2	6,4	4,9	11475	860	511	212	3,315
	retro	36,0	25,6	19,8	14,1	10,4	6,3	4,4					
39	campo	32,8	23,0	17,7	12,4	9,5	6,2	4,7	10572	933	620	229	3,078
	retro	32,8	23,0	17,8	12,8	9,6	5,9	4,1					
40	campo	31,6	22,6	17,4	12,2	9,6	6,2	4,8	12460	933	620	233	4,065
	retro	31,9	22,6	17,5	12,5	9,4	5,7	4,0					
SEGMENTO 03													
41	campo	56,3	38,4	26,5	16,8	12,5	8,2	6,2	7060	359	325	169	7,378
	retro	56,6	37,4	27,0	17,9	12,7	7,6	5,3					
42	campo	63,7	43,4	31,7	20,9	15,5	9,9	7,2	5574	374	274	138	4,876
	retro	64,0	43,0	31,7	21,5	15,5	9,2	6,4					
43	campo	61,4	40,2	28,2	18,2	13,4	9,0	6,6	6418	312	320	161	6,126
	retro	61,4	40,1	28,7	18,9	13,5	8,0	5,6					
44	campo	50,1	33,4	22,6	13,8	10,1	6,8	5,2	6667	385	348	204	7,217
	retro	50,5	32,3	22,8	14,7	10,4	6,1	4,3					
45	campo	68,7	45,3	30,6	17,5	11,1	6,5	5,1	6897	259	170	192	4,657
	retro	69,0	44,6	30,6	18,0	11,5	6,3	4,5					
46	campo	70,1	46,4	33,9	22,0	16,3	10,7	8,2	4646	329	274	131	6,792
	retro	70,1	46,2	33,7	22,8	16,5	9,9	6,9					
47	campo	59,8	44,0	33,3	22,8	17,4	11,5	8,5	6503	487	315	121	7,741
	retro	60,4	42,8	33,1	23,7	17,7	10,8	7,5					
48	campo	54,7	39,3	29,3	19,1	13,8	8,5	6,1	7766	555	240	160	4,860
	retro	55,0	38,5	29,1	19,8	14,0	8,1	5,6					
SEGMENTO 04													
49	campo	41,2	29,3	21,8	14,9	11,3	7,2	5,6	8942	660	446	187	4,428
	retro	41,4	28,8	21,9	15,4	11,4	6,9	4,8					
50	campo	51,2	33,9	24,5	15,8	11,6	7,3	5,6	6118	432	375	180	3,944
	retro	51,4	33,6	24,4	16,4	11,9	7,1	5,0					
51	campo	45,0	29,2	20,6	13,4	10,0	6,5	5,0	5178	501	446	207	4,475
	retro	45,3	28,8	20,7	14,0	10,2	6,1	4,3					
52	campo	47,3	32,3	24,2	15,7	11,9	7,7	6,1	7488	508	373	179	5,931
	retro	47,4	32,0	23,8	16,3	11,8	7,0	4,9					
53	campo	44,3	29,5	21,4	14,1	10,5	6,6	5,2	6988	567	405	204	4,053
	retro	44,2	29,4	21,6	14,7	10,6	6,3	4,4					
54	campo	48,4	32,0	23,4	15,6	11,3	7,2	5,4	7131	454	373	188	3,406
	retro	48,4	32,0	23,3	15,6	11,2	6,7	4,7					
55	campo	49,0	32,3	23,5	15,7	11,6	7,4	5,7	5705	508	373	188	4,224
	retro	49,1	32,2	23,5	16,0	11,5	6,9	4,8					
56	campo	37,3	25,0	18,4	11,9	8,5	5,4	4,0	8445	699	426	250	2,638
	retro	37,4	24,9	18,2	12,3	8,7	5,1	3,6					

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Subleito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
57	campo	49,0	34,7	25,9	17,7	13,4	9,1	6,9	7648	573	387	158	6,445
	retro	49,1	34,2	26,2	18,5	13,7	8,3	5,8					
58	campo	50,1	35,1	26,9	18,5	14,2	9,7	7,3	7766	582	387	153	6,889
	retro	50,3	35,4	27,1	19,3	14,4	8,7	6,1					
59	campo	49,5	33,1	24,1	15,9	12,0	7,9	6,2	5348	561	373	179	6,128
	retro	49,4	32,8	24,4	16,8	12,2	7,3	5,1					
60	campo	42,4	30,7	23,6	16,1	11,8	7,3	5,5	9836	737	387	184	3,316
	retro	42,7	30,3	23,3	16,5	12,1	7,2	5,0					
61	campo	48,5	33,5	24,5	16,5	12,6	8,5	6,6	7488	561	373	170	7,433
	retro	48,6	33,4	25,2	17,5	12,8	7,7	5,4					
62	campo	47,6	33,7	24,7	16,5	12,7	8,7	6,7	7766	547	387	163	7,677
	retro	47,8	33,1	25,0	17,6	12,9	7,8	5,4					
63	campo	46,4	31,5	21,8	13,6	9,7	6,0	4,5	8942	441	351	224	4,428
	retro	46,8	30,8	22,0	14,2	9,9	5,7	4,0					
64	campo	42,3	29,2	21,3	14,2	10,5	6,8	5,0	8129	609	377	204	4,160
	retro	42,5	28,8	21,4	14,6	10,5	6,2	4,3					
65	campo	47,4	34,2	25,6	17,1	12,5	8,0	6,0	8237	617	348	173	5,302
	retro	47,8	33,4	25,3	17,6	12,8	7,6	5,3					
66	campo	48,6	33,8	24,8	16,6	12,1	7,7	5,8	7488	561	320	179	4,405
	retro	48,7	33,3	24,9	17,0	12,2	7,2	5,0					
67	campo	51,3	37,2	27,8	19,4	14,8	9,8	7,7	7766	538	387	140	6,880
	retro	51,5	36,4	28,1	20,2	15,1	9,3	6,4					
68	campo	35,1	25,4	19,2	12,6	9,0	5,5	4,2	11475	860	431	238	3,911
	retro	35,4	24,8	18,8	13,0	9,4	5,5	3,8					
69	campo	52,7	35,9	26,0	16,7	12,1	7,7	5,7	7060	425	315	172	4,299
	retro	52,9	35,4	25,9	17,3	12,3	7,3	5,1					
70	campo	39,2	27,2	20,0	13,5	10,0	6,6	5,0	8942	670	446	211	4,234
	retro	39,2	26,8	20,1	13,9	10,1	6,1	4,2					
SEGMENTO 05													
71	campo	39,5	27,5	20,4	13,5	9,7	5,8	4,3	8942	670	439	218	3,012
	retro	39,8	27,0	20,1	13,7	9,9	5,9	4,1					
72	campo	34,1	23,5	17,1	10,8	7,4	4,3	3,0	12460	757	386	298	2,004
	retro	34,3	23,1	16,8	10,9	7,5	4,3	3,0					
73	campo	30,2	21,6	16,4	10,8	7,7	4,2	2,8	13706	1026	424	294	2,482
	retro	30,4	21,3	16,0	10,9	7,7	4,4	3,1					
74	campo	31,4	21,9	16,2	10,7	7,6	4,4	3,1	11327	848	470	284	2,039
	retro	31,7	21,6	16,0	10,8	7,7	4,5	3,1					
75	campo	28,8	20,3	15,2	10,4	7,8	4,9	3,6	13214	960	659	281	1,988
	retro	28,9	20,0	15,2	10,7	7,9	4,7	3,3					
76	campo	29,3	20,3	14,8	9,6	7,1	4,2	3,0	12460	905	489	308	1,922
	retro	29,4	20,0	14,8	9,9	7,0	4,1	2,9					

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Subleito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
77	campo	33,6	23,6	17,7	11,9	8,9	5,8	4,3	10432	782	520	242	3,691
	retro	34,0	23,3	17,5	12,1	8,9	5,3	3,7					
78	campo	33,4	22,9	16,8	10,9	7,9	4,6	3,3	11327	797	445	280	1,517
	retro	33,5	22,7	16,8	11,2	7,9	4,6	3,2					
79	campo	34,2	24,1	17,8	11,8	8,3	4,9	3,6	10432	782	441	254	2,815
	retro	34,6	23,6	17,6	11,9	8,5	5,0	3,5					
80	campo	34,4	24,0	17,6	11,7	8,5	5,2	4,0	10432	770	473	250	2,778
	retro	34,6	23,6	17,6	12,1	8,7	5,1	3,6					
81	campo	35,7	24,9	18,1	11,8	8,6	5,3	3,9	10432	758	410	254	3,004
	retro	35,8	24,4	18,1	12,2	8,7	5,0	3,5					
82	campo	35,1	25,1	18,5	12,0	8,5	5,0	3,5	11475	834	355	254	2,859
	retro	35,4	24,6	18,4	12,4	8,7	5,0	3,5					
83	campo	34,2	24,1	18,1	12,3	9,3	5,9	4,5	10432	782	520	230	3,344
	retro	34,6	23,9	18,1	12,6	9,3	5,6	3,9					
84	campo	35,4	25,0	18,5	12,4	9,4	6,0	4,6	10432	782	520	230	3,925
	retro	35,7	24,6	18,6	13,0	9,6	5,8	4,0					
85	campo	35,1	24,9	18,6	12,6	9,4	5,8	4,3	10432	782	520	230	2,826
	retro	35,5	24,5	18,5	13,0	9,5	5,7	4,0					
86	campo	30,1	21,5	16,3	11,4	8,6	5,4	4,0	12460	933	620	249	2,117
	retro	30,3	21,2	16,3	11,6	8,6	5,2	3,6					
87	campo	31,6	21,9	16,5	11,1	8,3	5,1	3,9	11327	848	564	254	2,162
	retro	31,7	21,8	16,5	11,5	8,4	5,1	3,5					
88	campo	32,0	22,2	16,5	11,4	9,0	6,1	4,7	9817	933	620	249	5,176
	retro	32,0	22,0	16,8	11,9	8,8	5,4	3,7					
89	campo	34,1	24,7	18,9	13,2	10,4	6,7	5,0	11475	860	572	215	4,148
	retro	34,6	24,5	18,9	13,6	10,1	6,2	4,3					
90	campo	31,8	23,0	17,4	11,7	8,6	5,1	3,7	12460	933	498	254	2,660
	retro	32,2	22,6	17,2	12,0	8,7	5,2	3,6					
91	campo	30,8	21,2	15,6	9,9	7,0	3,8	2,6	13706	810	424	313	1,753
	retro	31,0	21,0	15,4	10,1	7,0	4,0	2,8					
92	campo	27,8	19,1	13,4	8,1	5,2	2,9	2,2	15989	731	495	394	3,309
	retro	28,1	18,5	13,2	8,3	5,6	3,2	2,2					
93	campo	28,2	19,0	13,6	8,2	5,7	3,5	2,7	13434	741	536	359	2,816
	retro	28,4	18,7	13,3	8,6	6,0	3,5	2,4					
94	campo	29,7	21,5	16,1	10,9	8,1	4,9	3,7	12460	933	620	270	3,390
	retro	30,3	21,0	15,9	11,2	8,2	4,9	3,4					
95	campo	30,0	21,9	16,5	11,1	8,3	5,1	3,6	12460	933	573	258	3,408
	retro	30,5	21,3	16,2	11,4	8,4	5,0	3,5					
96	campo	29,4	21,3	16,2	11,0	8,3	5,2	3,9	13706	1026	610	261	2,755
	retro	29,5	20,9	16,1	11,4	8,4	5,1	3,5					

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalizado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Subleito	
		0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm					
97	campo	28,7	20,2	15,3	10,3	7,7	4,8	3,5	12460	933	611	275	2,048
	retro	28,9	20,0	15,1	10,6	7,7	4,7	3,2					
98	campo	30,2	21,1	15,4	10,4	8,0	5,2	3,8	11327	848	564	280	4,093
	retro	30,6	20,8	15,5	10,6	7,7	4,6	3,2					
99	campo	32,6	23,1	17,5	11,5	8,4	5,2	3,9	11475	860	485	254	2,965
	retro	32,9	22,8	17,2	11,8	8,6	5,1	3,5					
100	campo	31,6	22,3	16,9	11,3	8,5	5,2	3,9	11327	848	564	258	3,020
	retro	32,1	22,1	16,6	11,6	8,5	5,1	3,5					
SEGMENTO 06													
101	campo	45,8	32,5	23,7	15,7	11,5	7,2	5,4	8237	608	348	188	4,724
	retro	46,2	31,8	23,8	16,3	11,8	7,0	4,8					
102	campo	38,9	27,1	19,3	12,0	8,4	5,1	3,9	9836	589	387	243	4,704
	retro	39,2	26,2	19,1	12,6	8,9	5,2	3,6					
103	campo	41,3	27,9	19,8	12,6	8,8	5,4	4,0	9836	510	394	239	2,654
	retro	41,5	27,5	19,8	12,9	9,1	5,3	3,7					
104	campo	34,1	24,1	17,9	11,9	8,7	5,4	4,2	10432	782	505	246	3,527
	retro	34,5	23,6	17,7	12,2	8,9	5,3	3,7					
105	campo	39,4	27,0	19,5	12,3	8,8	5,5	4,3	9538	616	394	243	3,960
	retro	39,7	26,6	19,4	12,9	9,1	5,3	3,7					
106	campo	36,4	24,7	17,9	11,5	8,5	5,5	4,4	8581	711	473	238	4,864
	retro	36,4	24,5	18,1	12,4	9,0	5,3	3,7					
107	campo	38,1	26,9	19,9	13,1	9,5	5,9	4,5	8942	670	446	218	4,161
	retro	38,7	26,3	19,7	13,5	9,8	5,9	4,1					
108	campo	30,7	21,0	14,7	9,2	6,6	4,3	3,5	11138	743	498	312	4,362
	retro	31,0	20,4	14,8	9,7	6,8	4,0	2,8					
109	campo	40,9	27,3	19,9	13,1	9,6	6,0	4,6	8942	548	446	224	2,776
	retro	40,9	27,2	19,9	13,4	9,6	5,7	4,0					
110	campo	48,8	35,7	26,4	16,9	12,5	8,1	6,2	7766	582	305	167	8,060
	retro	49,4	34,4	26,0	17,9	12,9	7,6	5,3					

APÊNDICE H - RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM A VIGA BENKELMAN

Tabela 54 - Módulos de elasticidade equivalentes retroanalizados através do *software*
BackMeDiNa a partir das deflexões medidas com a viga Benkelman

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalizado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Subleito	
		15 cm	25 cm	33 cm	47 cm	61 cm	91 cm	120 cm					
SEGMENTO 01													
01	campo	23,7	21,6	18,5	13,4	10,3	7,2	4,1	8976	674	381	96	9,526
	retro	25,2	20,3	17,4	13,6	10,8	6,9	4,9					
02	campo	42,2	41,1	37,0	26,8	19,6	16,5	15,4	8047	603	235	44	28,543
	retro	44,8	38,3	34,0	27,9	22,9	15,4	11,0					
03	campo	13,4	9,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	8329	793	527	265	3,564
	retro	13,2	9,4	7,5	5,3	4,0	2,4	1,7					
04	campo	19,6	17,5	13,4	9,3	7,2	5,2	4,1	7868	590	394	140	9,206
	retro	20,9	15,9	13,1	9,7	7,5	4,6	3,3					
05	campo	20,6	13,4	10,3	7,2	4,1	2,1	1,1	3529	403	272	226	5,131
	retro	20,6	13,4	10,0	6,5	4,6	2,7	1,9					
06	campo	20,6	18,5	14,4	10,3	8,2	4,1	3,1	7868	590	358	132	9,284
	retro	22,1	16,9	14,0	10,4	8,0	4,9	3,5					
07	campo	16,5	13,4	9,3	5,2	3,1	2,1	1,1	10964	445	277	276	7,560
	retro	17,2	11,9	8,9	5,7	3,9	2,2	1,6					
08	campo	21,6	19,6	16,5	11,3	10,3	7,2	6,2	10473	785	524	99	9,529
	retro	22,5	18,4	16,0	12,8	10,4	6,8	4,9					
09	campo	15,4	13,4	11,3	9,3	7,2	5,2	4,1	14593	1093	727	138	3,868
	retro	16,1	13,1	11,4	9,1	7,4	4,9	3,5					
10	campo	14,4	13,4	9,3	8,2	6,2	4,1	3,1	10964	822	546	178	8,490
	retro	15,8	12,1	10,1	7,6	5,9	3,7	2,6					
11	campo	16,5	12,4	10,3	6,2	5,2	3,1	2,1	8237	617	410	207	3,905
	retro	16,8	12,1	9,7	6,9	5,1	3,0	2,2					
12	campo	26,8	21,6	18,5	14,4	12,4	10,3	7,2	8944	714	476	80	9,654
	retro	26,4	21,8	19,1	15,5	12,6	8,4	6,0					
13	campo	26,8	21,6	16,5	14,4	10,3	8,2	5,2	6744	506	337	99	8,831
	retro	27,2	21,1	17,7	13,5	10,6	6,7	4,7					
14	campo	25,7	20,6	15,4	11,3	7,2	4,1	2,1	6131	460	190	140	7,346
	retro	26,5	19,5	15,5	10,7	7,7	4,5	3,1					
15	campo	25,7	20,6	18,5	16,5	14,4	10,3	8,2	10591	1009	670	71	7,598
	retro	25,1	21,5	19,4	16,3	13,8	9,7	7,1					
16	campo	15,4	13,4	12,4	11,3	9,3	5,2	4,1	17657	1322	880	119	7,122
	retro	16,3	13,8	12,2	10,1	8,4	5,7	4,1					
17	campo	29,8	27,8	24,7	22,6	19,6	14,4	10,3	14256	1067	711	48	5,897
	retro	30,9	27,5	25,2	22,0	19,1	14,1	10,6					

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Subleito	
		15 cm	25 cm	33 cm	47 cm	61 cm	91 cm	120 cm					
18	campo	32,9	25,7	20,6	17,5	12,4	7,2	4,1	5574	418	233	86	8,173
	retro	33,1	25,5	21,2	15,9	12,2	7,5	5,3					
19	campo	21,6	16,5	12,4	9,3	6,2	4,1	3,1	6503	487	310	158	3,657
	retro	21,8	15,9	12,7	9,0	6,7	4,0	2,8					
20	campo	25,7	19,6	14,4	11,3	7,2	5,2	4,1	5574	405	270	131	6,065
	retro	25,9	18,9	15,1	10,8	8,0	4,8	3,4					
21	campo	13,4	11,3	8,2	7,2	6,2	3,1	2,1	12060	904	601	202	6,136
	retro	14,1	10,8	9,0	6,7	5,2	3,2	2,3					
SEGMENTO 02													
22	campo	15,4	10,3	8,2	6,2	5,2	3,1	2,1	7139	679	451	228	4,215
	retro	15,4	11,0	8,8	6,2	4,6	2,8	2,0					
23	campo	20,6	15,4	13,4	11,3	9,3	7,2	5,2	9077	864	576	112	7,493
	retro	20,2	16,3	14,2	11,3	9,1	6,0	4,3					
24	campo	20,6	15,4	12,4	10,3	8,2	5,2	4,1	7343	649	433	135	4,895
	retro	20,5	15,7	13,1	9,9	7,7	4,8	3,4					
25	campo	16,5	13,4	9,3	7,2	6,2	5,2	4,1	9967	747	496	175	9,773
	retro	16,7	12,7	10,5	7,8	6,0	3,7	2,6					
26	campo	21,6	17,5	12,4	8,2	7,2	5,2	4,1	6503	487	325	150	9,219
	retro	22,1	16,2	13,0	9,3	7,0	4,2	3,0					
27	campo	21,6	17,5	14,4	8,2	7,2	3,1	2,1	6503	487	256	160	9,498
	retro	22,7	16,5	13,1	9,1	6,6	3,9	2,7					
28	campo	27,8	24,7	21,6	16,5	14,4	9,3	7,2	8976	674	449	73	6,315
	retro	28,7	23,8	20,9	17,0	14,0	9,4	6,7					
29	campo	18,5	13,4	10,3	8,2	7,2	5,2	4,1	8346	626	416	167	9,087
	retro	18,5	13,8	11,3	8,3	6,3	3,8	2,7					
30	campo	27,8	22,6	18,5	13,4	8,2	5,2	4,1	5574	418	223	113	9,073
	retro	29,1	21,7	17,6	12,6	9,4	5,6	4,0					
31	campo	20,6	18,5	15,4	11,3	8,2	6,2	4,1	8655	649	433	117	8,435
	retro	22,1	17,4	14,7	11,3	8,9	5,7	4,0					
32	campo	14,4	11,3	9,3	7,2	6,2	5,2	4,1	13266	994	661	175	7,967
	retro	14,6	11,5	9,8	7,5	5,9	3,8	2,7					
33	campo	10,3	9,3	8,2	7,2	5,2	4,1	3,1	22362	1678	1114	190	5,167
	retro	11,2	9,2	8,1	6,5	5,3	3,6	2,5					
34	campo	13,4	12,4	11,3	9,3	7,2	5,2	4,1	19423	1454	968	135	5,305
	retro	14,5	12,2	10,8	8,9	7,4	5,0	3,6					
35	campo	13,4	12,4	9,3	7,2	6,2	5,2	4,1	13266	994	661	175	9,758
	retro	14,6	11,5	9,8	7,5	5,9	3,8	2,7					
36	campo	15,4	11,3	9,3	8,2	7,2	5,2	4,1	13266	994	661	163	8,573
	retro	15,2	12,1	10,3	8,0	6,3	4,1	2,9					
37	campo	13,4	10,3	9,3	8,2	7,2	3,1	2,1	13266	994	661	187	8,666
	retro	14,1	11,0	9,3	7,1	5,6	3,5	2,5					

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Subleito	
		15 cm	25 cm	33 cm	47 cm	61 cm	91 cm	120 cm					
38	campo	15,4	11,3	9,3	7,2	5,2	4,1	3,1	9967	747	496	200	4,976
	retro	15,5	11,6	9,5	6,9	5,3	3,2	2,3					
39	campo	13,4	12,4	10,3	8,2	6,2	4,1	3,1	14593	1093	727	163	5,579
	retro	14,6	11,7	10,1	7,9	6,3	4,1	2,9					
40	campo	12,4	11,3	9,3	7,2	6,2	4,1	3,1	17025	1277	849	172	4,392
	retro	13,3	10,8	9,3	7,4	6,0	3,9	2,8					
SEGMENTO 03													
41	campo	20,6	18,5	14,4	12,4	10,3	8,2	6,2	12220	917	609	98	8,774
	retro	21,2	17,6	15,5	12,6	10,4	7,0	5,0					
42	campo	19,6	16,5	12,4	10,3	8,2	6,2	4,1	8655	649	433	133	7,862
	retro	20,5	15,9	13,3	10,1	7,8	4,9	3,5					
43	campo	19,6	14,4	10,3	8,2	5,2	2,1	2,1	6200	484	310	197	5,984
	retro	19,7	13,8	10,8	7,4	5,3	3,1	2,2					
44	campo	14,4	12,4	8,2	7,2	6,2	4,1	2,1	9967	747	496	203	8,535
	retro	15,4	11,5	9,3	6,8	5,2	3,2	2,2					
45	campo	26,8	22,6	16,5	13,4	11,3	7,2	6,2	6744	506	337	97	9,849
	retro	27,4	21,4	18,0	13,8	10,8	6,8	4,8					
46	campo	29,8	25,7	19,6	16,5	13,4	9,3	5,2	6744	506	337	80	8,908
	retro	30,5	24,3	20,8	16,2	12,9	8,3	5,9					
47	campo	25,7	21,6	16,5	12,4	8,2	6,2	3,1	5574	418	278	116	9,325
	retro	27,2	20,2	16,4	11,9	9,0	5,5	3,9					
48	campo	24,7	17,5	14,4	10,3	9,3	5,2	4,1	5017	460	306	131	6,013
	retro	24,7	18,1	14,7	10,7	8,0	4,9	3,4					
SEGMENTO 04													
49	campo	10,3	9,3	7,2	6,2	4,1	2,1	2,1	12623	946	629	270	7,487
	retro	11,9	8,8	7,1	5,2	3,9	2,4	1,7					
50	campo	18,5	16,5	14,4	10,3	6,2	4,1	3,1	10473	785	328	144	9,918
	retro	20,0	15,6	13,0	9,7	7,4	4,5	3,1					
51	campo	14,4	13,4	12,4	9,3	7,2	4,1	3,1	13266	994	661	146	8,585
	retro	16,2	13,0	11,2	8,8	7,1	4,6	3,2					
52	campo	16,5	13,4	10,3	8,2	6,2	5,2	3,1	10337	774	516	165	5,560
	retro	16,9	13,0	10,8	8,2	6,3	4,0	2,8					
53	campo	13,4	12,4	8,2	6,2	5,2	4,1	3,1	10964	822	546	210	9,325
	retro	14,5	10,9	8,9	6,6	5,0	3,1	2,2					
54	campo	14,4	13,4	10,3	8,2	5,2	3,1	2,1	9967	747	496	187	9,006
	retro	16,1	12,1	9,9	7,3	5,6	3,4	2,4					
55	campo	16,5	14,4	10,3	7,2	6,2	5,2	3,1	9397	704	469	171	8,796
	retro	17,3	13,1	10,8	8,0	6,1	3,8	2,7					
56	campo	12,4	11,3	9,3	6,2	4,1	3,1	2,1	10571	793	527	229	8,303
	retro	14,1	10,4	8,4	6,1	4,6	2,8	2,0					

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Subleito	
		15 cm	25 cm	33 cm	47 cm	61 cm	91 cm	120 cm					
57	campo	14,4	12,4	10,3	8,2	6,2	4,1	3,1	13266	994	661	166	3,447
	retro	15,1	11,9	10,1	7,9	6,2	4,0	2,8					
58	campo	19,6	15,4	10,3	7,2	5,2	4,1	3,1	7153	471	358	179	7,679
	retro	19,9	14,2	11,2	7,9	5,8	3,5	2,5					
59	campo	15,4	13,4	11,3	8,2	6,2	4,1	4,1	10964	822	546	162	7,135
	retro	16,7	12,9	10,9	8,3	6,5	4,1	2,9					
60	campo	17,5	11,3	8,2	6,2	4,1	3,1	2,1	5625	518	417	228	4,610
	retro	16,9	11,6	9,0	6,2	4,6	2,7	1,9					
61	campo	14,4	13,4	9,3	7,2	6,2	4,1	2,1	10964	822	546	184	8,072
	retro	15,5	11,9	9,9	7,4	5,7	3,5	2,5					
62	campo	19,6	17,5	13,4	11,3	9,3	6,2	4,1	10473	785	524	116	6,371
	retro	20,4	16,4	14,1	11,1	8,9	5,8	4,1					
63	campo	19,6	17,5	14,4	9,3	6,2	4,1	3,1	9521	714	253	153	9,606
	retro	21,0	16,1	13,2	9,6	7,1	4,2	2,9					
64	campo	14,4	12,4	8,2	6,2	4,1	3,1	2,1	9061	679	451	228	6,788
	retro	15,2	11,0	8,8	6,2	4,6	2,8	2,0					
65	campo	20,6	17,5	15,4	12,4	10,3	7,2	5,2	12672	950	634	99	1,915
	retro	20,8	17,3	15,2	12,4	10,2	6,9	4,9					
66	campo	16,5	15,4	12,4	9,3	8,2	4,1	2,1	11109	834	554	141	9,553
	retro	17,8	14,1	12,0	9,3	7,4	4,7	3,3					
67	campo	28,8	24,7	19,6	15,4	13,4	10,3	8,2	10861	394	597	73	9,607
	retro	28,9	23,4	20,3	16,5	13,6	9,3	6,7					
68	campo	11,3	10,3	9,3	7,2	5,2	3,1	2,1	14070	1055	702	207	7,628
	retro	13,0	10,1	8,5	6,5	5,0	3,2	2,2					
69	campo	19,6	16,5	13,4	9,3	8,2	5,2	4,1	8655	649	433	135	6,049
	retro	20,4	15,7	13,1	9,9	7,7	4,8	3,4					
70	campo	10,3	9,3	7,2	6,2	4,1	3,1	2,1	13885	1041	692	256	6,607
	retro	11,6	8,8	7,2	5,4	4,1	2,5	1,8					
SEGMENTO 05													
71	campo	16,5	12,4	7,2	4,1	3,1	2,1	1,1	6466	382	340	304	7,441
	retro	17,0	10,9	7,9	4,9	3,4	2,0	1,4					
72	campo	10,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	1,1	10549	1004	668	337	3,368
	retro	10,4	7,4	5,9	4,2	3,1	1,9	1,3					
73	campo	13,4	10,3	8,2	5,2	4,1	3,1	2,1	10571	793	527	245	3,636
	retro	13,6	9,9	8,0	5,7	4,3	2,6	1,8					
74	campo	11,3	9,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	12623	946	629	266	4,169
	retro	12,0	8,9	7,2	5,2	4,0	2,4	1,7					
75	campo	11,3	10,3	8,2	4,1	3,1	2,1	1,1	11475	860	485	288	8,865
	retro	12,5	9,1	7,2	5,0	3,7	2,2	1,5					
76	campo	9,3	8,2	6,2	4,1	3,1	2,1	1,1	13389	1004	668	337	5,127
	retro	10,3	7,5	5,9	4,2	3,1	1,9	1,3					

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalísado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Subleito	
		15 cm	25 cm	33 cm	47 cm	61 cm	91 cm	120 cm					
77	campo	11,3	9,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	12623	946	629	266	4,169
	retro	12,0	8,9	7,2	5,2	4,0	2,4	1,7					
78	campo	10,3	9,3	5,2	3,1	2,6	2,1	1,1	13885	820	608	349	8,359
	retro	10,8	7,7	6,0	4,1	3,0	1,8	1,3					
79	campo	15,4	10,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	6187	588	496	251	4,758
	retro	14,9	10,3	8,0	5,6	4,1	2,5	1,8					
80	campo	11,3	9,3	6,2	4,1	3,1	2,1	1,1	12623	860	534	317	4,661
	retro	11,6	8,3	6,6	4,6	3,3	2,0	1,4					
81	campo	12,4	10,3	8,2	5,2	4,1	2,1	2,1	10571	793	527	261	5,208
	retro	13,2	9,5	7,6	5,4	4,0	2,4	1,7					
82	campo	15,4	14,4	11,3	8,2	7,2	5,2	3,1	11371	851	568	152	8,055
	retro	16,9	13,3	11,3	8,7	6,8	4,4	3,1					
83	campo	13,4	11,3	7,2	5,2	4,1	2,1	1,1	10571	793	415	265	6,587
	retro	13,8	10,0	7,9	5,5	4,0	2,3	1,7					
84	campo	13,4	11,3	8,2	5,2	3,1	2,1	1,1	10571	769	415	265	6,937
	retro	13,9	10,1	8,0	5,5	4,0	2,3	1,7					
85	campo	13,4	9,3	8,2	6,2	5,2	4,1	3,1	11628	872	580	225	7,418
	retro	13,5	10,2	8,3	6,1	4,7	2,9	2,0					
86	campo	12,4	8,2	7,2	5,2	3,1	2,1	1,1	9041	847	572	288	3,716
	retro	12,2	8,7	6,9	4,9	3,6	2,2	1,5					
87	campo	10,3	9,3	6,2	4,1	3,1	2,1	2,1	12623	946	629	312	6,349
	retro	11,0	8,0	6,4	4,5	3,4	2,0	1,4					
88	campo	10,3	9,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	13885	1041	692	265	5,767
	retro	11,4	8,6	7,0	5,2	4,0	2,4	1,7					
89	campo	13,4	10,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	10571	733	527	257	4,288
	retro	13,5	9,7	7,8	5,5	4,1	2,5	1,7					
90	campo	11,3	9,3	6,2	5,2	4,1	3,1	2,1	11475	860	572	288	6,339
	retro	12,0	8,7	6,9	4,9	3,7	2,2	1,5					
91	campo	12,4	8,2	7,2	4,1	3,1	2,1	2,1	9041	834	572	288	4,748
	retro	12,2	8,7	6,9	4,9	3,6	2,2	1,5					
92	campo	11,3	10,3	6,2	4,1	3,1	2,1	1,1	11475	860	572	288	8,416
	retro	12,0	8,7	6,9	4,9	3,7	2,2	1,5					
93	campo	10,3	9,3	6,2	5,2	3,1	2,1	1,1	12623	946	629	307	6,224
	retro	11,1	8,1	6,5	4,6	3,4	2,1	1,5					
94	campo	11,3	9,3	7,2	5,2	3,1	2,1	1,1	11475	860	572	288	4,669
	retro	12,0	8,7	6,9	4,9	3,7	2,2	1,5					
95	campo	12,4	10,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	10571	793	527	265	5,441
	retro	13,1	9,5	7,5	5,3	4,0	2,4	1,7					
96	campo	10,3	8,2	7,2	5,2	4,1	2,1	1,1	13885	1041	692	283	4,410
	retro	11,0	8,2	6,7	4,9	3,7	2,3	1,6					

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (1 x 10 ⁻² mm)							Módulo Retroanalizado (MPa)				RMS (µm)
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Revesti-mento	Base (BGS)	Sub-base (MS)	Subleito	
		15 cm	25 cm	33 cm	47 cm	61 cm	91 cm	120 cm					
97	campo	10,3	8,2	6,2	5,2	4,1	3,1	2,1	13885	1041	692	287	5,296
	retro	11,0	8,2	6,6	4,8	3,7	2,2	1,6					
98	campo	11,3	10,3	6,2	4,1	3,1	2,1	1,1	11475	860	572	288	8,416
	retro	12,0	8,7	6,9	4,9	3,7	2,2	1,5					
99	campo	13,4	10,3	7,2	4,1	3,1	2,1	1,1	11628	573	483	292	5,242
	retro	13,7	9,5	7,3	5,0	3,6	2,1	1,5					
100	campo	12,4	10,3	7,2	5,2	4,1	3,1	2,1	10571	793	527	265	5,441
	retro	13,1	9,5	7,5	5,3	4,0	2,4	1,7					
SEGMENTO 06													
101	campo	16,5	15,4	11,3	9,3	7,2	5,2	3,1	11109	834	554	143	7,745
	retro	17,7	14,0	11,9	9,2	7,3	4,6	3,3					
102	campo	17,5	15,4	12,4	9,3	7,2	5,2	3,1	10473	785	524	140	5,351
	retro	18,4	14,4	12,2	9,4	7,4	4,7	3,3					
103	campo	15,4	12,4	9,3	7,2	5,2	2,1	1,1	9061	679	383	221	6,557
	retro	16,1	11,7	9,3	6,5	4,8	2,8	2,0					
104	campo	14,4	11,3	10,3	6,2	4,1	3,1	2,1	9061	679	451	224	6,978
	retro	15,4	11,1	8,9	6,3	4,7	2,8	2,0					
105	campo	15,4	13,4	8,2	6,2	4,1	3,1	1,1	9061	679	362	228	9,070
	retro	16,1	11,6	9,2	6,4	4,7	2,7	1,9					
106	campo	14,4	12,4	9,3	6,2	5,2	4,1	3,1	9967	747	496	203	7,476
	retro	15,4	11,5	9,3	6,8	5,2	3,2	2,2					
107	campo	16,5	13,4	10,3	7,2	5,2	3,1	2,1	8543	640	406	195	4,272
	retro	17,1	12,6	10,1	7,2	5,4	3,2	2,3					
108	campo	12,4	10,3	8,2	6,2	5,2	4,1	3,1	14070	1055	702	207	5,635
	retro	13,0	10,1	8,5	6,5	5,0	3,2	2,2					
109	campo	15,4	12,4	9,3	7,2	6,2	4,1	3,1	9967	747	496	190	5,578
	retro	15,9	12,0	9,8	7,2	5,5	3,4	2,4					
110	campo	17,5	12,4	9,3	6,2	4,1	2,1	2,1	7139	471	376	228	3,352
	retro	17,6	12,1	9,3	6,3	4,6	2,7	1,9					

APÊNDICE I - DIAGRAMAS - MÓDULO DE ELASTICIDADE EQUIVALENTE

Figura 84 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 01 - FWD

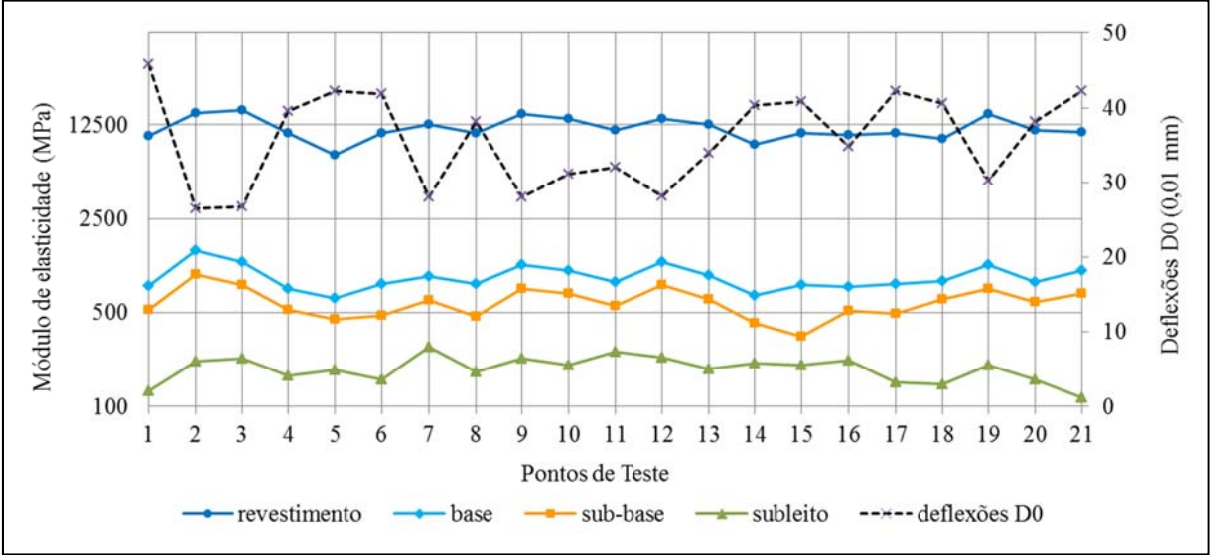


Figura 85 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 01 - VB

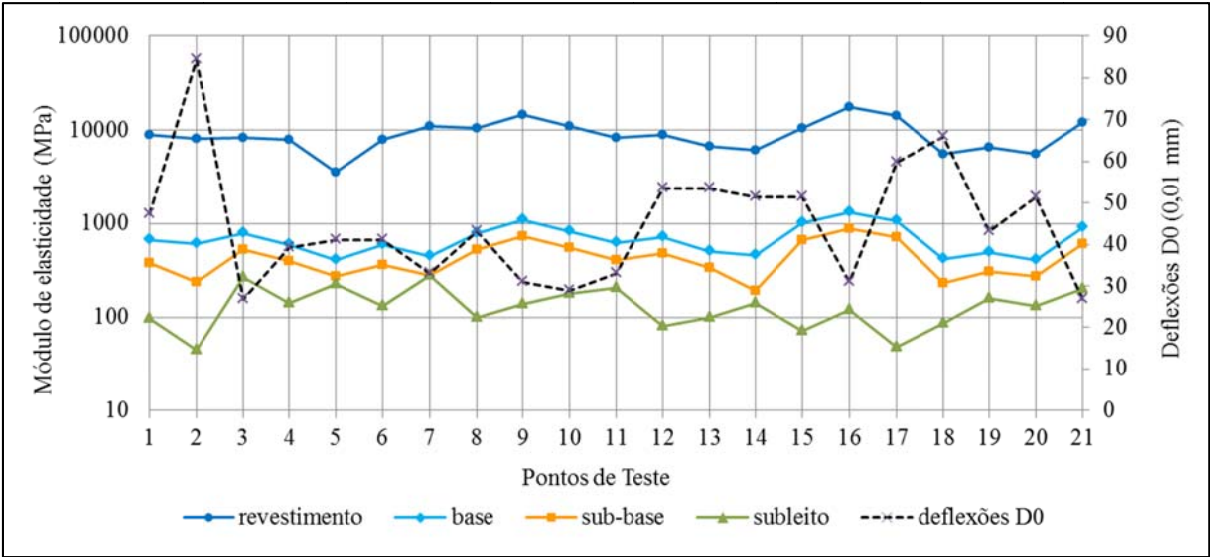


Figura 86 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 03 - FWD

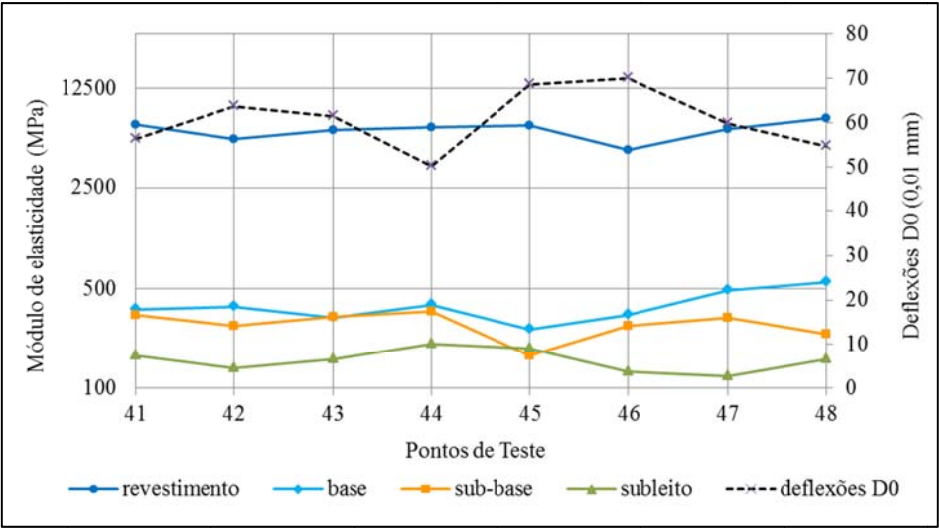


Figura 87 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 03 - VB

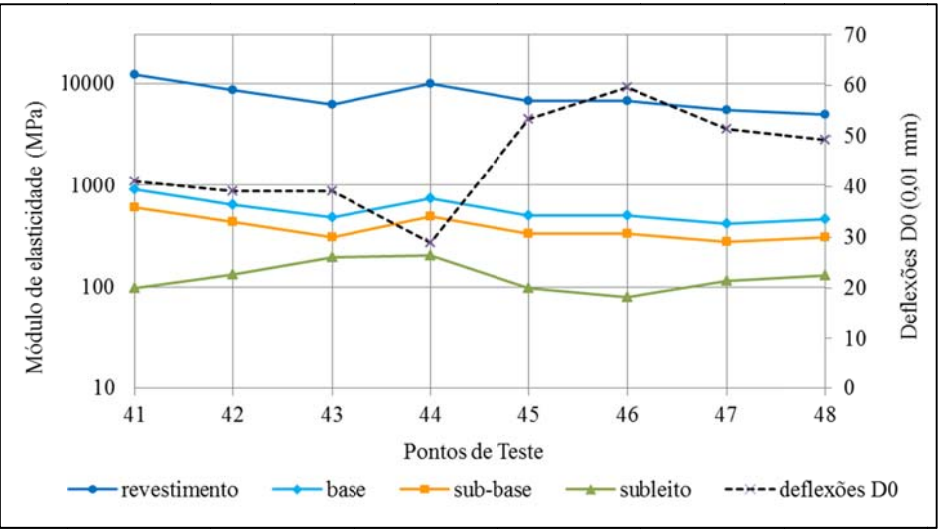


Figura 88 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 04 - FWD

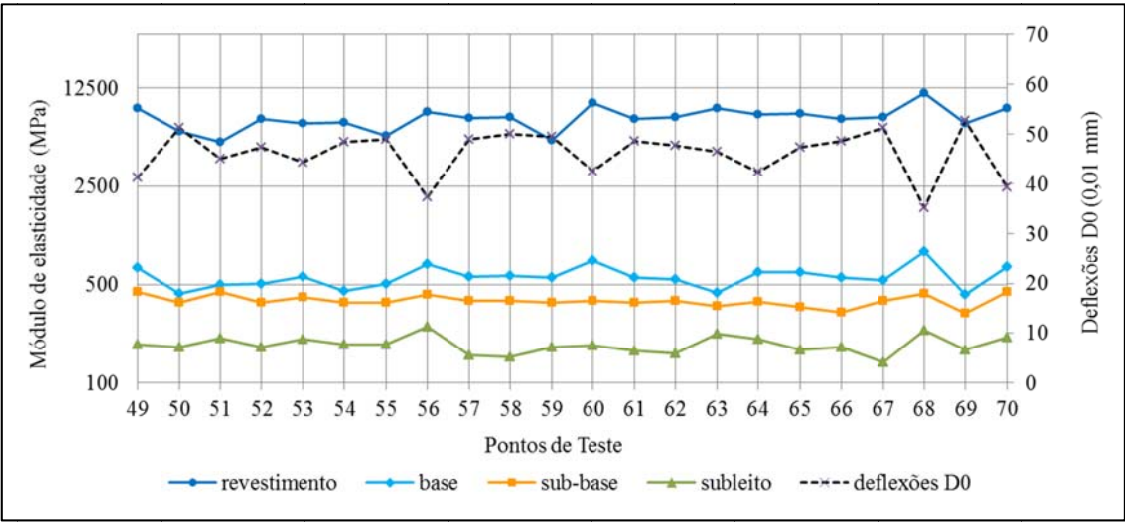


Figura 89 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 04 - VB

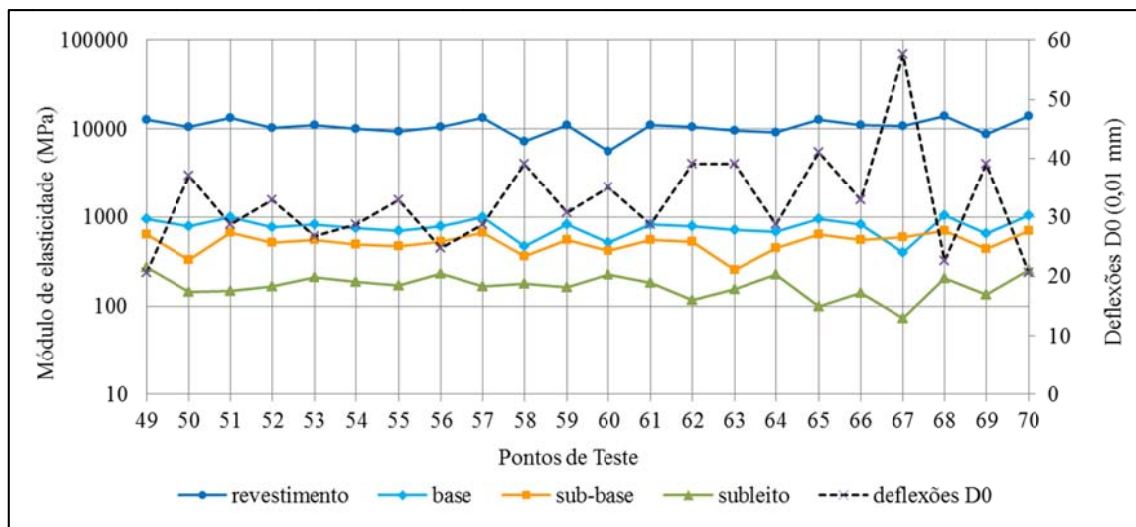


Figura 90 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 05 - FWD

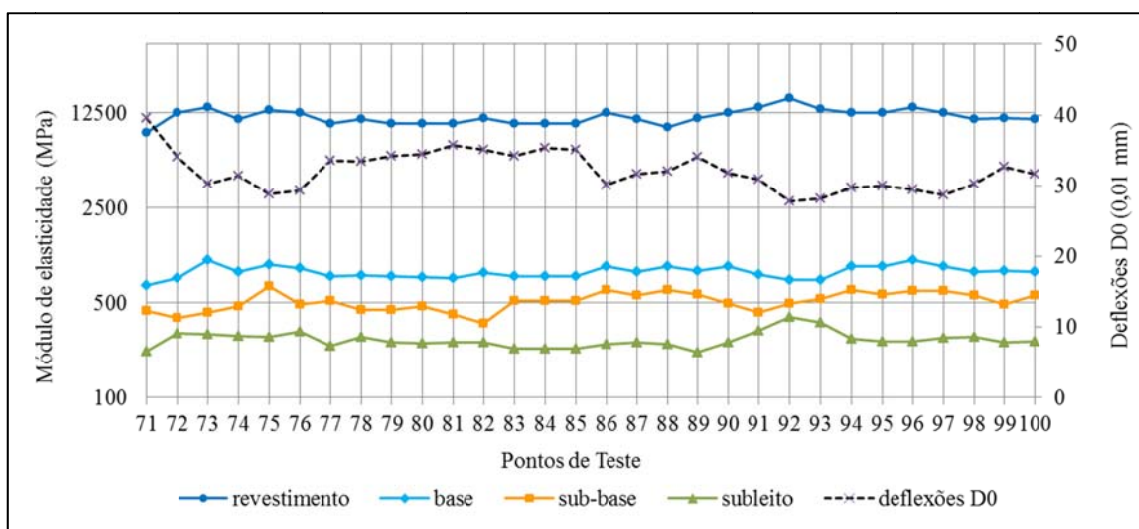


Figura 91 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 05 - VB

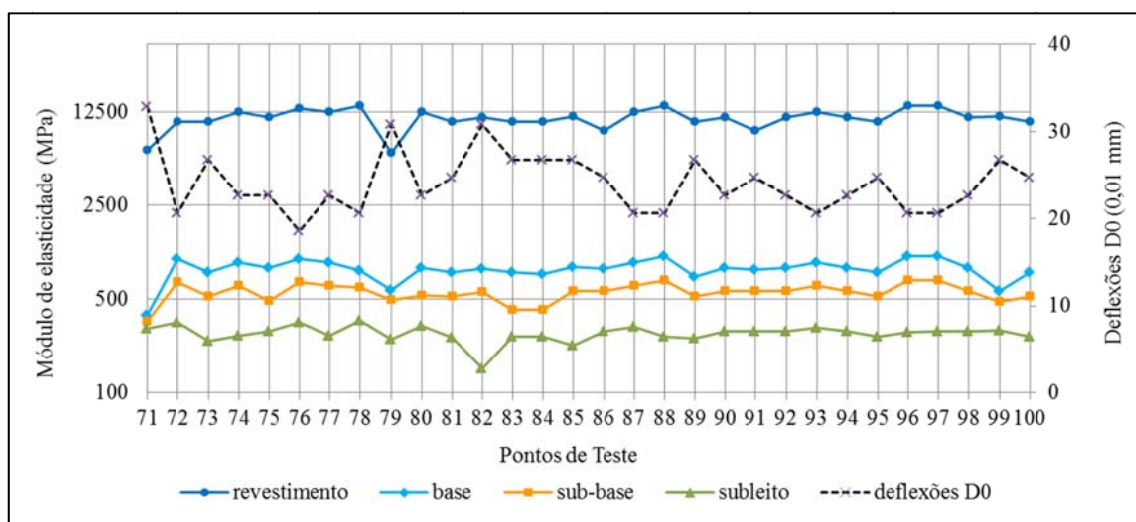


Figura 92 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 06 - FWD

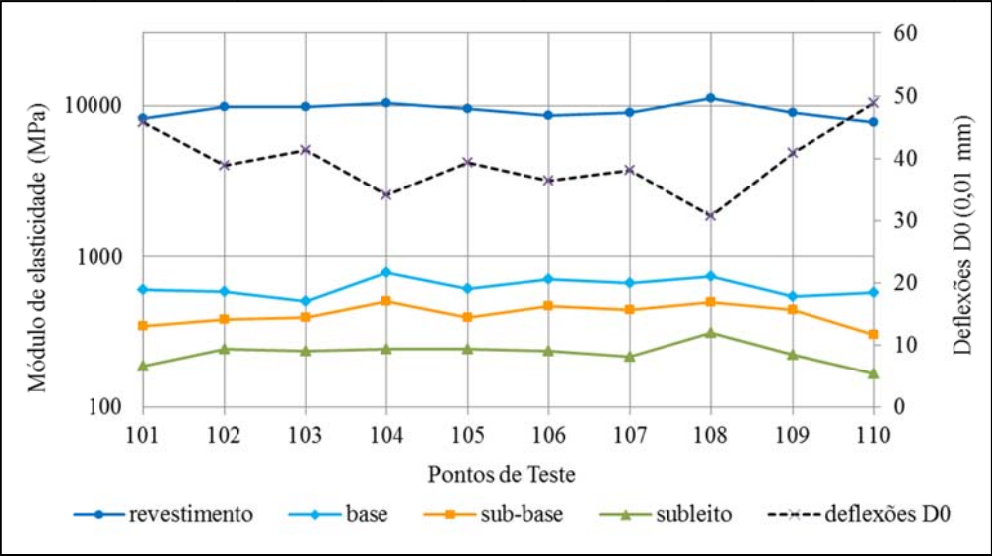
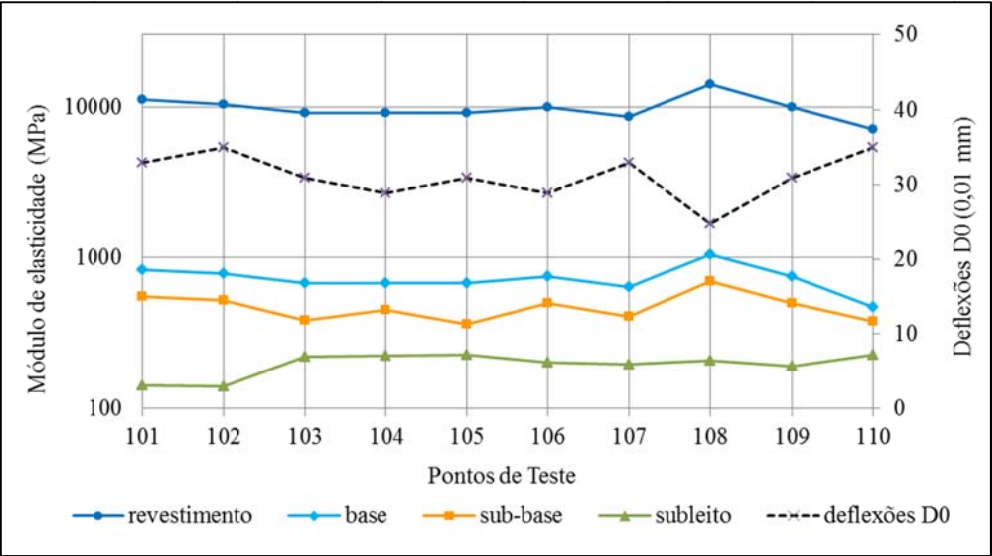


Figura 93 - Módulos de elasticidade equivalentes - Segmento 06 - VB



APÊNDICE J - ANÁLISE DE REGRESSÃO - MÓDULO DE ELASTICIDADE EQUIVALENTE

Figura 94 - Modelos de regressão entre deflexão e módulos retroanalizados para a camada de revestimento asfáltico com o FWD e a viga Benkelman

(continua)

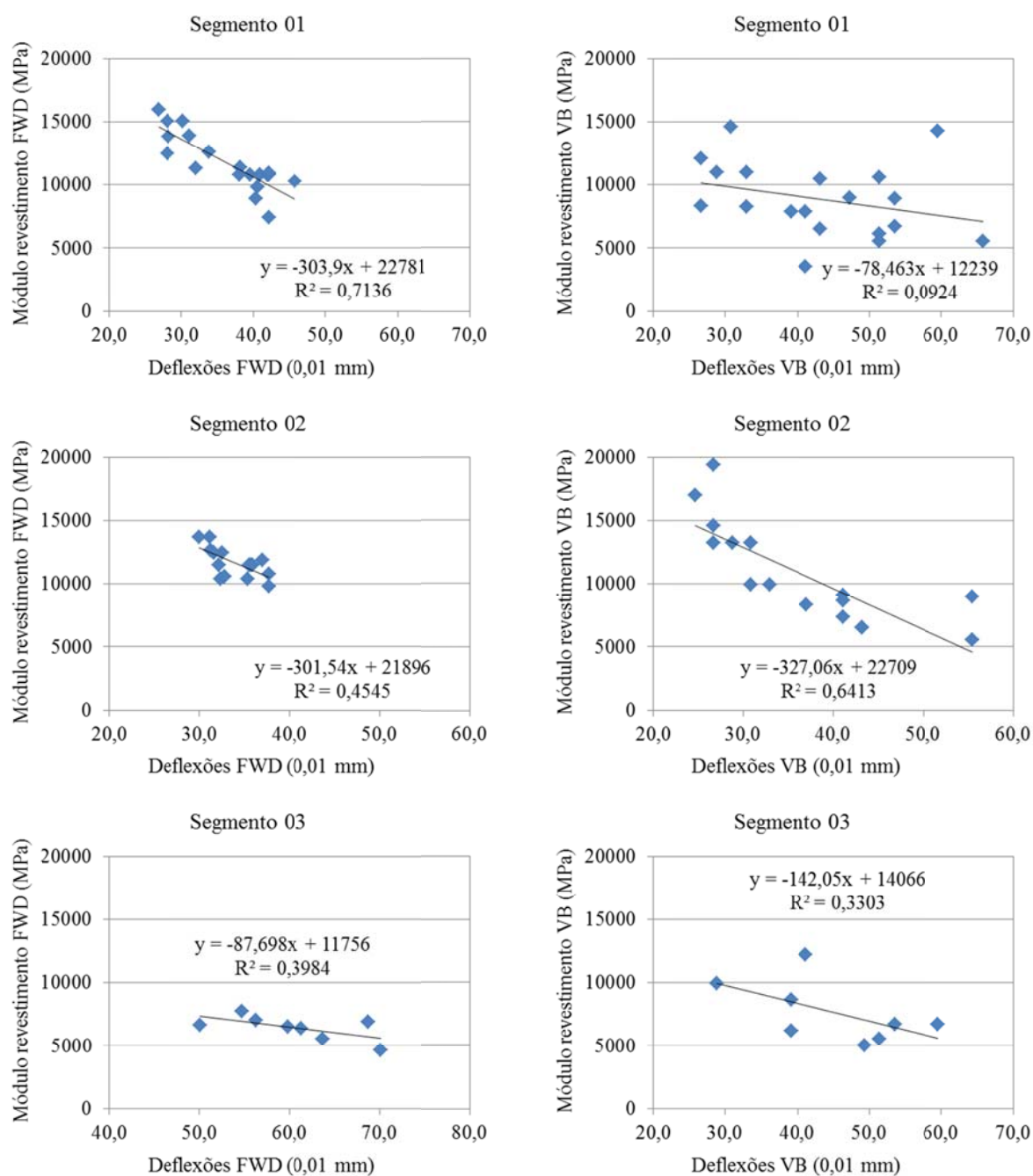


Figura 94 - Modelos de regressão entre deflexão e módulos retroanalísados para a camada de revestimento asfáltico com o FWD e a viga Benkelman (conclusão)

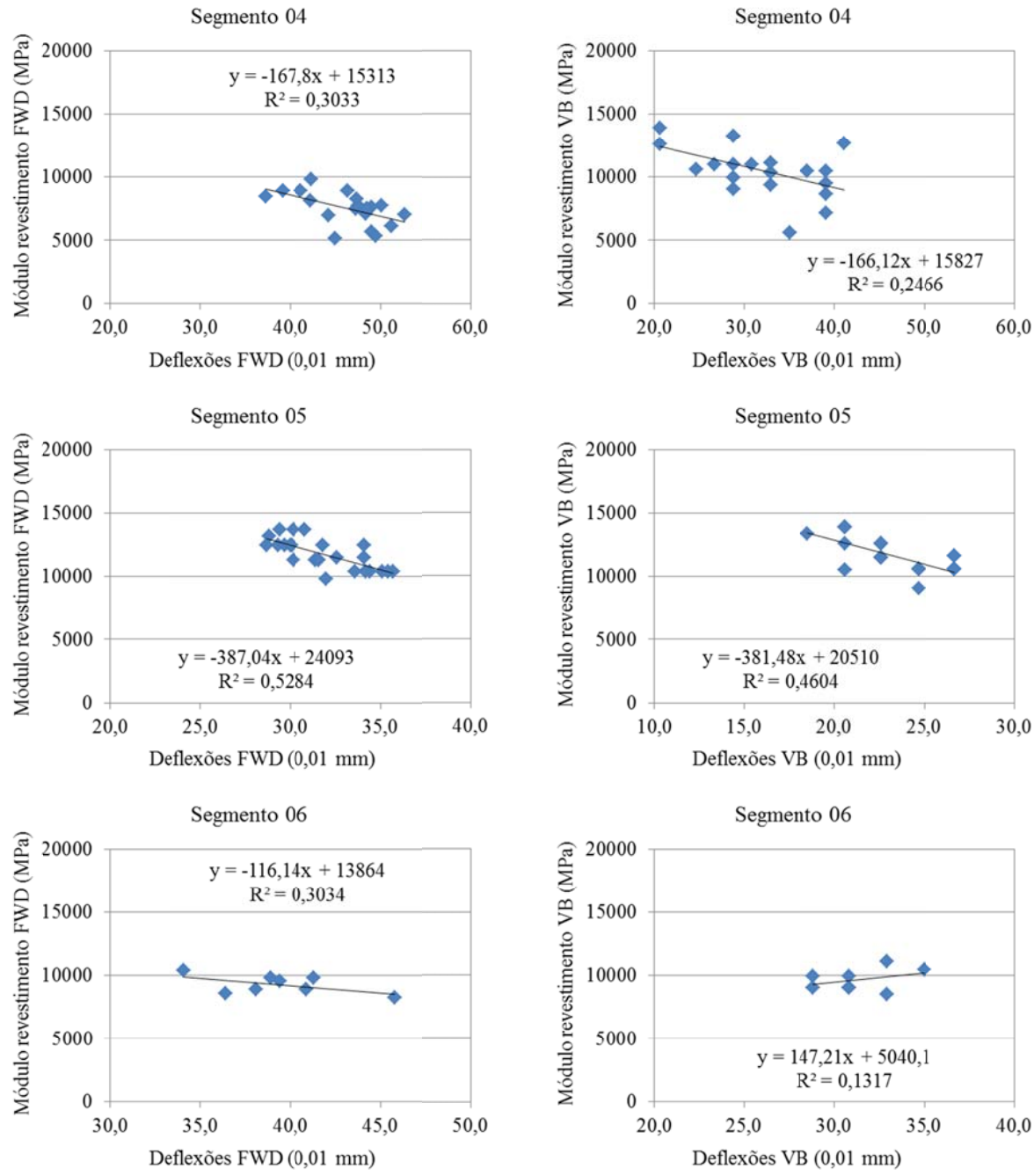


Figura 95 - Modelos de regressão entre deflexão e módulos retroanalísados para a camada de base com o FWD e a viga Benkelman

(continua)

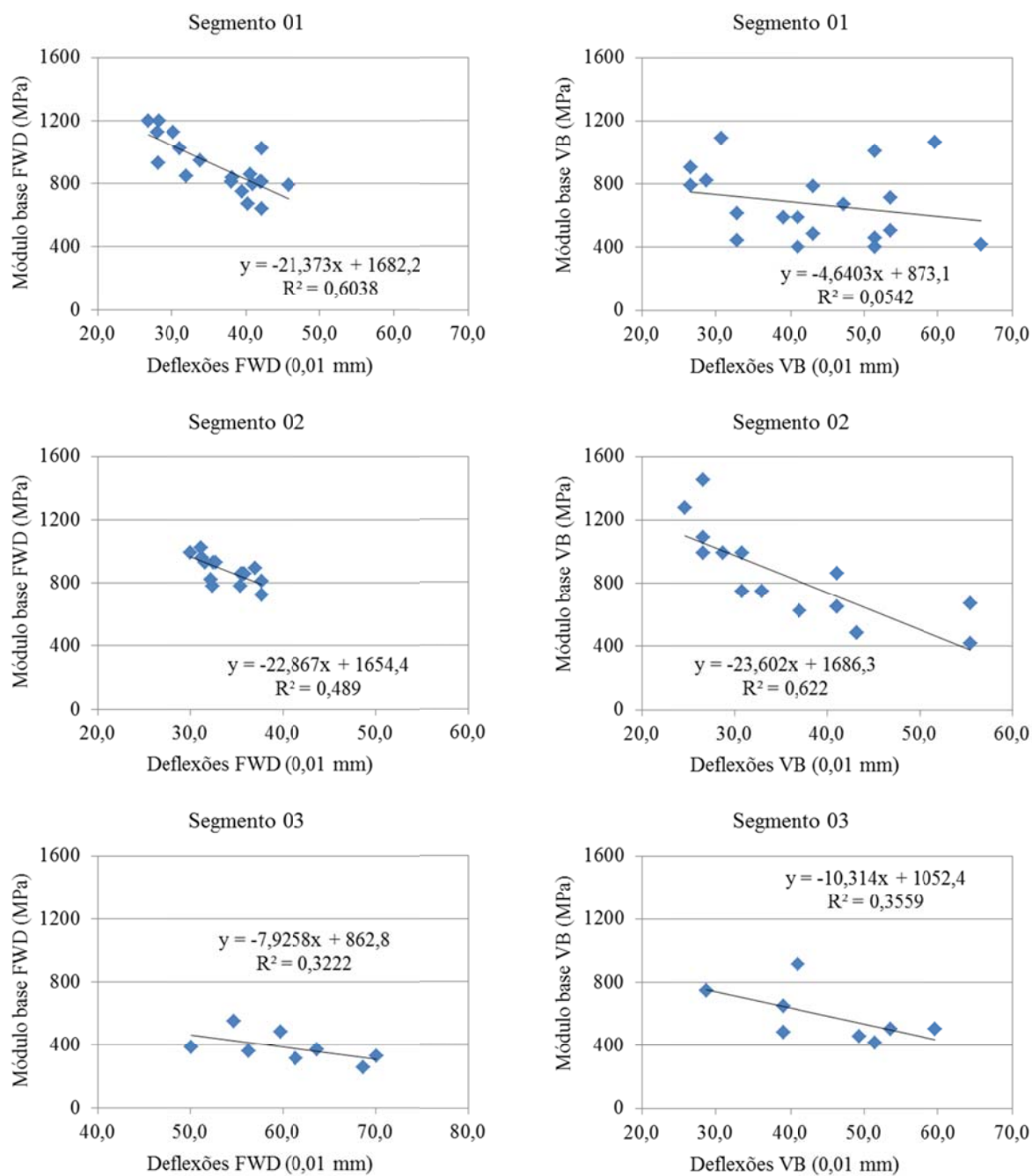


Figura 95 - Modelos de regressão entre deflexão e módulos retroanalizados para a camada de base com o FWD e a viga Benkelman

(conclusão)

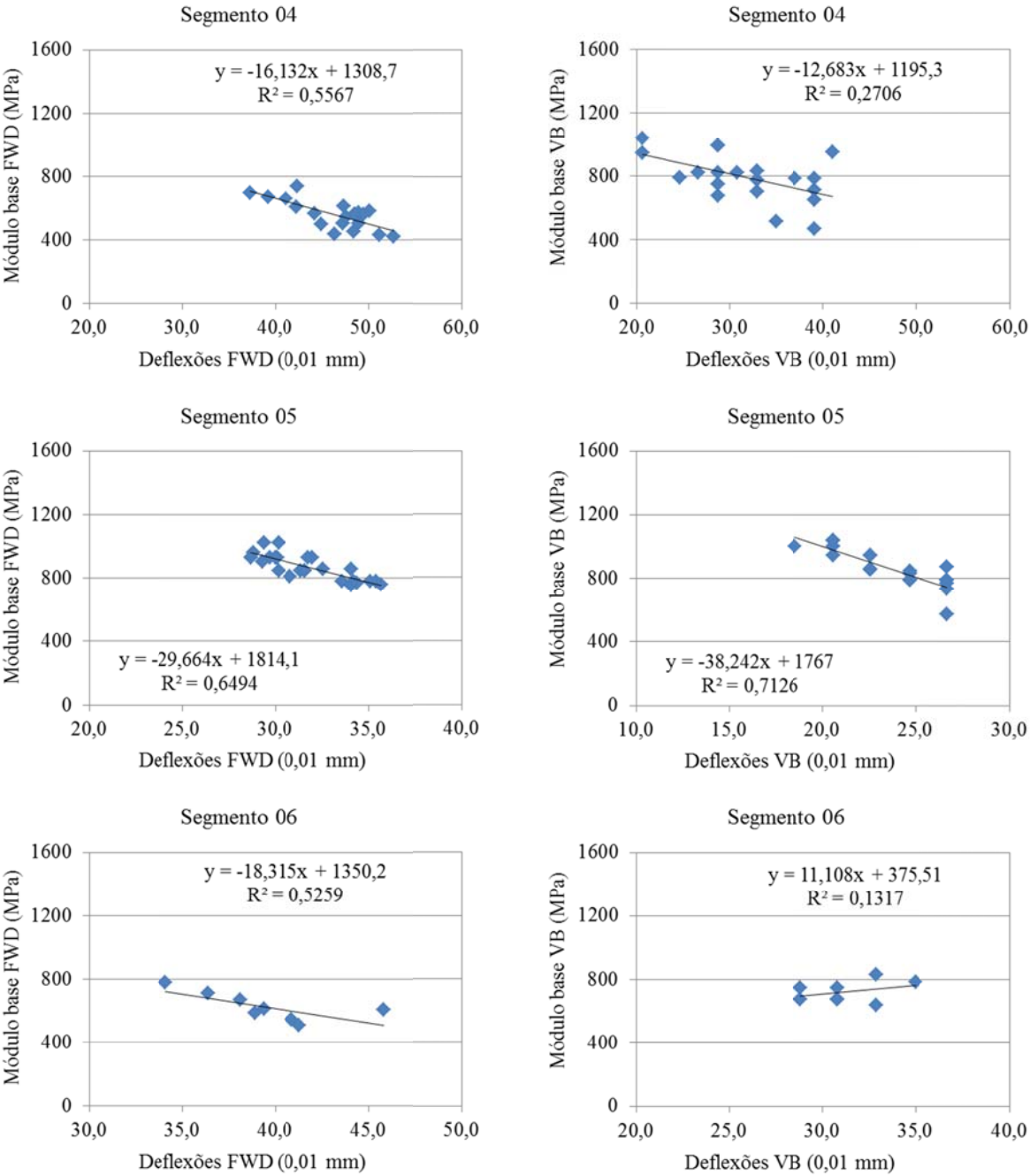


Figura 96 - Modelos de regressão entre deflexão e módulos retroanalísados para a camada de sub-base com o FWD e a viga Benkelman

(continua)

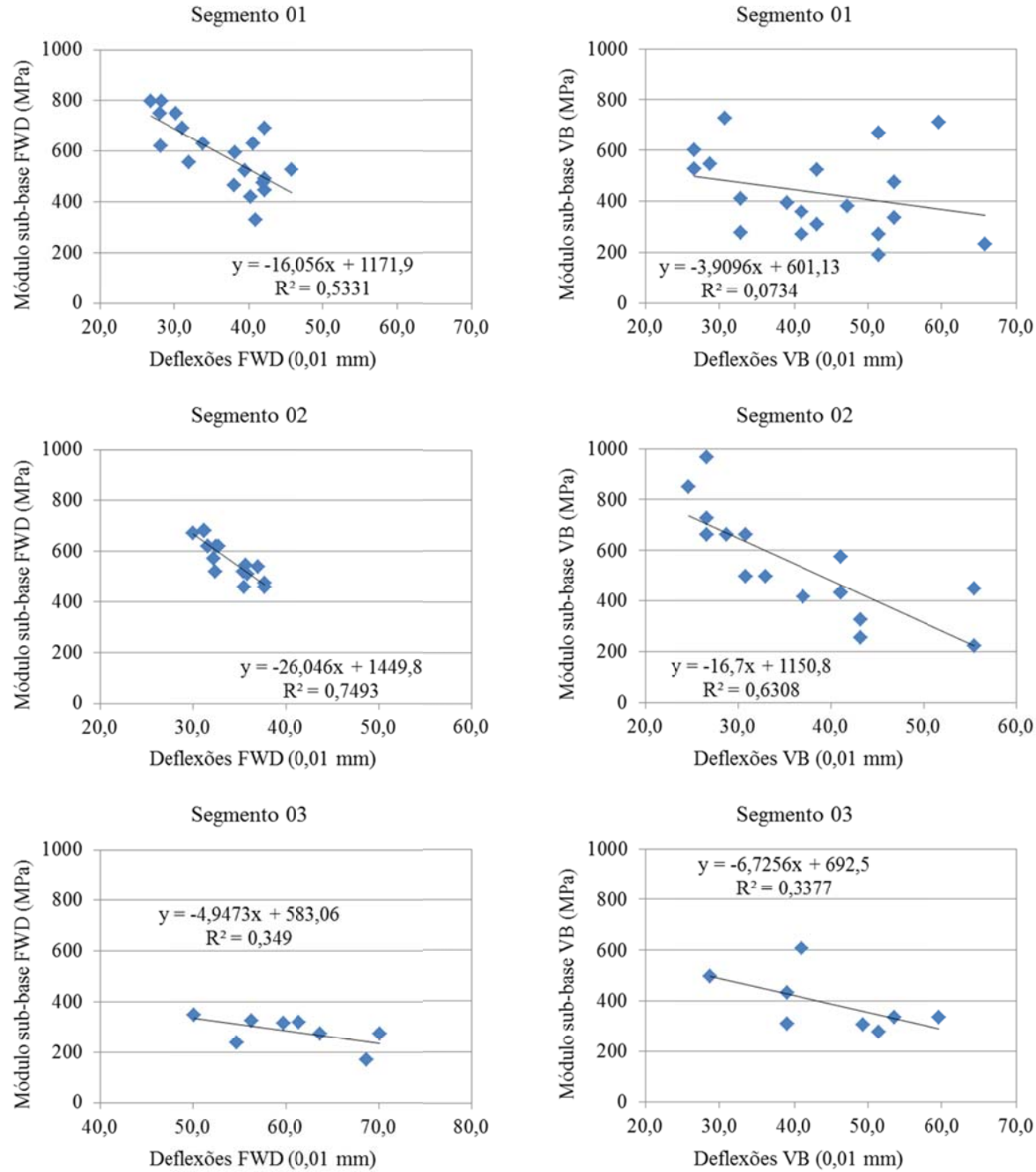


Figura 96 - Modelos de regressão entre deflexão e módulos retroanalísados para a camada de sub-base com o FWD e a viga Benkelman
(conclusão)

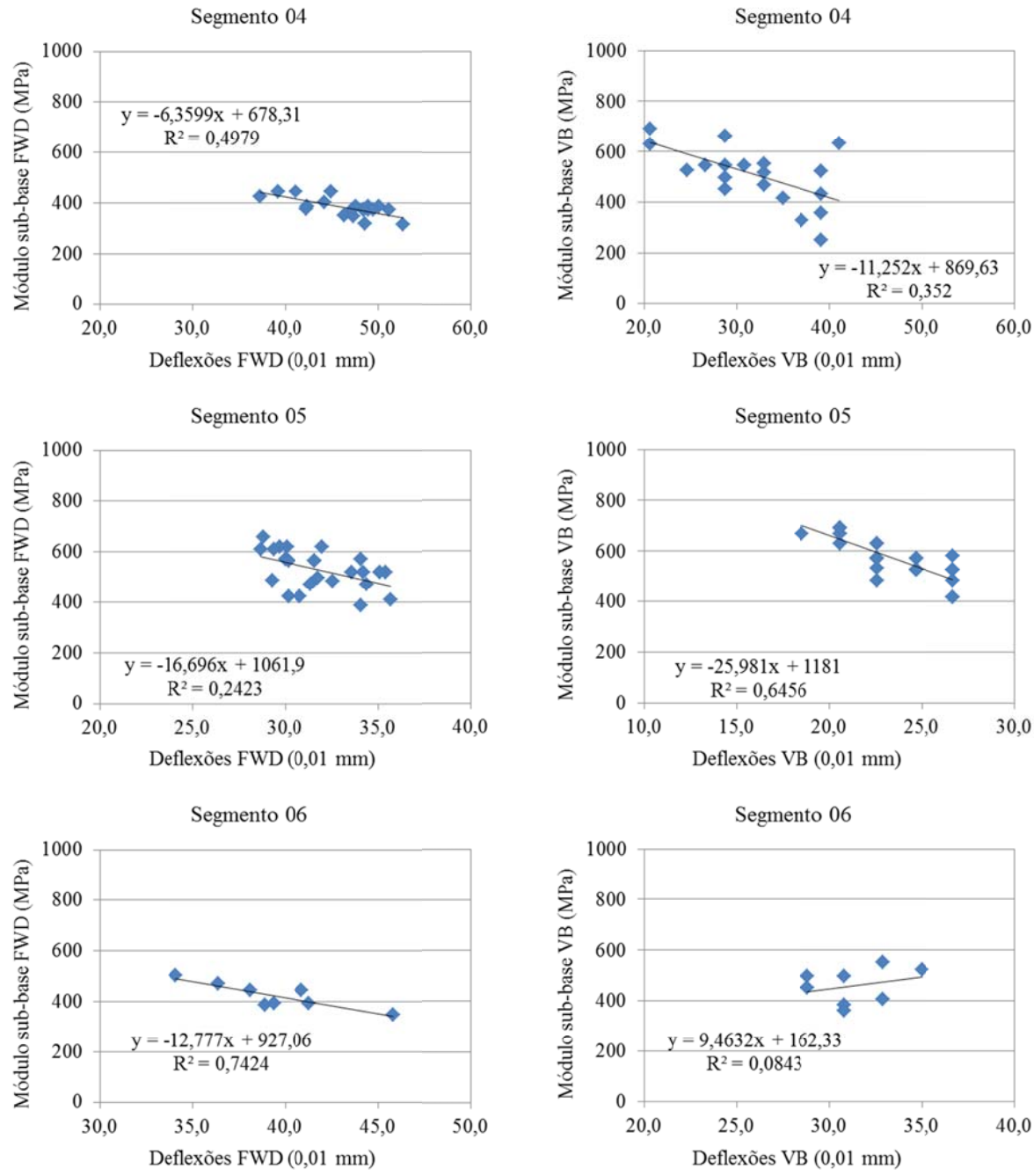


Figura 97 - Modelos de regressão entre deflexão e módulos retroanalizados para a camada de subleito com o FWD e a viga Benkelman

(continua)

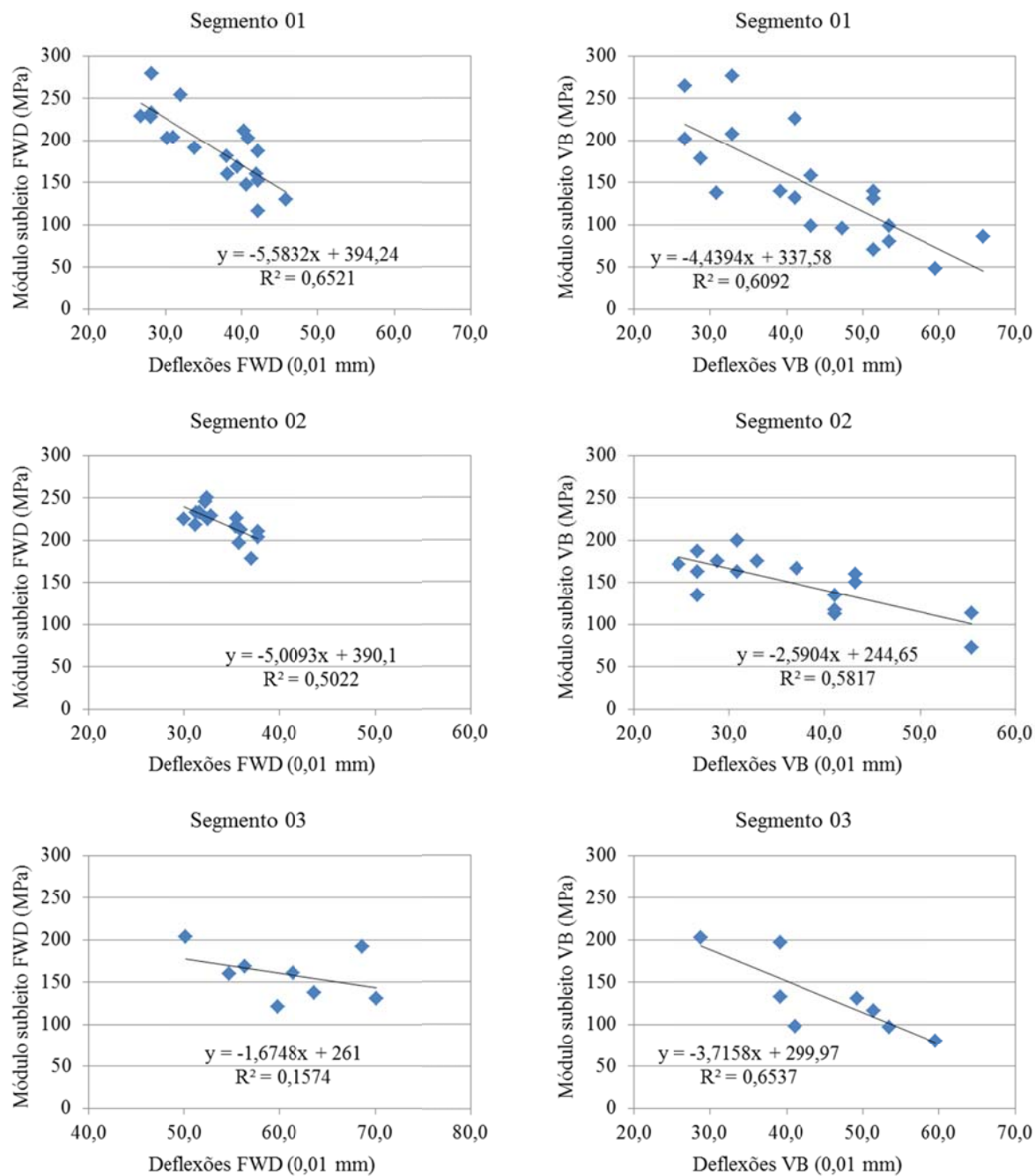
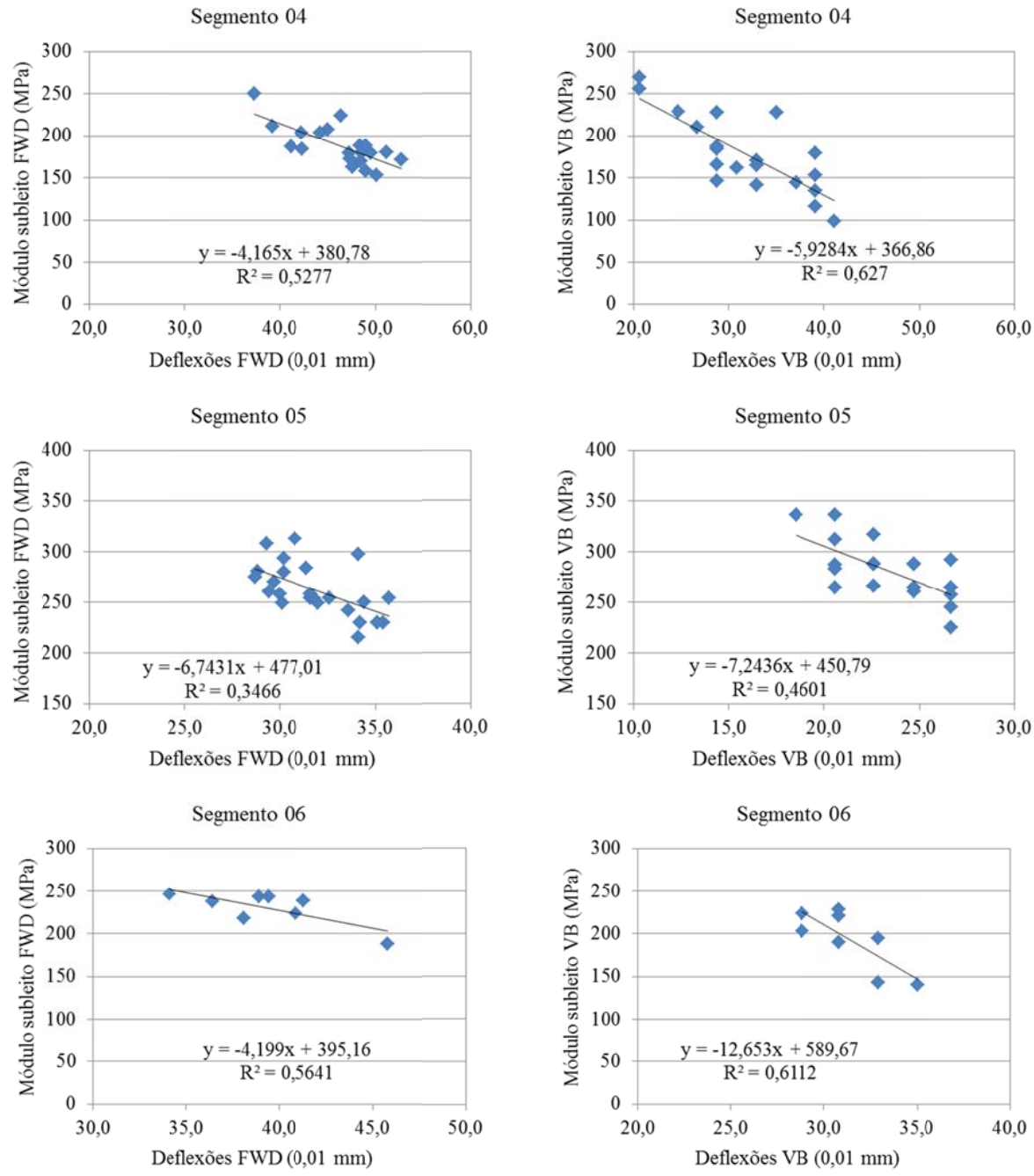


Figura 97 - Modelos de regressão entre deflexão e módulos retroanalizados para a camada de subleito com o FWD e a viga Benkelman
(conclusão)



ANEXO A - CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

Quadro 19 - Condições climáticas no período dos ensaios

Data	Dia da semana	Condição do Tempo	Precipitação (mm)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Tipo de ensaio realizado
01/06/19	sábado	chuva	10,7	18,23	23,37	-
02/06/19	domingo	chuva	13,9	18,45	22,35	-
03/06/19	segunda	chuva	12,9	15,71	23,62	-
04/06/19	terça	nublado	0	13,56	24,41	-
05/06/19	quarta	nublado	0	11,71	24,45	-
06/06/19	quinta	M - chuva T - nublado	2,3	15,08	22,94	FWD
19/08/19	segunda	chuva	13,0	11,43	14,88	-
20/08/19	terça	nublado	0	11,01	14,73	-
21/08/19	quarta	chuva	0,9	13,11	18,66	-
22/08/19	quinta	nublado	0	12,96	19,54	-
23/08/19	sexta	chuva	1,1	13,61	23,18	-
24/08/19	sábado	nublado	0	13,33	21,58	-
25/08/19	domingo	nublado	0	12,80	23,42	-
26/08/19	segunda	M - chuva T - nublado	0,9	14,09	18,91	LWD
27/08/19	terça	nublado	0	16,87	21,86	LWD
28/08/19	quarta	nublado	0	16,71	25,24	LWD
29/08/19	quinta	sol	0	17,56	26,15	-
30/08/19	sexta	sol	0	17,76	27,38	LWD
31/08/19	sábado	M - sol T - chuva	9,7	16,23	25,44	-
01/09/19	domingo	chuva intensa	34,0	13,62	16,33	-
02/09/19	segunda	nublado	0,2	13,43	18,01	-
03/09/19	terça	nublado	1,1	13,17	22,17	LWD
04/09/19	quarta	nublado	0,7	12,82	17,59	LWD
05/09/19	quinta	nublado	1,1	11,45	13,86	LWD
06/09/19	sexta	chuva intensa	16,9	10,92	15,59	-
07/09/19	sábado	nublado	0	14,03	21,19	-
08/09/19	domingo	nublado	0,2	17,09	25,94	-
09/09/19	segunda	M - nublado T - sol	0,2	17,53	28,38	-
10/09/19	terça	sol	0	17,39	30,62	-
11/09/19	quarta	sol	0	16,54	27,94	LWD

Data	Dia da semana	Condição do Tempo	Precipitação (mm)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Tipo de ensaio realizado
12/09/19	quinta	sol/chuva	13,4	17,13	26,64	-
13/09/19	sexta	nublado	2,0	15,93	20,90	LWD
25/11/19	segunda	sol	0	17,35	26,82	-
26/11/19	terça	nublado / chuva	4,4	18,75	25,58	-
27/11/19	quarta	chuva	40,0	18,35	25,09	-
28/11/19	quinta	nublado / chuva	1,8	18,42	26,11	-
29/11/19	sexta	sol	0	16,50	27,55	-
30/11/19	sábado	sol	0	17,87	30,38	-
01/12/19	domingo	sol	0,5	19,68	32,76	-
02/12/19	segunda	sol	0,2	19,31	26,56	-
03/12/19	terça	nublado	0	18,44	24,00	Viga Benkelman
04/12/19	quarta	chuva	19,5	18,17	27,54	-
05/12/19	quinta	chuva	12,1	18,88	31,09	-
06/12/19	sexta	M - nublado T - sol	0,5	18,89	26,44	Viga Benkelman

Onde:

Condição do tempo: relatada pela autora;

M: período da manhã;

T: período da tarde;

Dados de precipitação e temperatura: obtidos a partir da estação meteorológica situada na Rua Belarmino Garcia, bairro Itaum em Joinville. Coordenadas geográficas: 26°20'02.1"S / 48°49'38.5"W.

ANEXO B - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO - FWD

KUAB Konsult & Utveckling AB

Calibration Certificate

The Falling Weight Deflectometer (FWD) with serial number FV112, manufactured by KUAB Konsult & Utveckling AB in Sweden, was in March 2017 calibrated by KUAB's personnel.

After the calibration the FWD FV112 measures with the same accuracy as a new KUAB FWD, and meets all relevant standard, including but not limited to ASTM standard D4694.

Rättvik 2017-03-22
KUAB Konsult & Utveckling AB



Olle Tholén

KUAB Konsult & Utveckling AB
Box 10, 795 21 Rättvik, Sweden
Tel: +46 248 130 24
e-mail: all@kuab.se

Postal address	Telephone	e-mail/Telefax	Visiting address	VAT number
Box 10 S-795 21 Rättvik Sweden	Nat 0248 13024 Int +46 248 13024	all@kuab.se	Faluvägen 6 S-795 35 Rättvik Sweden	SE556311352001

ANEXO C - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO - 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-LFGpro

Device number

Loading mechanism: 6271

Device number

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



Bülstringer 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

ANEXO D - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO - VIGA BENKELMAN



Certificado de Calibração Nº.: 1909-01

1 - Dados do cliente:

Contratante: Moraes Estudos Geológicos EIRELI ME (Solosville)
Endereço: Rua Bagé, 225 - Anita Garibaldi - CEP 89.203-290 - Joinville/SC
Solicitante: O mesmo
Endereço:

2 - Item calibrado:

Equipamento: Viga de Benkelman
Identificação: NS: 19135 Tipo: 02:01 - Relógio Comparador Digimess 10 mm Série: 530420B
Fabricante: Solotest
Identificação do cliente:
Observações:

3 - Calibração:

Norma de Referência: DNER 175-94
Procedimento: PC07
Temp. ambiente(°C): 20,1 a 20,5
Condições Ambientais: Sem ar condicionado
Executado por: Joélson A. Varela
Data da calibração: 02/09/2019
Local da calibração: Laboratório do cliente



Eng. Joélson A. Varela
Crea PR-56861/D

Assinado de forma digital por
JOELSON ALBINO
VARELA:01619451980
Dados: 2019.09.13 01:50:47 -03'00'

- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com n graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95,45%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

- Os resultados apresentados neste documento se aplicam exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.



Certificado de Calibração N°.: 1909-01

4 - Resultados obtidos:

Deslocamento da Extremidade da Viga	Leitura no relógio da viga		Constante				Resultados
	1ª Leitura	2ª Leitura	1ª Leitura	2ª Leitura	Média	U	
mm	mm	mm				mm	
0,00	0,000	0,000	***	***	***	0,003	Constante Média: 2,056
0,10	0,049	0,049	2,041	2,041	2,041	0,10	Desvio Padrão: 0,029
0,20	0,097	0,100	2,062	2,000	2,041	0,09	Desvio P. Média: 0,004
0,30	0,150	0,150	2,000	2,000	2,000	0,04	Erro Est. Média: 0,009
0,40	0,195	0,200	2,051	2,000	2,034	0,07	Lim.Sup. Confiança: 2,065
0,50	0,245	0,250	2,041	2,000	2,027	0,08	Lim.Inf. Confiança: 2,046
0,60	0,290	0,300	2,069	2,000	2,046	0,09	Estatu: Aprovado
0,70	0,340	0,345	2,059	2,029	2,049	0,04	Enquadramento de Aprovação: Caso I
0,80	0,390	0,400	2,051	2,000	2,034	0,10	
0,90	0,430	0,440	2,093	2,045	2,077	0,09	
1,00	0,480	0,490	2,083	2,041	2,069	0,08	
1,20	0,570	0,580	2,105	2,069	2,093	0,07	
1,40	0,670	0,680	2,090	2,059	2,079	0,06	
1,60	0,760	0,780	2,105	2,051	2,087	0,10	
1,80	0,860	0,870	2,093	2,069	2,085	0,05	
2,00	0,970	0,960	2,062	2,083	2,069	0,04	
2,20	1,080	1,070	2,037	2,056	2,043	0,04	
2,50	1,220	1,220	2,049	2,049	2,049	0,05	
3,00	1,450	1,460	2,069	2,055	2,064	0,05	
3,50	1,690	1,700	2,071	2,059	2,067	0,05	
4,00	1,940	1,950	2,062	2,051	2,058	0,05	
4,50	2,190	2,200	2,055	2,045	2,052	0,05	

padrões utilizados na calibração						
tipo	capacidade	identificação	laboratório	certificado	calibração	validade
Micrômetro	30mm	MIC-02	K&L CAL 0144 (RBC)	S001922/2018	19/01/18	01/20

Notas:

- 1 - Relógio da viga posicionado em meio para início da operação.
2- Intervalo de confiança dentro do especificado: 1,90 à 2,10.

**ANEXO E - ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA A MISTURA
ASFÁLTICA**



LAPAV
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS



RELATÓRIO LP

08/2019

Controle de Qualidade – Mistura asfáltica

INFRASUL INFRAESTRUTURA E
EMPREENHIMENTO LTDA

ABRIL | 2019



Porto Alegre, 12 de abril de 2019

LAPAV/PPGCI/2019

Ao Sr. Adriano Schmidt
Infrasul Infraestrutura e empreendimento Ltda

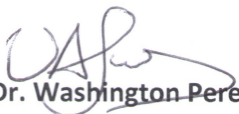
Ref: Corpos de prova de concreto asfáltico moldados em laboratório.

Prezado Senhor,

Encaminhamos os resultados obtidos para os três corpos de prova de concreto asfáltico enviados pelo solicitante, sendo determinado o módulo de resiliência, segundo procedimento de ensaio preconizado pela norma DNIT-ME 135. Salienta-se que a resistência à tração por compressão diametral utilizada no ensaio foi a disponibilizada pela empresa

Qualquer dúvida estamos a disposição.

Atenciosamente,


Prof. Dr. Washington Peres Nuñez
Coordenador do LAPAV



Laboratório de Pavimentação
www.ufrgs.br/lapav
lapav@ufrgs.br

Av. Bento Gonçalves, 9500.
Prédio 43.816.
Bairro Agronomia.
CEP 91509-900.
Porto Alegre/RS

Fones: +55 51 3308-7049
+55 51 3308-7944

ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Solicitante:	Infrasul
Procedência:	Corpos de prova de concreto asfáltico moldados
Data:	12/04/2019
Operador:	Débora e Eduarda

Observações:

MR e RT em MPa
Altura e Diâmetro em cm.
Cálculo MR e RT.

C.P ID	Diâm.	Altura	MR ₁	MR ₂	MR ₃	MR ₄	MR ₅	MR ₆	MR _{méd}	MR _{desv}	RT utilizada
1	6.26	10.12	6858	6837	6858	7778	7826	7873	7338	535	0.81
2	6.17	10.12	11504	11608	11361	10544	10740	10906	11111	439	
3	7.08	10.12	7513	7510	7507	6820	6838	6759	7158	387	