

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

ANA CLAUDIA BOETTCHER

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A PARTIR DE
MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS PARA
SIMULAR AS MEDIDAS DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS DO ENSAIO FWD**

JOINVILLE

2023

ANA CLAUDIA BOETTCHER

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A PARTIR DE
MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS PARA
SIMULAR AS MEDIDAS DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS DO ENSAIO FWD**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.
Orientadora: Profa. Dra. Adriana Goulart dos Santos.

JOINVILLE

2023

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

Boettcher, Ana Claudia

Avaliação estrutural de pavimentos asfálticos a partir de modelos de elementos finitos estáticos e dinâmicos para simular as medidas das bacias deflectométricas do ensaio FWD / Ana Claudia Boettcher. -- 2023.
245 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, 2023.

1. Avaliação estrutural de pavimentos. 2. Retroanálise. 3. Módulo resiliente equivalente. 4. FWD. 5. Método dos elementos finitos . 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.

ANA CLAUDIA BOETTCHER

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A PARTIR DE
MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS PARA
SIMULAR AS MEDIDAS DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS DO ENSAIO FWD**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.
Orientadora: Profa. Dra. Adriana Goulart dos Santos.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Adriana Goulart dos Santos
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membros:

Profa. Dra. Heliana Barbosa Fontenele
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof^o. Dr. Fábio Zanchetta
Universidade de Brasília - UnB

Joinville, 30 de janeiro de 2023.

Aos pesquisadores brasileiros, que provam todos os dias que com a ciência tudo pode se tornar real.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus, por abençoar minhas vitórias, por me dar forças quando a vontade maior era desistir e por me conceder a vontade de viver, crescer, estudar e evoluir apesar de qualquer pedra encontrada no caminho.

Ao meu santo protetor, Santo Expedito, por sempre me tranquilizar e ajudar nas horas difíceis.

Aos meus pais, Lenir e Edegar, e ao meu namorado, Fillipe, por todo amor, apoio, parceria, compreensão e suporte nessa trajetória da minha vida.

À minha orientadora, Dra. Adriana Goulart dos Santos, pelo incentivo e dedicação ao meu projeto de pesquisa, pela disponibilidade, por toda confiança e por todas as dúvidas esclarecidas.

Aos professores, Dra. Heliana Barbosa Fontenele e Dr. Fábio Zanchetta, por terem aceitado o convite de participar da banca examinadora.

A todos os professores do curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina que tiveram sabedoria e paciência para compartilhar seus conhecimentos.

Aos colegas, Naloan Coutinho Sampa, Claudia Celene Zago Nery, Caroline Angélica Berkenbrock e Ariane Lúcia Oss-Emer, por toda ajuda e conselhos ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

À Universidade do Estado de Santa Catarina (que já fez parte da minha vida acadêmica na graduação) por todo suporte e adequações prestados durante a pandemia do coronavírus.

A todos que tive a oportunidade de conhecer nessa jornada e que de alguma forma participaram ou contribuíram para a conquista de mais esse desafio.

“O começo de todas as ciências é o
espanto de as coisas serem o que são.”
(ARISTÓTELES [3-? a.C.]

RESUMO

O pavimento, ao longo da sua vida útil, deve ter seu comportamento estrutural avaliado periodicamente. Neste cenário, a avaliação da capacidade de carga dos pavimentos fornece dados importantes, tanto para a avaliação da sua vida útil, quanto para determinação de estratégias de reforço. A avaliação da capacidade de carga pode ser obtida através de ensaios que forneçam as medidas de deflexão das camadas dos pavimentos quando submetidos à ação de uma carga. Entre os ensaios não destrutivos que fornecem as bacias deflectométricas do pavimento, destacam-se a Viga Benkelman (VB) e o *Falling Weight Deflectometer* (FWD). A partir da leitura das bacias de deflexão é possível determinar os módulos resilientes equivalentes das camadas dos pavimentos mediante o processo de retroanálise. Os métodos convencionais de retroanálise são baseados em procedimentos de otimização iterativa e a resposta do pavimento é calculada através da Teoria dos Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE) ou pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). A pesquisa é motivada pela aplicação mecanística-empírica na investigação estrutural das vias rodoviárias existentes e tem sua relevância baseada na proposta de um modelo de elementos finitos que pode ser utilizado na previsão das respostas estruturais dos pavimentos. Dessa forma, a pesquisa teve como objetivo comparar modelos de elementos finitos estáticos e dinâmicos, que simulem as medidas das bacias deflectométricas do ensaio FWD, e encontrar o melhor modelo para realizar a retroanálise dos módulos resilientes equivalentes das camadas do pavimento. E ainda, teve como objetivo obter os módulos resilientes equivalentes através da TSCE. Com base na TSCE, a pesquisa aplica os *softwares* BackMeDiNa e BAKFAA para obtenção dos módulos resilientes equivalentes a partir da comparação das bacias teóricas com as bacias medidas em campo. Já para as simulações numéricas das bacias deflectométricas através do MEF, a pesquisa utiliza o *software* Abaqus para modelagem axissimétrica 2D do pavimento sob condições estáticas e dinâmicas de aplicação da carga do ensaio FWD. As retroanálises foram aplicadas em dois trechos da Estrada Rio do Morro, localizada em Joinville/SC, sendo os dados dos ensaios VB e FWD, obtidos através dos estudos de Nery (2020). Com relação aos resultados obtidos com a retroanálise através da TSCE, o BackMeDiNa gerou menores erros quadráticos médios (RMS) quando comparado ao BAKFAA, o que significa que as bacias recalculadas são mais próximas das medidas em campo. As retroanálises realizadas com os dados da VB geraram maiores desvios padrões e coeficientes de variação quando comparados com os dados do FWD. Os módulos gerados pelo BackMeDiNa, em sua maioria, foram maiores que os obtidos pelo BAKFAA. Já a retroanálise através do MEF se mostrou satisfatória para obtenção dos módulos resilientes equivalentes do pavimento, pois os resultados dos erros relativos e erros RMS foram próximos a 5%, mesmo critério de parada estabelecido pelos *softwares* BackMeDiNa e BAKFAA. Concluiu-se que a bacia calculada através do MEF, mais próxima a de campo, foi a bacia deflectométrica simulada no modelo de elementos finitos dinâmico sem aderência entre as camadas do pavimento, com geometria axissimétrica 2D de 5000 x 5000 mm, uma vez que, apresentou os menores erros relativos e menores erros RMS.

Palavras-chave: Avaliação estrutural de pavimentos. Retroanálise. Módulo resiliente equivalente. FWD. Método dos Elementos Finitos. Teoria dos Sistemas de Camadas Elásticas. Bacia deflectométrica.

ABSTRACT

The pavement, throughout its useful life, must have its structural behavior evaluated periodically. In this scenario, the evaluation of the pavements load capacity provides important data, for the evaluation of its service life and for determining reinforcement strategies. This evaluation of the load capacity can be obtained through tests that provide the deflection measures of the pavement layers when subjected to the action of a load. Among the non-destructive tests that provide the pavement deflection basins, the Benkelman Beam (BB) and the Falling Weight Deflectometer (FWD) stand out. From reading the deflection basins, it is possible to determine the equivalent resilient modules of the pavement layers through the backcalculation process. Conventional backcalculation methods are based on iterative optimization procedures and the pavement response is calculated using the Multilayered Elastic Theory (MET) or the Finite Element Method (FEM). The research is motivated by the mechanistic-empirical application in the structural investigation of existing roadways and its relevance is based on the proposal of a finite element model that can be used in predicting the structural responses of pavements. Thus, the research aimed to compare static and dynamic finite element models, which simulate the measurements of the deflection basins of the FWD test, and to find the best model to perform the backcalculation of the equivalent resilient modules of the pavement layers. Furthermore, it aimed to obtain the equivalent resilient modules through the MET. Based on the MET, the research applies the BackMeDiNa and BAKFAA software to obtain equivalent resilient modules from the comparison of theoretical basins and the ones measured in the field. As for the numerical simulations of the deflection basins through the FEM, the research uses the Abaqus software for 2D axisymmetric modeling of the pavement under static and dynamic conditions of application of FWD test load. The backcalculation were applied in two sections on "Estrada Rio do Morro", located in Joinville/SC, and data from the VB and FWD tests obtained through studies by Nery (2020). In the results obtained with the backcalculation through the MET, the BackMeDiNa generated smaller root mean squared errors (RMS) when compared to the BAKFAA, which means that the backcalculated basins are closer to the field measurements. The backcalculation carried out with the BB data generated higher standard deviations and coefficients of variation when compared with the FWD data. The modules generated by BackMeDiNa, for the most part, were larger than those obtained by BAKFAA. The backcalculation through the FEM was satisfactory for obtaining the pavement equivalent resilient modules, since the results of the relative errors and RMS errors were close to 5%, the same stopping criterion established by the BackMeDiNa and BAKFAA software. It was concluded that the basin calculated through the FEM, closest to the field basin, was the deflection basin simulated in the dynamic finite element model without adherence between the pavement layers, with 2D axisymmetric geometry of 5000 x 5000 mm, because it presented the smallest relative errors and minor RMS errors.

Keywords: Pavements structural evaluation. Backcalculation. Equivalent resilient module. FWD. Finite Element Method. Multilayered Elastic Theory. Deflection basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tensões, deformações e deslocamentos em pavimento asfáltico.	33
Figura 2 - Esquema de carregamento do ensaio de compressão diametral.	35
Figura 3 - Esquema do ensaio triaxial de cargas repetidas.....	36
Figura 4 - Tensões atuantes em um corpo deformável.	39
Figura 5 - Formato característico da bacia de deflexão.	42
Figura 6 - Bacia de deflexão - redução gradual das deflexões com o aumento da distância a partir do ponto de aplicação da carga.....	43
Figura 7 - Bacia de deflexão - ponto de inflexão próximo ao ponto de aplicação da carga, comportamento mais flexível.	43
Figura 8 - Representação da região de ação de cada índice.	46
Figura 9 - Posição da VB e da prova de carga.....	50
Figura 10 - Ensaio VB em campo.....	50
Figura 11 - Procedimento de leitura da VB para obtenção da deformada - em planta.	51
Figura 12 - Procedimento de leitura da VB para obtenção da deformada - resultado.	51
Figura 13 - Configuração de um Ensaio FWD.....	53
Figura 14 - Esquema de um deflectômetro de impacto.	53
Figura 15 - Linha de influência do equipamento FWD Kuab.	54
Figura 16 - Equipamento FWD - carga circular e sensores.....	55
Figura 17 - Adequação das distâncias de aplicação da carga.	57
Figura 18 - Condições C1 e C2 para retroanálise de Theisen <i>et al.</i> (2009).	58
Figura 19 - Raio equivalente na adaptação VB para FWD de Bueno (2016).	59
Figura 20 - Raio equivalente na adaptação VB para FWD de Medina e Motta (2015).	60
Figura 21 - Temperatura do ar e do pavimento em um dia de verão - Rio de Janeiro.	61
Figura 22 - Variação das deflexões máximas em função da temperatura.....	62
Figura 23 - Bacias deflectométricas obtidas através do ensaio FWD em campo em diferentes horas do dia.	63
Figura 24 - Bacias deflectométricas corrigidas pela Equação 14.	64

Figura 25 - Ábaco adaptado para correção das deflexões em função da temperatura.	65
Figura 26 - Ábaco para correção das deflexões em função da temperatura da AASHTO.	65
Figura 27 - Linha neutra em camadas não aderidas.	67
Figura 28 - Linha neutra em camadas aderidas.	67
Figura 29 - Camadas não aderidas - diagrama de tensões pouco distribuído.	69
Figura 30 - Camadas aderidas - diagrama de tensões bem distribuído.	69
Figura 31 - Sistema de coordenadas adotado com base no FWD.	73
Figura 32 - Eixo padrão adotado no <i>software</i> MeDiNa.	74
Figura 33 - Elementos finitos de uma estrutura estratificada.	80
Figura 34 - Fluxograma de análise de um projeto com o uso de elementos finitos.	80
Figura 35 - Resumo - Análise da geometria da estrutura.	81
Figura 36 - Modelo axissimétrico.	82
Figura 37 - Simplificação para um modelo bidimensional axissimétrico 2D.	83
Figura 38 - Fluxograma - Etapas da pesquisa.	93
Figura 39 - Fluxograma - Etapa 01 da pesquisa.	94
Figura 40 - Estado de Santa Catarina - Cidades de Joinville e Araquari.	95
Figura 41 - Rodovia Estrada Rio do Morro - Joinville/Araquari	96
Figura 42 - Planta de localização da Estrada Rio do Morro.	96
Figura 43 - Camadas do pavimento.	98
Figura 44 - Segmentos da Estrada Rio do Morro.	99
Figura 45 - Fluxograma - Etapa 02 da pesquisa.	101
Figura 46 - Eixo padrão rodoviário considerado nesta pesquisa.	102
Figura 47 - Fluxograma - Etapa 03 da pesquisa - BackMeDiNa.	108
Figura 48 - Modelo da tabela para preenchimento do arquivo bacias FWD - BackMeDiNa.	109
Figura 49 - Modelo da tabela para preenchimento do arquivo bacias VB - BackMeDiNa.	110
Figura 50 - Distribuição de tensões e deformações que definem a unicidade dos conjuntos de módulos de resiliência retroanalizados.	111
Figura 51 - Modelo da tela com os parâmetros iniciais imputados no BackMeDiNa.	112

Figura 52 - Bacias devem ser retroanalizadas até ficarem verde conforme critério de parada - BackMeDiNa.	113
Figura 53 - Bacias deflectométricas medidas x calculadas - BackMeDiNa.	114
Figura 54 - Fluxograma - Etapa 03 da pesquisa - BAKFAA.	115
Figura 55 - BAKFAA com os dados FWD preenchidos para iniciar a retroanálise. .	116
Figura 56 - BAKFAA com os dados VB preenchidos para iniciar a retroanálise.	117
Figura 57 - Bacias deflectométricas medidas x calculadas - BAKFAA.	118
Figura 58 - Fluxograma - Etapa 04 da pesquisa - Construção do modelo no Abaqus.	119
Figura 59 - Coordenadas do desenho do modelo no Abaqus.	121
Figura 60 - Construção das diferentes partes do modelo.	122
Figura 61 - 12 modelos com os dados FWD BackMeDiNa dos segmentos 02 e 04.	123
Figura 62 - Definições das condições de contorno no Abaqus.	125
Figura 63 - Forma de aplicação da carga do ensaio FWD simulado no Abaqus.	126
Figura 64 - Padrão das cargas aplicadas nas simulações dinâmicas e estáticas. ...	127
Figura 65 - Distribuição da malha no modelo estático.	128
Figura 66 - Distribuição da malha no modelo dinâmico.	128
Figura 67 - Modelo dinâmico axissimétrico com um quarto do cilindro.	130
Figura 68 - Modelo dinâmico axissimétrico em revolução 360°.	130
Figura 69 - Deflexão média D0 no segmento 02 para os ensaios FWD e VB.	132
Figura 70 - Plotagem da deflexão média D0 a D6 no segmento 02 para os ensaios FWD e VB.	133
Figura 71 - Deflexão média D0 no segmento 04 para os ensaios FWD e VB.	133
Figura 72 - Plotagem da deflexão média D0 a D6 no segmento 04 para os ensaios FWD e VB.	134
Figura 73 - Comparação das deflexões D0 de VB e FWD ponto a ponto.	135
Figura 74 - Bacias deflectométricas médias - ensaios FWD.	135
Figura 75 - Bacias deflectométricas médias - ensaios VB.	136
Figura 76 - <i>Boxplot</i> das medidas de deflexão.	137
Figura 77 - Valores do parâmetro de bacia Rc.	138
Figura 78 - Valores do parâmetro de bacia SCI.	139
Figura 79 - Valores do parâmetro de bacia BDI.	140
Figura 80 - Valores do parâmetro de bacia BCI.	140

Figura 81 - Valores do parâmetro de bacia D0.....	141
Figura 82 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 02 - FWD - BackMeDiNa.	151
Figura 83 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 02 - VB - BackMeDiNa. .	151
Figura 84 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 04 - FWD - BackMeDiNa.	152
Figura 85 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 04 - VB - BackMeDiNa. .	152
Figura 86 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 02 - FWD - BAKFAA.	153
Figura 87 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 02 - VB - BAKFAA.....	154
Figura 88 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 04 - FWD - BAKFAA.	154
Figura 89 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 04 - VB - BAKFAA.....	155
Figura 90 - Módulos resilientes equivalentes médios - Segmento 02.	156
Figura 91 - Módulos resilientes equivalentes médios - Segmento 04.	158
Figura 92 - Módulos médios do revestimento - comparativo.....	160
Figura 93 - Módulos médios da base - comparativo.....	160
Figura 94 - Módulos médios da sub-base - comparativo.....	161
Figura 95 - Módulos médios do subleito - comparativo.	161
Figura 96 - Plotagem do resultado da bacia de deflexão - modelo estático com aderência - segmento 04.	165
Figura 97 - Plotagem do resultado da bacia de deflexão - modelo dinâmico sem aderência - tempo 0 e tempo 0,025s - segmento 02.	165
Figura 98 - Deflexões para os 7 geofones ao longo do tempo - segmento 02, dinâmico sem aderência.	166
Figura 99 - Magnitude da carga em relação a variação de D0.....	167
Figura 100 - Bacias simuladas nos modelos estáticos - Segmento 02 - Abaqus. ...	168
Figura 101 - Bacias simuladas nos modelos dinâmicos - Segmento 02 - Abaqus. .	168
Figura 102 - Bacias simuladas nos modelos estáticos - Segmento 04 - Abaqus. ...	169
Figura 103 - Bacias simuladas nos modelos dinâmicos - Segmento 04 - Abaqus. .	169
Figura 104 - Deflexões dos modelos do segmento 02.	174
Figura 105 - Deflexões dos modelos do segmento 04.	174
Figura 106 - Bacias simuladas no modelo dinâmico com o intervalo de módulos sementes - Segmento 02 - Abaqus.	177
Figura 107 - Bacias simuladas no modelo dinâmico com o intervalo de módulos sementes - Segmento 04 - Abaqus.	178

Figura 108 - Deflexões obtidas na retroanálise dos módulos do segmento 02.	179
Figura 109 - Deflexões obtidas na retroanálise dos módulos do segmento 04.	179
Figura 110 - Módulos resilientes equivalentes - Retroanálise segmento 02.	180
Figura 111 - Módulos resilientes equivalentes - Retroanálise segmento 04.	181
Figura 112 - Módulos do revestimento - segmento 02 - BackMeDiNa e BAKFAA. .	220
Figura 113 - Módulos da base - segmento 02 - BackMeDiNa e BAKFAA.....	221
Figura 114 - Módulos da sub-base - segmento 02 - BackMeDiNa e BAKFAA.	221
Figura 115 - Módulos do subleito - segmento 02 - BackMeDiNa e BAKFAA.	222
Figura 116 - Módulos do revestimento - segmento 04 - BackMeDiNa e BAKFAA. .	223
Figura 117 - Módulos do base - segmento 04 - BackMeDiNa e BAKFAA.....	224
Figura 118 - Módulos do sub-base - segmento 04 - BackMeDiNa e BAKFAA.	224
Figura 119 - Módulos do subleito - segmento 04 - BackMeDiNa e BAKFAA.	225

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores usuais do MR, conforme DER-SP (2006).....	37
Tabela 2 - Valores usuais dos módulos na literatura, ensaios de laboratório e retroanálises.	37
Tabela 3 - Valores típicos do coeficiente de Poisson, conforme DER-SP (2006).	41
Tabela 4 - Valores típicos do coeficiente de Poisson, conforme Balbo (2007).....	41
Tabela 5 - Classificação dos pavimentos com base granular quanto aos parâmetros da bacia de deflexão.....	46
Tabela 6 - Comparação entre equipamentos FWD das empresas do mercado.....	55
Tabela 7 - Adaptações do carregamento VB para FWD de Bueno (2016).....	59
Tabela 8 - Adaptações do carregamento VB para FWD de Medina e Motta (2015).	60
Tabela 9 - Valor de β da Equação 14.....	63
Tabela 10 - Variáveis presentes no BackMeDiNa e AEMC.....	73
Tabela 11 - Condições de aderência consideradas no BackMeDiNa e AEMC.	74
Tabela 12 - Variáveis presente no BAKFAA.....	77
Tabela 13 - Condições de aderência consideradas no BAKFAA.	77
Tabela 14 - Critérios de erros admissíveis.	78
Tabela 15 - Modelos de geometria propostas da literatura.	83
Tabela 16 - Tipos de análises propostas da literatura - estática ou dinâmica.	86
Tabela 17 - Tipos de análises propostas da literatura.....	88
Tabela 18 - Parâmetros de projeto da rodovia.	97
Tabela 19 - Estruturas do pavimento.	97
Tabela 20 - Características dos segmentos homogêneos e pontos de ensaio.	98
Tabela 21 - Distâncias das deflexões VB recalculadas pela metodologia C2.	102
Tabela 22 - Deflexões VB do segmento 02 ajustadas pela metodologia C2.....	103
Tabela 23 - Deflexões VB do segmento 04 ajustadas pela metodologia C2.....	103
Tabela 24 - Correção de temperatura conforme Bueno <i>et al.</i> (2020).....	104
Tabela 25 - Bacias deflectométricas medidas com a VB (divididas por 2 - método C2) corrigidas para temperatura 25°C nos segmentos 02 e 04.....	105
Tabela 26 - Bacias deflectométricas medidas com o FWD corrigidas para temperatura 25°C nos segmentos 02 e 04.	105
Tabela 27 - Bacias deflectométricas FWD 02 corrigidas para carga 40 kN.	106
Tabela 28 - Bacias deflectométricas FWD 04 corrigidas para carga 40 kN.	107

Tabela 29 - Espessura e camadas no BackMeDiNa.	110
Tabela 30 - Coeficientes de Poisson adotados no BackMeDiNa.	111
Tabela 31 - Módulos de resiliência adotados no BackMeDiNa e módulos “sementes”.	112
Tabela 32 - Sistema de unidades adotado no Abaqus.....	120
Tabela 33 - Dimensões de cada camada no Abaqus.	120
Tabela 34 - Definição da massa específica em kg/m ³ para simulação dinâmica. ...	122
Tabela 35 - Definições das condições de contorno no Abaqus.....	125
Tabela 36 - Definições das malhas de cada modelo no Abaqus.....	129
Tabela 37 - Intervalo dos módulos sementes utilizados nas retroanálises MEF.	131
Tabela 38 - Valores finais dos módulos resilientes equivalentes do segmento 02 - BackMeDiNa.....	145
Tabela 39 - Valores finais dos módulos resilientes equivalentes do segmento 04 - BackMeDiNa.....	145
Tabela 40 - Configuração final dos módulos resilientes equivalentes do segmento 02 - BAKFAA.	148
Tabela 41 - Configuração final dos módulos resilientes equivalentes do segmento 04 - BAKFAA.	149
Tabela 42 - Bacias de deflexão obtidas nos diferentes modelos do segmento 02..	171
Tabela 43 - Bacias de deflexão obtidas nos diferentes modelos do segmento 04..	171
Tabela 44 - Localização dos pontos de teste utilizados na pesquisa.	201
Tabela 45 - Dados obtidos com o equipamento FWD para o segmento 02.	201
Tabela 46 - Dados obtidos com o equipamento FWD para o segmento 04.	202
Tabela 47 - Dados obtidos com o equipamento VB para o segmento 02.	202
Tabela 48 - Dados obtidos com o equipamento VB para o segmento 04.	202
Tabela 49 - Valores dos módulos do segmento 02 - ensaio FWD - BackMeDiNa. .	204
Tabela 50 - Valores dos módulos do segmento 02 - ensaio VB - BackMeDiNa.....	205
Tabela 51 - Valores dos módulos do segmento 04 - ensaio FWD - BackMeDiNa. .	206
Tabela 52 - Valores dos módulos do segmento 04 - ensaio VB - BackMeDiNa.....	207
Tabela 53 - Variação na correção das bacias deflectométricas medidas em campo x reajustadas para os ensaios FWD e VB do segmento 02.....	208
Tabela 54 - Variação na correção das bacias deflectométricas medidas em campo x reajustadas para os ensaios FWD e VB do segmento 04.....	210

Tabela 55 - Valores dos módulos do segmento 02 - ensaio VB - com correção da deflexão em função da temperatura - BackMeDiNa.	212
Tabela 56 - Valores dos módulos do segmento 04 - ensaio VB - com correção da deflexão em função da temperatura - BackMeDiNa.	213
Tabela 57 - Valores dos módulos do segmento 02 - ensaio FWD - BAKFAA.	214
Tabela 58 - Valores dos módulos do segmento 02 - ensaio VB - BAKFAA.	215
Tabela 59 - Valores dos módulos do segmento 04 - ensaio FWD - BAKFAA.	216
Tabela 60 - Valores dos módulos do segmento 04 - ensaio VB - BAKFAA.	217
Tabela 61 - Valores dos módulos do segmento 02 - ensaio VB - com correção da deflexão em função da temperatura - BAKFAA.	218
Tabela 62 - Valores dos módulos do segmento 04 - ensaio VB - com correção da deflexão em função da temperatura - BAKFAA.	219

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
BC	Bica Corrida
BCI	<i>Base Curvature Index</i>
BDI	<i>Base Damage Index</i>
BGS	Brita Graduada Simples
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CF	<i>Curvature Function</i>
cm	Centímetros
CV	Coeficiente de Variação
DEINFRA	Departamento Estadual de Infraestrutura
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DP	Desvio Padrão
EF	Elementos Finitos
ESRD	Eixo Simples de Roda Dupla
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
In	<i>Inch</i> (polegada)
kg	Quilograma
kgf	Quilograma-força
km	Quilômetros
kN	Quilo-Newton
kPa	Quilo-Pascal
lb	Libra
m	Metros
m ³	Metro cúbico

mm	Milímetros
μm	Micrometro
MEF	Método dos Elementos Finitos
MH	Macadame Hidráulico
MND	Métodos Não Destrutivos
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de Resiliência ou Módulo Resiliente
N	Número de repetições do eixo padrão de 8,2 tf
PSI	<i>Pound force per Square Inch</i> (libra-força por polegada quadrada)
R	Raio
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RS	Rio Grande do Sul (estado)
s	Segundos
SC	Santa Catarina (estado)
SC	Solo Cimento
SCA	Solo Cal
SCI	<i>Surface Curvature Index</i>
SMC	Solo Melhorado com Cimento
tf	Tonelada Força
TSCE	Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
VB	<i>Viga Benkelman</i>
WASHO	<i>Western Association of State Highway Officials</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Porcento
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$^{\circ}$	Graus
$\delta_{m\acute{a}x}$	Deslocamento vertical
ε_t	Deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento
ε_c	Deformação vertical de compressão no topo da camada do subleito
ε_x	Deformação de tração no diâmetro horizontal
σ_x	Tensão horizontal
σ_y	Tensão vertical
MR	Módulo de resiliência
μ	Coeficiente de Poisson
σ_d	Tensão de desvio aplicada repetidamente
ε_R	Deformação específica axial resiliente, correspondente a um número particular de repetição da tensão desvio
ε_{long}	Deformação longitudinal
δ	Alteração no comprimento “L” da barra com a aplicação da carga P
L	Comprimento da barra
ε_{lat}	Deformação lateral
δ'	Alteração no raio “r” da barra com a aplicação da carga P
r	Raio da barra
R_c	Raio de curvatura da bacia
d_0	Deflexão recuperável no ponto de aplicação da carga
d_{25}	Deflexão recuperável a distância de 25 cm do ponto de aplicação da carga
d_{30}	Deflexão recuperável a distância de 30 cm do ponto de aplicação da carga
d_{60}	Deflexão recuperável a distância de 60 cm do ponto de aplicação da carga
d_{90}	Deflexão recuperável a distância de 90 cm do ponto de aplicação da carga

d_{20}	Deflexão recuperável a distância de 20 cm do ponto de aplicação da carga
CF	Fator de curvatura
d	Deflexão máxima
L_i	Leitura inicial no extensômetro com o caminhão parado
L_f	Leitura final no extensômetro, quando o pavimento recupera sua condição original
F	Constante da viga, definida como a relação entre a parte maior e a menor do braço de prova
d_i	Leitura da deflexão intermediária
X_i	Distância calculada
x_i	Distância para o centro geométrico “O” do carregamento
dy	Distância entre o centro das placas circulares
$C1$	Modelo de Theisen considerando placa circular única, aplicação das duas rodas
$C2$	Modelo de Theisen considerando o método proposto, efeito de apenas uma das rodas
DR	Razão da deflexão, número a ser multiplicado para transformar a deflexão em uma temperatura qualquer para a deflexão na temperatura padrão de 20°C
T	Temperatura do pavimento no momento do ensaio
d	Afastamento da leitura em relação ao carregamento
H	Espessura da camada de revestimento
E	Módulo de elasticidade do subleito
β	Coeficientes estatísticos
D_{25}	Deflexão corrigida para a temperatura de 25°C
D_p	Deflexão medida na pista
h_{CA}	Espessura da camada asfáltica
$d_{i,j,k,m}$	Deflexão corrigida
$u_{i,j,k,m}$	Deflexão medida
FR	Carga pré-definida
$F_{i,k,m}$	Carga aplicada
τ_i	Tensão de cisalhamento radial entre as camadas i e $i+1$

$u_i - u_{i+1}$	Deslocamento radial relativo ao longo da interface das camadas i e $i+1$
k_i	Módulo de rigidez da “mola” que resiste ao deslocamento radial relativo ao longo da interface
l_i	Igual a “0”, para condição “não aderida” ou igual a “1” para a condição “aderida”

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	OBJETIVOS	31
1.1.1	Objetivo Geral	31
1.1.2	Objetivos Específicos	31
2	REVISÃO	32
2.1	AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS	32
2.1.1	Respostas estruturais dos pavimentos	33
2.1.1.1	<i>Módulo de resiliência</i>	<i>34</i>
2.1.1.2	<i>Coeficiente de Poisson</i>	<i>39</i>
2.1.2	Deformabilidade dos pavimentos	41
2.1.2.1	<i>Bacia de deflexão</i>	<i>42</i>
2.1.2.1.1	Deflexão recuperável máxima (d_0)	43
2.1.2.1.2	Raio de curvatura (R_c)	44
2.1.2.1.3	Índice de Curvatura da Superfície (SCI)	44
2.1.2.1.4	Índice de Danos a Base (BDI)	45
2.1.2.1.5	Índice da Curvatura da Base (BCI)	45
2.1.2.1.6	Fator de Curvatura (CF)	45
2.1.3	Retroanálise dos pavimentos	46
2.1.4	Método não destrutivo para avaliação estrutural	48
2.1.4.1	<i>Viga Benkelman</i>	<i>48</i>
2.1.4.2	<i>Falling Weight Deflectometer - FWD</i>	<i>52</i>
2.1.5	Adaptação dos resultados do ensaio da Viga <i>Benkelman</i> na retroanálise	56
2.1.6	Influência da temperatura nas medidas de deflexão	60
2.1.7	Influência da aderência das camadas dos pavimentos nas medidas de deflexão	66
2.1.8	Influência da carga aplicada na retroanálise	70
2.2	SOLUÇÃO ANALÍTICA ATRAVÉS DA TEORIA DOS SISTEMAS DE CAMADAS ELÁSTICAS	71
2.2.1	Teoria dos Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE)	71
2.2.2	Retroanálise com o <i>software</i> BackMeDiNa	72
2.2.3	Retroanálise com o <i>software</i> BAKFAA	77

2.3	SOLUÇÃO NUMÉRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	79
2.3.1	Método dos Elementos Finitos (MEF).....	79
2.3.2	Modelagem com o software Abaqus	88
3	METODOLOGIA	92
3.1	ETAPAS DA PESQUISA	92
3.1.1	Etapa 01 - Caracterização do trecho de estudo	94
3.1.2	Etapa 02 - Ajustes nos dados das bacias de deflexão.....	100
3.1.2.1	<i>Conversão do carregamento do ensaio VB para FWD.....</i>	<i>101</i>
3.1.2.2	<i>Correção das bacias deflectométricas para temperatura padrão</i>	<i>103</i>
3.1.2.3	<i>Correção da carga FWD aplicada</i>	<i>106</i>
3.1.3	Etapa 03 - Retroanálise através da TSCE e análise estatística descritiva dos módulos resilientes equivalentes	107
3.1.3.1	<i>Retroanálise com o software BackMeDiNa</i>	<i>108</i>
3.1.3.2	<i>Retroanálise com o software BAKFAA</i>	<i>114</i>
3.1.4	Etapa 04 - Construção dos modelos de elementos finitos e simulações numéricas das bacias deflectométricas sob ação de um ensaio FWD	118
3.1.5	Etapa 05 - Validação do MEF na retroanálise dos módulos resilientes equivalentes.....	131
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	132
4.1	ANÁLISES DAS BACIAS DE DEFLEXÃO MEDIDAS EM CAMPO.....	132
4.1.1	Análises estatísticas descritivas dos dados das bacias de deflexão medidas em campo	132
4.1.2	Avaliação da condição estrutural do pavimento através dos parâmetros das bacias de deflexão medidas em campo.....	137
4.2	RETROANÁLISE ATRAVÉS DA TSCE - BACKMEDINA E BAKFAA	142
4.2.1	Retroanálise com o BackMeDiNa.....	142
4.2.2	Retroanálise com o BAKFAA	146
4.2.3	Análises estatísticas descritivas dos módulos retroanalizados e discussão dos resultados	150
4.2.3.1	<i>Módulos resilientes equivalentes retroanalizados no BackMeDiNa</i>	<i>150</i>
4.2.3.2	<i>Módulos resilientes equivalentes retroanalizados no BAKFAA</i>	<i>153</i>

4.2.3.3	<i>Módulos resilientes equivalentes retroanalizados no BackMeDiNa versus BAKFAA - Segmento 02</i>	155
4.2.3.4	<i>Módulos resilientes equivalentes retroanalizados no BackMeDiNa versus BAKFAA - Segmento 04</i>	157
4.2.3.5	<i>Módulos resilientes equivalentes retroanalizados no BackMeDiNa versus BAKFAA - Análise geral</i>	159
4.3	SOLUÇÃO NUMÉRICA ATRAVÉS DO MEF COM O ABAQUS	164
4.3.1	Construção dos modelos de elementos finitos e simulação das bacias de deflexão	164
4.3.2	Validação do MEF na retroanálise dos módulos resilientes equivalentes	175
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	183
5.1	CONCLUSÕES	183
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	185
	REFERÊNCIAS	187
	ANEXO A - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE TESTE	199
	ANEXO B - BACIAS DE DEFLEXÃO MEDIDAS EM CAMPO	201
	APÊNDICE A - MÓDULOS RESILIENTES EQUIVALENTES - BACKMEDINA	204
	APÊNDICE B - VARIAÇÃO NAS MEDIDAS DE DEFLEXÃO APÓS CORREÇÃO DA TEMPERATURA	208
	APÊNDICE C - MÓDULOS COM CORREÇÃO DA DEFLEXÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA - ENSAIO VB - BACKMEDINA	212
	APÊNDICE D - MÓDULOS RESILIENTES EQUIVALENTES - BAKFAA	214
	APÊNDICE E - MÓDULOS COM CORREÇÃO DA DEFLEXÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA - ENSAIO VB - BAKFAA	218
	APÊNDICE F - BOXPLOT DOS MÓDULOS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO - SEGEMENTO 02	220
	APÊNDICE G - BOXPLOT DOS MÓDULOS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO - SEGEMENTO 04	223
	APÊNDICE H - BACIAS DE DEFLEXÃO - MODELOS ABAQUS - SEGMENTO 02	226

APÊNDICE I - BACIAS DE DEFLEXÃO - MODELOS ABAQUS - SEGMENTO 04	232
APÊNDICE J - BACIAS DE DEFLEXÃO - VALIDAÇÃO DO MEF - SEGMENTO 02	238
APÊNDICE K - BACIAS DE DEFLEXÃO - VALIDAÇÃO DO MEF - SEGMENTO 04	242

1 INTRODUÇÃO

O pavimento, após sua execução e liberação ao tráfego, deve ter seu comportamento estrutural avaliado periodicamente, com o intuito de promover as ações de conservação necessárias para manter sua integridade ao longo da vida útil de projeto (BRANCO; SANTOS; PEREIRA, 2016). Neste contexto, a avaliação da capacidade de carga auxilia na estimativa da vida útil e também fornece as informações necessárias para seleção da estratégia mais assertiva de reforço ou restauração (TIGDEMIR; KALYONCUOGLU; KALYONCUOGLU, 2004; NORAMBUENA-CONTRERAS *et al.*, 2010).

Conforme apresentado por Amorim *et al.* (2014), a avaliação da capacidade de carga pode ser feita através de parâmetros como as medidas de deflexão e o módulo de rigidez das camadas do pavimento, que servem de subsídio para calcular sua vida residual e a espessura necessária para o reforço. Os métodos que analisam as medidas de deflexão, que ocorrem no pavimento submetido à ação de uma carga, são os mais utilizados para determinar sua capacidade de suporte às cargas de tráfego (SALTAN; TERZI; KÜÇÜKSILLE, 2011; KHAZANOVICH; LUKANEN; TOMPKINS, 2014).

Os ensaios que visam obter os valores de deflexão a partir da aplicação de uma carga são realizados a partir de Métodos Não Destrutivos (MND). Estes, são procedimentos que avaliam as propriedades mecânicas e parâmetros elásticos dos materiais que compõe as camadas dos pavimentos (PEREIRA, 2007; SALTAN; TERZI; KÜÇÜKSILLE, 2011).

Os métodos não destrutivos para medição das deflexões recuperáveis podem ser realizados a partir de equipamentos com carregamento estático (ou quase estático), por impulso e vibratório. Para o carregamento quase estático pode-se citar equipamentos como a Viga *Benkelman* (VB). Já o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) é o equipamento que se destaca para deflexões medidas através de carregamentos por impulso com aplicação de uma carga dinâmica transiente (MEDINA *et al.*, 1994; BORGES, 2001).

Conforme supracitado, a Viga *Benkelman* mede a deflexão do pavimento sujeito a aplicação de uma carga quase estática e consegue retratar, com considerável grau de confiabilidade, o valor real da deflexão. É um equipamento muito utilizado no Brasil para avaliação estrutural dos pavimentos, possui versatilidade e

simplicidade na operação e é bastante familiar aos engenheiros e projetistas devido ao seu longo tempo de uso nos métodos tradicionais de dimensionamento de reforços de pavimentos (BORGES, 2001).

O ensaio FWD, por sua vez, impõe carregamento dinâmico transiente através de pesos que caem sobre uma placa de carga e registra a resposta de deflexão em sensores (geofones) localizados em pontos radiais a partir do centro de aplicação da carga (SALTAN; TERZI; KÜÇÜKSILLE, 2011). Devido sua versatilidade, rapidez, acurácia e grande produtividade, tem sido vastamente utilizado pelas agências rodoviárias como procedimento de avaliação de rotina das vias e auxílio para gerência viária (BORGES, 2001; WANG *et al.*, 2020; VYAS; SINGH; SRIVASTAVA, 2020).

Conforme exposto por Villela e Marcon (2001) e Magalhães (2015), a partir da leitura das bacias de deflexão que se formam com a atuação do carregamento externo, independente do ensaio, é possível determinar o módulo resiliente equivalente das camadas dos pavimentos mediante o processo de retroanálise.

O cálculo retroativo é um procedimento para determinar os módulos resilientes equivalentes das camadas do pavimento a partir das deflexões da superfície, onde as deflexões calculadas teoricamente são comparadas às deflexões medidas em campo, por meio de uma série de iterações, os módulos das camadas são variados até que a diferença entre as bacias seja a menor possível (GOKTEPE; AGAR; LAV, 2006; CEYLAN; GOPALAKRISHNAN, 2014).

Os métodos convencionais de retroanálise são baseados em procedimentos de otimização iterativa e a resposta estrutural do pavimento é calculada usando a Teoria dos Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE) ou o Método dos Elementos Finitos (MEF) para comportamentos lineares ou não lineares dos materiais (GOKTEPE; AGAR; LAV, 2006).

Entre os *softwares* de análise mecânica-empírica relacionados a TSCE, pode-se citar o BackMeDiNa, método desenvolvido por Franco (2007) e em consolidação no Brasil e o BAKFAA, utilizado internacionalmente e disponibilizado pela *Federal Aviation Administration* (FAA). Segundo Franco e Motta (2020), para obtenção dos módulos resilientes equivalentes através destes programas, ocorre a variação dos módulos das camadas até a obtenção de uma bacia de deflexão teórica próxima à bacia de deflexão medida em campo pelo FWD. Caso as medidas das bacias de campo sejam provenientes de um ensaio com a VB é necessária a

consideração da adaptação dos dados de deflexão para entrada nos *softwares* (THEISEN *et al.*, 2009).

Outra maneira de realizar a retroanálise das bacias de deflexão e obter os módulos resilientes equivalentes é através do MEF (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2005; BUENO, 2016; HAMIM *et al.*, 2018). A eficiência deste método foi estudada por Tang e Yang (2013), Tarefder e Ahmed (2014), Hamim *et al.* (2018), Liu *et al.* (2018), Wang *et al.* (2020), Deng *et al.* (2021) e Jiang *et al.* (2022) quando avaliaram as condições estruturais dos pavimentos em termos de tensão, deformação e deflexão da superfície.

O MEF tem se destacado devido sua generalidade e é um exemplo de como métodos que permitem maiores considerações quanto às condições de contorno das variáveis envolvidas, como restrições de movimento e características de contato, podem melhorar os projetos e auxiliar na gestão viária (BORDIM, 2010).

Liu *et al.* (2017) destacam o Abaqus como um dos *softwares* de uso geral com a capacidade de gerar respostas quanto a análise estrutural dos pavimentos asfálticos através do MEF. O Abaqus permite a realização de análises estáticas e dinâmicas das estruturas modeladas através de elementos finitos em sua interface gráfica. Ações que ocorrem sobre as estruturas são, em geral, dinâmicas, contudo, em muitas situações é razoável a consideração de que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezíveis as forças de inércia, podendo considerar a análise estática (AZEVEDO, 2003).

Para o dimensionamento mecanístico-empírico eficaz, com o uso dos métodos supracitados, Medina e Motta (2015) ainda apontam a necessidade de analisar as considerações quanto aos efeitos climáticos e aderência das camadas, para o dimensionamento eficaz dos reforços nas vias.

As condições climáticas afetam diretamente a rigidez das misturas asfálticas (FHWA, 2006; ZHENG; ZHANG; LIU, 2017) e conforme exposto por Minhoto, Pais e Pereira (2008), quanto maior a temperatura do pavimento, maior será a deflexão medida. Por este motivo, Sousa *et al.* (2002) defendem que ao analisar os resultados obtidos pelo ensaio FWD deve-se ajustá-los para uma temperatura de referência. Existem diversos métodos que visam este ajuste de temperatura, seja por meio de ábacos, modelos com relações logarítmicas e lineares, entre outros (PAIS *et al.*, 2018).

Outro fator que pode afetar as deflexões medidas em campo são as condições de aderência entre as camadas do pavimento (BUENO, 2016). Ao se tratar das análises mecanísticas-empíricas, o fator de aderência é um dado de entrada considerado pelos *softwares* e a forma como essas camadas se comportam, aderidas ou não aderidas, é ideal que seja validada em campo (SCHERER, 2018).

Assim, o estudo do comportamento estrutural dos pavimentos em campo, é uma forma de validar se as premissas estabelecidas inicialmente no projeto estão sendo atendidas e auxiliar na tomada de decisão referente à gestão das estradas já existentes (PREUSSLER, 2007).

Dessa forma, através dos dados das bacias de deflexão dos ensaios não destrutivos, VB e FWD, a presente pesquisa compara os módulos resilientes equivalentes das camadas dos pavimentos. Para a retroanálise através da TSCE são utilizados os *softwares* BackMeDiNa e BAKFAA, que apresentam menor capacidade de processamento computacional e praticidade. Para a retroanálise através do MEF, é utilizado o *software* Abaqus, que simula a estrutura do pavimento, com a divisão do meio contínuo em elementos finitos, e realiza análises dinâmicas e estáticas das respostas estruturais, como a bacia de deflexão.

Sendo assim, esta pesquisa é motivada pela aplicação de metodologias mecanísticas-empíricas que fazem uso da análise estrutural de pavimentos, como a TSCE e o MEF, na investigação estrutural das vias rodoviárias existentes. E, principalmente, tem sua relevância, importância e justificativa baseada na proposta de modelos de elementos finitos estáticos e dinâmicos que podem ser utilizados na previsão das respostas estruturais dos pavimentos, isto é, para gerar as bacias deflectométricas calculadas, que vão simular as bacias medidas em campo com um ensaio FWD, e realizar as retroanálises. Ainda, o uso do MEF para a retroanálise, permite que, em análises futuras, outras configurações de carregamento possam ser simuladas e testadas na seção do pavimento modelada, sem a necessidade de gastos com ensaios em campo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é determinar o melhor modelo de elementos finitos, estático ou dinâmico, para realizar a retroanálise dos módulos resilientes equivalentes das camadas do pavimento.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos que a pesquisa busca para atender o objetivo geral são:

- a) Comparar os módulos resilientes equivalentes dos materiais das camadas do pavimento obtidos através da TSCE pelos *softwares* BackMeDiNa e BAKFAA, por meio das bacias deflectométricas medidas nos ensaios VB e FWD;
- b) Desenvolver modelos de elementos finitos estáticos e dinâmicos no *software* Abaqus, para simular numericamente as bacias deflectométricas de um ensaio FWD como resposta estrutural;
- c) Comparar as medidas das bacias deflectométricas obtidas através de diferentes condições de aderência das camadas do pavimento (aderida, não aderida e parcialmente aderida) simuladas nos modelos estáticos e dinâmicos.

2 REVISÃO

2.1 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS

A avaliação estrutural de pavimentos tem como objetivo determinar as respostas da estrutura quando submetida às cargas de tráfego, traduzida na forma de tensões, deformações e deflexões no pavimento (RODRIGUES, 1995). Permite a caracterização dos elementos e variáveis estruturais dos pavimentos e entendimento quanto ao comportamento e integridade quando submetido às ações ambientais e de tráfego (BALBO, 2007).

Outra vantagem apontada por Balbo (2007) é a possibilidade de subdividir o trecho de uma rodovia em segmentos homogêneos, ou seja, com características pouco variáveis, permitindo assim estabelecer deflexões características de cada trecho e dimensionar, de forma mais adequada, o projeto de reforço ou restauração.

A obtenção dos parâmetros e comportamento dos pavimentos flexíveis, na avaliação estrutural, ocorre através do estudo das deflexões e deformabilidades, que refletem as condições estruturais de cada camada (PINTO; PREUSSLER, 2010). Em campo são controladas as deformabilidades frente à ação do carregamento do tráfego, representada pelo deslocamento vertical na superfície, a deflexão (MARTINS *et al.*, 2018). Os dados das bacias de deflexão são utilizados na retroanálise com o objetivo de determinar a rigidez do pavimento, ou seja, seu módulo de elasticidade (FERRI, 2013).

A avaliação estrutural pode ser realizada por métodos destrutivos, semi-destrutivos ou não destrutivos. A classificação quanto ao método depende de como são obtidas as avaliações da capacidade de carga do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os ensaios destrutivos e semi-destrutivos são aqueles onde são removidas amostras do pavimento para determinação das suas propriedades mecânicas em laboratório. Nesse tipo de ensaio ainda é possível observar as espessuras das camadas, tipo dos materiais, deformações das camadas e condições de umidade (VILLELA; MARCON, 2001). São úteis quando se necessita de maiores informações sobre a estrutura, porém podem ser empregados em pouco pontos, uma vez que causam danos à estrutura (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Já o método não destrutivo, que será abordado nesta pesquisa, é adequado para aplicação em grandes extensões de pista, pois preserva a área do pavimento onde foi realizada a avaliação e possibilita diversas repetições do ensaio no mesmo local (BERNUCCI *et al.*, 2008).

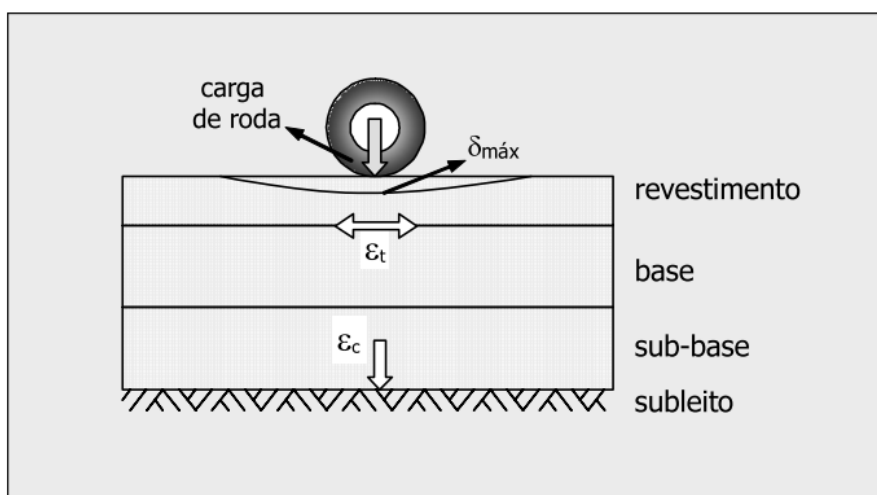
2.1.1 Respostas estruturais dos pavimentos

Em 1885, Boussinesq considerou o pavimento como um meio semi-infinito, linear, elástico, homogêneo e isotrópico submetido a um carregamento pontual, e então formulou um conjunto de equações, baseada na Teoria da Elasticidade, para o cálculo de tensões e deformações de um sistema como única camada (FRANCO, 2007).

Conforme Huang (2004) mencionou, a partir da teoria de Boussinesq, Burmister apresentou, em 1943, o método para determinar as tensões e deformações em sistemas compostos por duas ou três camadas, permitindo o cálculo em estruturas de pavimentos com várias camadas. A seção de um pavimento com as principais tensões ao qual é submetido sob aplicação de uma carga de roda é representado na Figura 1, sendo:

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

Figura 1 - Tensões, deformações e deslocamentos em pavimento asfáltico.



Fonte: Franco (2007).

Dessa forma, a estrutura de um pavimento asfáltico pode ser representada por um meio estratificado, submetido a um carregamento superficial distribuído em uma área circular, podendo ser modelado por meio da Teoria da Elasticidade, base dos conceitos supracitados. A teoria também classifica os materiais conforme o comportamento tensão-deformação, podendo se dividir em dois grupos: aqueles de comportamento elástico linear e os de comportamento elástico não-linear (FRANCO, 2007).

Então, a resposta do pavimento pode ser estimada via cálculo das tensões, deformações e deslocamentos gerados na estrutura, sendo necessário conhecer as espessuras das camadas, composição do tráfego atuante, ações climáticas, os módulos de resiliência e coeficiente de Poisson de cada material que constitui o pavimento (FRANCO, 2007).

2.1.1.1 Módulo de resiliência

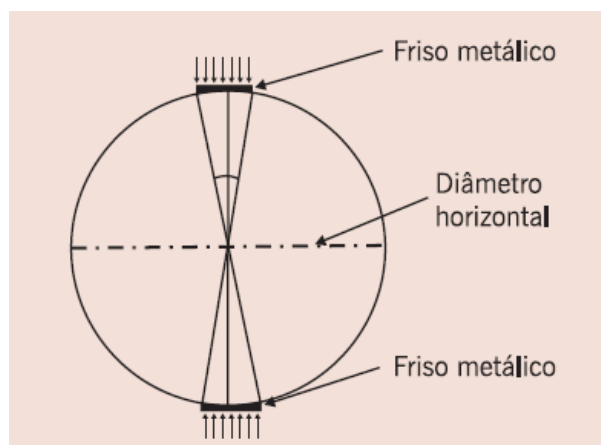
Resiliência é definida como a energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, sendo devolvida quando cessam as tensões causadoras (PINTO; PREUSSLER, 2010).

Uma das constantes elásticas mais empregadas e pesquisadas na análise de sistemas de camadas é o módulo de resiliência (MR) dos materiais de pavimentação, ou seja, a capacidade do material não resguardar deformações após cessada a ação da carga (BALBO, 2007).

Ao se tratar de módulo resiliente, os ensaios utilizados para a sua obtenção são os de cargas repetidas que procuram simular as condições reais das solicitações em campo. Dentre eles, Medina e Motta (2015) destacam o ensaio de compressão diametral e o ensaio triaxial de carga repetida.

O ensaio de compressão diametral é utilizado para misturas asfálticas e solos coesivos estabilizados com cimento ou cal. Neste ensaio, aplica-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular. Gera-se uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga e, então, mede-se o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal à tensão gerada. O esquema de carregamento do corpo de prova é mostrado na Figura 2, que é governado pela Equação 1.

Figura 2 - Esquema de carregamento do ensaio de compressão diametral.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

$$\varepsilon_x = \frac{1}{MR}(\sigma_x - \mu\sigma_y) \quad (1)$$

Onde:

ε_x = deformação de tração no diâmetro horizontal;

σ_x = tensão horizontal;

σ_y = tensão vertical;

MR = módulo de resiliência;

μ = coeficiente de Poisson.

Já para solos e materiais granulares, conforme Pinto e Preussler (2010), o valor do módulo de resiliência obtido em laboratório, encontrado via ensaio triaxial de cargas repetidas (Figura 3), relaciona a tensão aplicada com a respectiva deformação sofrida, conforme a Equação 2. Nos ensaios com cargas repetidas, a força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, de um valor zero ao máximo, voltando a anular-se ou atingir um valor mínimo para então voltar a atuar após um intervalo de repouso.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_R} \quad (2)$$

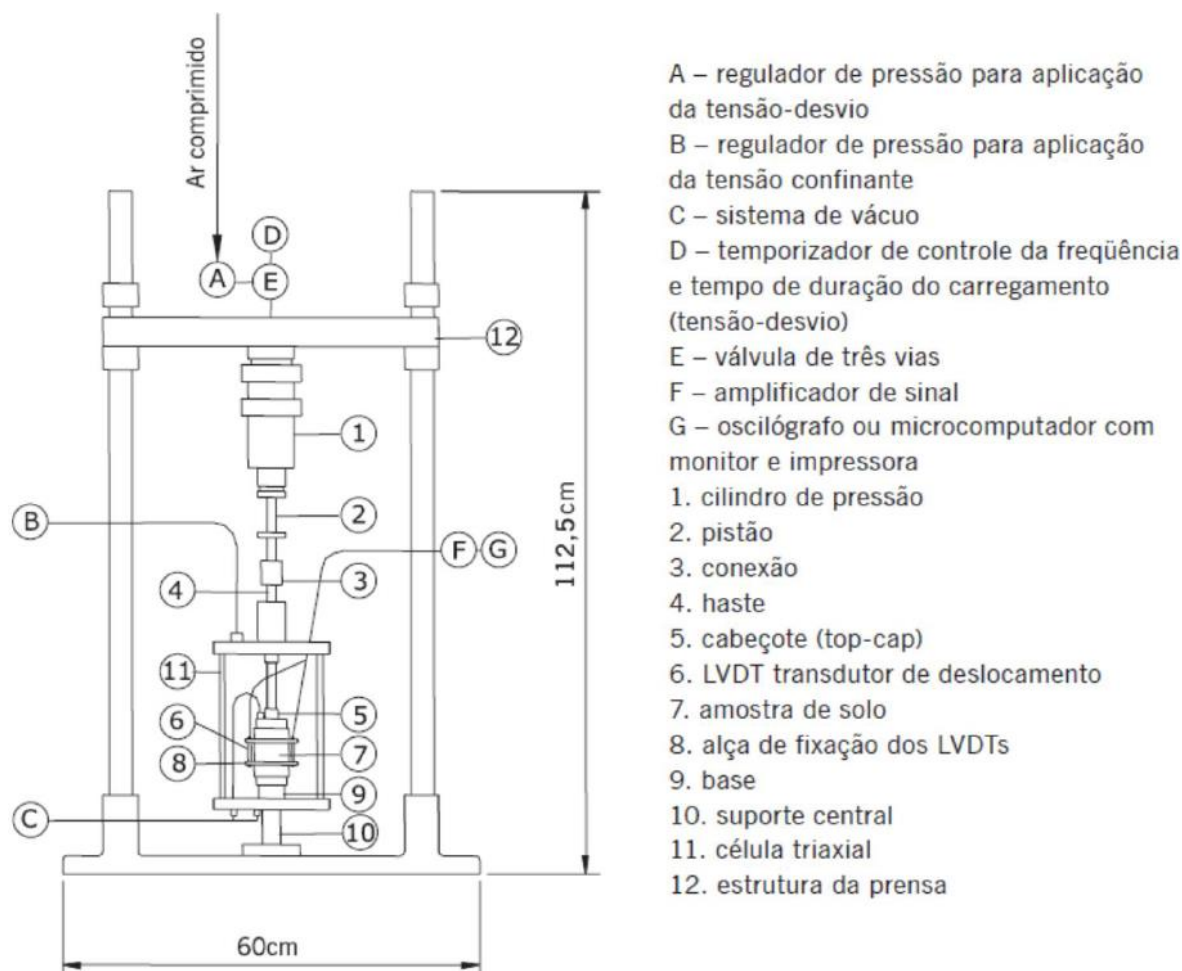
Onde:

MR = módulo de deformação resiliente;

σ_d = tensão de desvio aplicada repetidamente;

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

Figura 3 - Esquema do ensaio triaxial de cargas repetidas.



Fonte: Medina e Motta (2015).

Em resumo, quanto maior a deformação ou deflexão, mais dúctil é o material, menor é a tensão e energia necessária aplicada e menor será o módulo de resiliência, ou seja, menor será a rigidez.

Os módulos de resiliência usuais para diferentes tipos de materiais, de acordo com o DER-SP (2006), são apresentados na Tabela 1. Já na Tabela 2, são elencados alguns autores e os resultados encontrados para o módulo de resiliência, obtidos em laboratório ou retroanalizados, para alguns tipos de materiais.

Importante ressaltar que no comportamento elástico linear, o módulo de resiliência de um material não apresenta variação ao longo de toda a espessura da

sua camada, ao contrário do que ocorre quando se considera o comportamento elástico não linear, onde o módulo de resiliência do material pode variar ao longo da espessura, sendo dependente da variação do estado de tensões a que está submetido (MOTTA, 2003 *apud* FERREIRA, 2013).

Tabela 1 - Valores usuais do MR, conforme DER-SP (2006).

Materiais	Intervalo de valores do MR (MPa)
Concretos asfálticos	
Revestimento CAP 50-70	2000-5000
Revestimento CAP 30-45	2500-4500
<i>Binder</i> CAP 50-70	2000-3000
<i>Binder</i> CAP 30-45	2500-4000
Materiais granulares	
Brita graduada	150-300
Macadame hidráulico	250-450
Materiais estabilizados quimicamente	
Solo-cimento	5000-10000
Brita graduada tratada com cimento	7000-18000
Concreto compactado com rolo	7000-22000
Concreto de Cimento Portland	
Concreto de Cimento Portland	30000-35000 28000-45000
Solos finos em base e sub-base	
Solos finos em base e sub-base	150-300
Solos finos em subleito e reforço do subleito	
Solos de comportamento laterítico	100-200
Solos de comportamento não laterítico	25-75
Solos finos melhorados com cimento para reforço de subleito	
Solos finos melhorados com cimento para reforço de subleito	200-400

Fonte: Adaptado de DER-SP (2006).

Tabela 2 - Valores usuais dos módulos na literatura, ensaios de laboratório e retroanálises.

Autor	Revestimento (MPa)	Base (MPa)	Sub-base (MPa)	Subleito (MPa)
Cardoso (1995) <i>apud</i> Nóbrega (2003) - retroanalísado, revestimento, base, sub-base e subleito (mínimo, médio e máximo)	1108,15 2843,93 5707,47	98,07 264,78 715,89	68,65 147,10 294,20	78,45 147,10 264,78
Fernandes e Triches (2000) <i>apud</i> Vieira (2020) - retroanalísado, base BGS, sub-base pedra pulmão, subleito residual de granito	-	319 175 90	334 146 83	145 76 40

Autor	Revestimento (MPa)	Base (MPa)	Sub-base (MPa)	Subleito (MPa)
Marmitt (2002) <i>apud</i> Scherer (2016) - laboratório, base brita graduada de granito	-	414 290	-	-
Marmitt (2002) <i>apud</i> Scherer (2016) - laboratório, base brita graduada de basalto	-	296	-	-
Marques (2004) - laboratório, CAP 50/60	3902 4252 5088	-	-	-
Malyzs (2009) - laboratório, base BGS	-	150	-	-
Bock (2012) - laboratório, CAP 50/70	4000 6071	-	-	-
Ribas (2014) - retroanalísado, base BGS, sub-base macadame hidráulico, subleito areia (máximo)	3283 5278	119 345	100 300	50 150
Costa <i>et al.</i> (2014) - laboratório, CAUQ modificado com polímero, base BGTC, sub-base granular, subleito arenoso argiloso	4273	4032	293	136
Costa <i>et al.</i> (2014) - retroanalísado, CAUQ modificado com polímero, base BGTC, sub-base granular, subleito arenoso argiloso	1002 1429 1198 1000 1190	5729 4228 8385 1519 8322	1765 1809 546 1979 535	305 403 578 477 578
Salviano (2015) - retroanalísado, CAUQ modificado com polímero, base BGS, sub-base BGTC, subleito solo natural	7159	463	8096	123
Pandolfo, Echeverria e Specht (2016) - retroanalísado, pavimento de concreto asfáltico, base BGS, subleito natural	4961 4996	165 153	-	71 73
Martins <i>et al.</i> (2018) - retroanalísado, base BGS, sub-base, macadame seco, subleito argila	-	294 622	155 522	87 187
Martins <i>et al.</i> (2018) - retroanalísado, base BGS, sub-base macadame seco, subleito argila e areia	-	495 620	191 465	95 195
Martins <i>et al.</i> (2018) - retroanalísado, base BGS, sub-base macadame seco, subleito areia	-	522 725	325 421	112 158
Arshad <i>et al.</i> (2018) - retroanalísado, pavimento asfáltico, base, sub-base, subleito	1860 1814	195 255	133 142,8	105 121,5

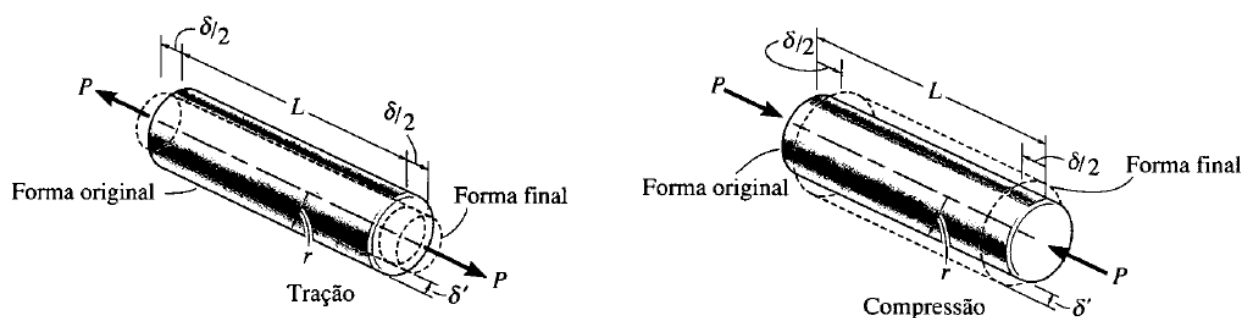
Autor	Revestimento (MPa)	Base (MPa)	Sub-base (MPa)	Subleito (MPa)
Vieira (2020) - retroanalizado, pavimento CBUQ, base BG, sub-base macadame seco, subleito solo natural	6406,80 10720,50	415,90 857,70	366,10 857,70	91,50 318,90

Fonte: A autora (2022).

2.1.1.2 Coeficiente de Poisson

Um corpo deformável, quando submetido a uma força axial de tração, se alonga e se contrai lateralmente, ou seja, sua largura e espessura diminuem. Quando é uma força de compressão que está atuando, o corpo se contrai na direção da força e se expande lateralmente, conforme Figura 4 (HIBBELER, 2004).

Figura 4 - Tensões atuantes em um corpo deformável.



Fonte: Hibbeler (2004).

As deformações obtidas na direção longitudinal/axial e na direção lateral/radial são expressas através da Equação 3 e Equação 4, respectivamente.

$$\varepsilon_{long} = \frac{\delta}{L} \quad (3)$$

Onde:

ε_{long} = deformação longitudinal;

δ = alteração no comprimento "L" da barra com a aplicação da carga P;

L = comprimento da barra.

$$\varepsilon_{lat} = \frac{\delta'}{r} \quad (4)$$

Onde:

ε_{lat} = deformação lateral;

δ' = alteração no raio “r” da barra com a aplicação da carga P;

r = raio da barra.

Ao perceber-se que na faixa de elasticidade a razão entre essas deformações é uma constante, visto que as deformações longitudinais e laterais são proporcionais, surgiu o coeficiente de Poisson, que apresenta um valor específico para cada tipo de material homogêneo ou isotrópico (HIBBELER, 2004). A Equação 5 tem sinal negativo, pois o alongamento longitudinal provoca contração lateral e vice-versa.

$$\mu = -\frac{\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{long}} \quad (5)$$

Onde:

ε_{long} = deformação longitudinal;

ε_{lat} = deformação lateral;

μ = coeficiente de Poisson.

Nas misturas asfálticas, o coeficiente de Poisson pode ser considerado uma variável que não depende do tipo de carregamento, variando apenas com a temperatura. O seu valor varia entre 0,35 para baixas temperaturas e 0,50 para altas temperaturas (VON QUINTUS *et al.*, 1991 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008). No Brasil é comum se assumir o valor de 0,30.

De acordo com Franco (2007), o coeficiente de Poisson para misturas asfálticas varia entre 0,15 e 0,50, sendo influenciado pela variação de temperatura. Já Medina (1997) *apud* Ribas (2014) sugere a adoção do valor de 0,30 para o coeficiente de Poisson de misturas asfálticas a 25°C.

Medina e Motta (2005) complementam que o valor do coeficiente de Poisson sofre a influência, além da variação da temperatura, do grau de saturação, energia de

compactação e tipo do material, assumindo valores de 0,25 para as misturas asfálticas a 25°C, 0,35 para materiais granulares e 0,45 para os solos argilosos.

A seguir, na Tabela 3 e na Tabela 4 são apresentados valores da variação do coeficiente de Poisson de acordo com o tipo de material de pavimentação, e os valores propostos pelo DER-SP (2006) e por Balbo (2007), respectivamente.

Tabela 3 - Valores típicos do coeficiente de Poisson, conforme DER-SP (2006).

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 (2006).

Tabela 4 - Valores típicos do coeficiente de Poisson, conforme Balbo (2007).

Material	Faixa de variação
Concreto de cimento Portland	0,15 - 0,20
Concreto compactado a rolo (CCR)	0,15 - 0,20
Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	0,15 - 0,20
Solo Cimento (SC)	0,20 - 0,30
Solo Melhorado com Cimento (SMC)	0,20 - 0,30
Solo Cal (SCA)	0,25 - 0,30
Solos arenosos	0,30 - 0,35
Misturas asfálticas	0,32 - 0,38
Brita Graduada Simples (BGS)	0,35 - 0,40
Macadame Hidráulico (MH)	0,35 - 0,40
Bica Corrida (BC)	0,35 - 0,40
Areias compactadas	0,35 - 0,40
Solos finos	0,40 - 0,45

Fonte: Adaptado de Balbo (2007).

2.1.2 Deformabilidade dos pavimentos

A maioria dos materiais de pavimentação não são elásticos, porém, se a carga aplicada é pequena em comparação com a resistência do material e é repetida diversas vezes, a deformação de cada repetição da carga é quase totalmente recuperável, podendo ser considerada elástica (HUANG, 2004).

A passagem da roda no pavimento gera um deslocamento total que pode se apresentar de duas formas. A primeira delas é deformação elástica ou reversível, que

resulta na deflexão do pavimento, parâmetro relevante à avaliação estrutural. A segunda refere-se à deformação permanente ou irreversível, que resulta no afundamento da trilha de roda, cuja medida pode ser utilizada para definição da vida útil estrutural e funcional do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

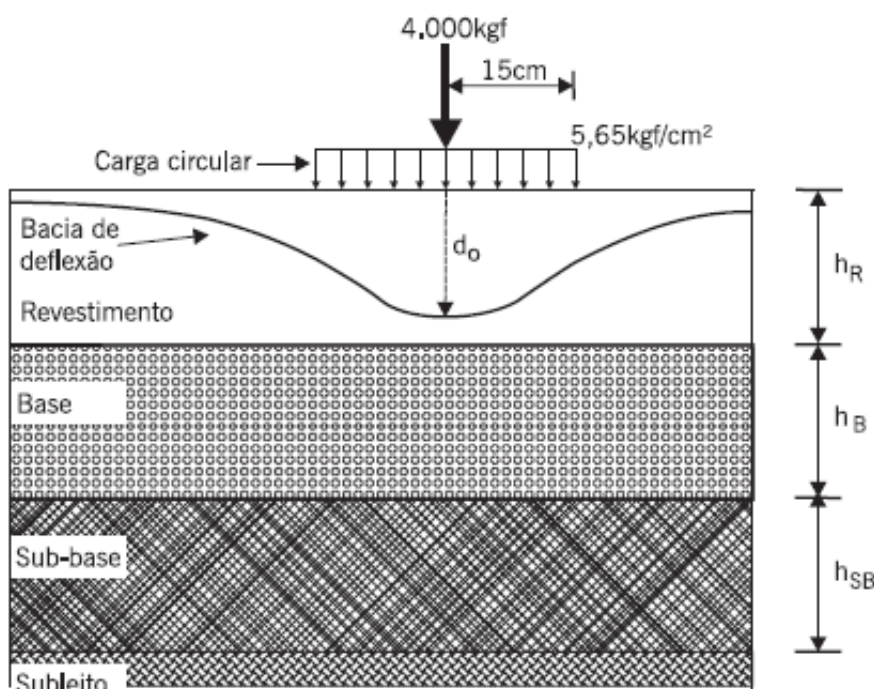
Quanto a deflexão elástica ou reversível, Balbo (2007) afirma que em 1950 era comum a utilização de valores únicos de deflexão, porém, a partir de 1960 passou-se a considerar as deflexões como um todo, ou seja, considerando a chamada bacia de deflexão. A análise apenas do valor máximo da deflexão não explica com clareza o comportamento estrutural do pavimento, sendo necessário analisar a bacia completa.

2.1.2.1 Bacia de deflexão

Bacia de deflexão ou linha de influência da carga corresponde a todas as medidas dos deslocamentos elásticos em vários pontos a partir do ponto de aplicação da carga (BERNUCCI *et al.*, 2008). A forma da bacia pode ser verificada na Figura 5.

A forma da bacia é consequência do carregamento imposto na superfície, das espessuras e dos módulos de resiliência das camadas do pavimento (FABRICIO *et al.*, 1988 *apud* BUENO, 2016).

Figura 5 - Formato característico da bacia de deflexão.



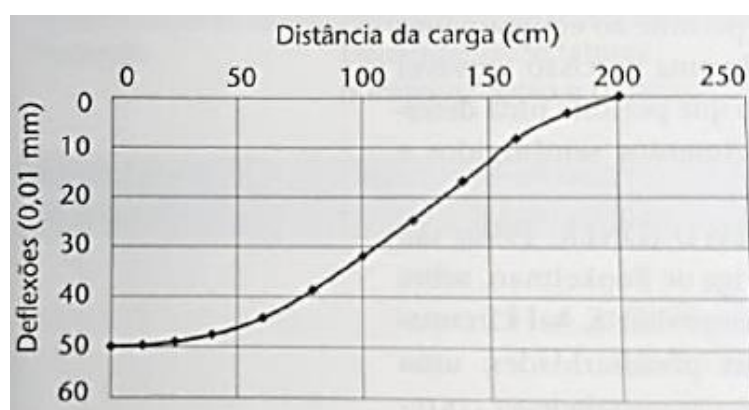
Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

2.1.2.1.1 Deflexão recuperável máxima (d_0)

A deflexão recuperável máxima é a deflexão medida no ponto de aplicação da carga (FERRI, 2013).

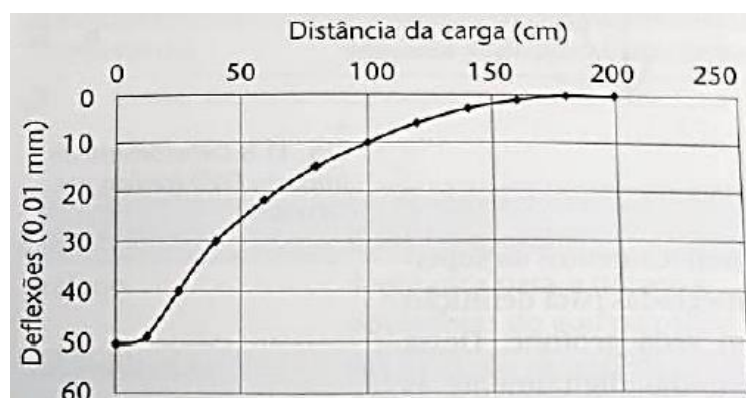
Quanto maior o valor de d_0 (apresentado anteriormente na Figura 5) mais elástica é a estrutura. Deve-se atentar, pois estruturas distintas podem apresentar o mesmo valor máximo de deflexão, mas apresentarem um arqueamento diferenciado da bacia de deflexão, mostrando ser imprescindível a consideração da forma da bacia como um todo nas análises (PINTO; PREUSSLER, 2010; BALBO, 2007). A diferença de comportamento das bacias com a mesma deformação máxima pode ser observada na Figura 6 e na Figura 7.

Figura 6 - Bacia de deflexão - redução gradual das deflexões com o aumento da distância a partir do ponto de aplicação da carga.



Fonte: Balbo (2007).

Figura 7 - Bacia de deflexão - ponto de inflexão próximo ao ponto de aplicação da carga, comportamento mais flexível.



Fonte: Balbo (2007).

2.1.2.1.2 Raio de curvatura (Rc)

O raio de curvatura é um parâmetro indicativo do arqueamento da bacia de deformação na sua posição mais crítica, de forma geral, deve-se considerar essa medida a 25 cm do centro da carga (FERRI, 2013).

Em relação a deflexão recuperável máxima (d_0), o raio de curvatura (Rc) é inversamente proporcional, ou seja, uma deflexão com valores baixos e raio de curvatura altos apresenta-se como uma estrutura de boa qualidade, tanto para o pavimento, quanto para o subleito (SANTOS, 2014).

Ferri (2013) menciona que, conforme a norma DNER PRO11/79, raios de curvatura menores que 100 metros, ou seja, raios muito pequenos, indicam condições estruturais críticas para a estrutura do pavimento. A formulação mais utilizada para obtenção desses valores é apresentada na Equação 6.

$$Rc = \frac{3125}{d_0 - d_{25}} \quad (6)$$

Onde:

Rc = raio de curvatura da bacia (m);

d_0 = deflexão recuperável no ponto de aplicação da carga (10^{-2} mm);

d_{25} = deflexão recuperável a 25 cm do ponto de aplicação da carga (10^{-2} mm).

2.1.2.1.3 Índice de Curvatura da Superfície (SCI)

O Índice de Curvatura da Superfície (SCI) é a diferença entre as deflexões sob o ponto de aplicação da carga e a deflexão a 30 cm dela. Conforme Kim *et al.* (2000 e 2002) *apud* Ferri (2013) este parâmetro é mais sensível em relação a camada asfáltica. A Equação 7 mostra sua relação com as deflexões supracitadas.

$$SCI = d_0 - d_{30} \quad (7)$$

Onde:

SCI = índice de curvatura da superfície;

d_0, d_{30} = deflexão às distâncias de 0 e 30 cm, respectivamente (10^{-2} mm).

2.1.2.1.4 Índice de Danos a Base (BDI)

O Índice de Danos a Base (BDI), conforme exposto por Ferri (2013) representa a diferença entre as deflexões nas distâncias de 30 e 60 cm (Equação 8). Kim *et al.* (2000 e 2002) *apud* Ferri (2013) classifica este parâmetro como um bom indicador das condições da base.

$$BDI = d_{30} - d_{60} \quad (8)$$

Onde:

BDI = índice de danos a base;

d_{30}, d_{60} = deflexão às distâncias de 30 e 60 cm, respectivamente (10^{-2} mm).

2.1.2.1.5 Índice da Curvatura da Base (BCI)

O Índice da Curvatura da Base (BCI), avança para a diferença entre as deflexões nas distâncias de 60 e 90 cm (Equação 9). Já este parâmetro é um bom indicador das condições do subleito (Kim *et al.*, 2000 e 2002 *apud* FERRI, 2013).

$$BCI = d_{60} - d_{90} \quad (9)$$

Onde:

BCI = índice da curvatura da base;

d_{60}, d_{90} = deflexão às distâncias de 60 e 90 cm, respectivamente (10^{-2} mm).

2.1.2.1.6 Fator de Curvatura (CF)

Por fim, o Fator de Curvatura (CF) foi idealizado pelo órgão australiano AUSTROADS, e conforme apresentado por Ferri (2013), é a diferença entre as deflexões localizadas no ponto de aplicação da carga e a 20 cm da mesma, conforme Equação 10.

$$CF = d_0 - d_{20} \quad (10)$$

Onde:

CF = fator de curvatura;

d_0, d_{20} = deflexão às distâncias de 0 e 20 cm, respectivamente ($10^{-2}mm$).

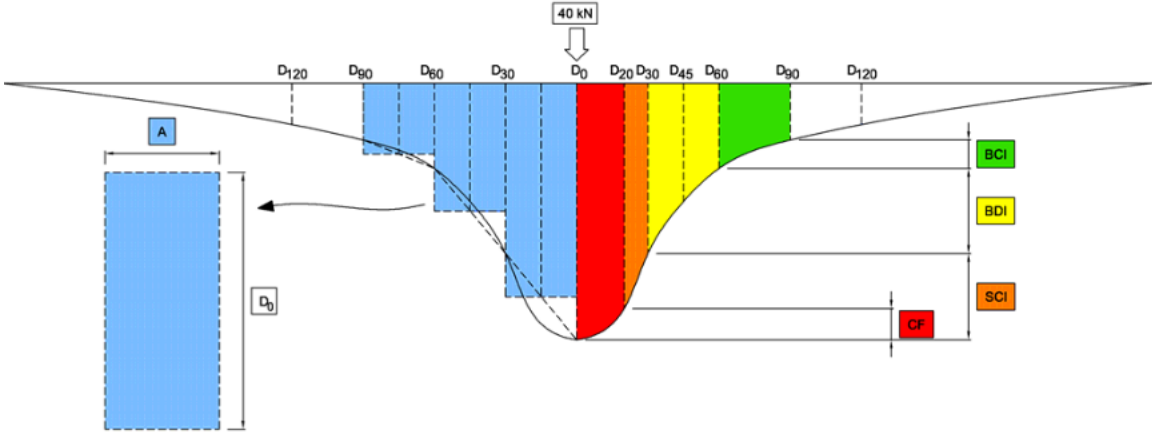
A seguir, na Tabela 5 e na Figura 8, são apresentados os principais parâmetros da bacia defletoométrica, sendo os valores de classificação sugeridos por Horak (2008), que estudou a eficácia dos parâmetros da bacia de deflexão na avaliação da condição estrutural de pavimentos em serviço na África do Sul.

Tabela 5 - Classificação dos pavimentos com base granular quanto aos parâmetros da bacia de deflexão.

Estado do pavimento	d_0 (μm)	R_c (m)	SCI (μm)	BDI (μm)	BCI (μm)
Seguro	< 500	> 100	< 200	< 100	< 50
Em alarme	500 - 750	50 - 100	200 - 400	100 - 200	50 - 100
Severo	> 750	< 50	> 400	> 200	> 100

Fonte: Horak (2008) *apud* Nery (2020).

Figura 8 - Representação da região de ação de cada índice.



Fonte: Ferri (2013).

2.1.3 Retroanálise dos pavimentos

A retroanálise é um processo que permite a obtenção dos módulos de resiliência das camadas do pavimento e subleito, chamados nesta pesquisa de módulos resilientes equivalentes, pois os módulos retroanalizados não necessariamente representam os módulos reais das camadas (NERY, 2020). Esta obtenção é feita a partir das bacias defletoométricas que o pavimento apresenta

quando submetido ao carregamento externo, medidas através de ensaios não-destrutivos, como a Viga *Benkelman* e o ensaio FWD (VILLELA; MARCON, 2001).

Além dos dados das bacias, conforme apresentado por Ferri (2013), para realizar o processo de retroanálise é necessário o conhecimento prévio das espessuras das camadas do pavimento e os valores do coeficiente de Poisson.

Os métodos de retroanálise podem ser classificados como simplificados ou iterativos. Nos métodos simplificados, as características elásticas da estrutura do pavimento são obtidas por meio de equações, tabelas e gráficos oriundos da teoria da elasticidade aplicada aos meios homogêneos, isotrópicos e linearmente elásticos (NÓBREGA, 2003 *apud* RIBAS, 2014).

De maneira geral, os métodos simplificados consistem na conversão do pavimento real em estruturas equivalentes mais simples. Como tratam o problema de forma simplificada, acabam perdendo a acurácia para uma análise mais rigorosa, mas podem ser úteis em análises preliminares e anteprojetos devido ao tempo de processamento menor (FONSECA, 2002; RIBAS, 2014).

Já os processos iterativos buscam determinar, com auxílio de um programa computacional que calcule as tensões, deformações e deslocamentos em pavimentos, os módulos resilientes equivalentes para cada camada do pavimento, de forma a reproduzir a bacia de deflexão medida em campo (DNIT, 2006). Através da comparação dos dados das bacias de deflexão de campo com bacias de deflexão geradas teoricamente, identificam-se os parâmetros elásticos aproximados para a estrutura estudada (FONSECA, 2002).

A retroanálise tem como objetivo principal fornecer dados que podem ser utilizados na manutenção e/ou restauração das características estruturais aceitáveis para o pavimento (VILLELA; MARCON, 2001).

Dentre as vantagens de realizar a retroanálise, expostas por Preussler (2007), podem ser citadas a eliminação ou minoração dos ensaios destrutivos para coleta de amostras do pavimento, a representação real do estado da estrutura, a determinação de estimativas satisfatórias quanto aos módulos das camadas, além de ser um processo rápido, com menores gastos e uma estimativa das propriedades elásticas das camadas do pavimento.

Grande parte dos métodos de retroanálise adotam a condição de linearidade para o comportamento dos materiais e módulos, sendo essa uma limitação nas análises já que o comportamento em campo é não linear.

A análise dos módulos resilientes equivalentes no processo de retroanálise não garante uma solução fechada, não há uma solução única, várias configurações estruturais podem resultar numa mesma bacia deflectométrica (MEDINA *et al.*, 1994).

2.1.4 Método não destrutivo para avaliação estrutural

Conforme descrito pelo DNIT (2006), existem três tipos de equipamentos para realizar as medições para determinação das deflexões através dos métodos não destrutivos. As vigas de deflexão, como a Viga *Benkelman*, medem a deflexão do pavimento com a aplicação de uma carga quase estática ou movimento vagaroso. Também podem ser adotados equipamentos dinâmicos de vibração, como o *Dynaflect*, que mede a resposta do pavimento quando submetido a uma carga vibratória ou cíclica. Por fim, os equipamentos dinâmicos de impacto que transferem uma carga dinâmica de impacto ao pavimento, como o FWD.

2.1.4.1 Viga Benkelman

O equipamento foi idealizado por *Benkelman* em estudos realizados em uma pista experimental da WASHO (*Western Association of State Highway Officials*), a Viga *Benkelman* é o dispositivo mais simples e difundido para o levantamento de deflexões em pavimentos (DNIT, 2006).

É um ensaio de carregamento quase estático, apresenta facilidade na operação, necessidade de mão de obra pouco qualificada, os valores medidos retratam com grande aproximação a real deformação do pavimento e é um ensaio de baixo custo (BORGES, 2001).

O ensaio é realizado através de uma viga horizontal apoiada sobre três pés (um traseiro e dois dianteiros), um braço de prova é rotulado na parte frontal da viga, tendo sua porção maior posicionada adiante da viga e a menor sobre ela. A ponta do braço de prova se encontra no ponto do pavimento a ser ensaiado, e a outra extremidade aciona o extensômetro que realizará as medidas das deflexões (DNIT, 2006).

Um passo a passo apresentado por Bernucci *et al.* (2008) e DNIT (2006) indica como realizar o ensaio da VB:

- a) Colocar a ponta de prova da VB entre os pneus da roda dupla traseira do caminhão de 8,2 tf (ou cada carga de roda dupla 4,1 tf), colocando-a exatamente sob seu eixo;
- b) Fazer a leitura inicial do extensômetro com o caminhão parado - leitura L_i ;
- c) O caminhão se afasta lentamente até 10 metros de distância da ponta de prova ou até que o extensômetro não acuse variação na leitura;
- d) Realizar nova leitura no extensômetro - L_f , ou seja, quando o pavimento recupera sua condição original;
- e) Para determinar uma deformada completa, há necessidade de afastar o caminhão de prova a pequenos intervalos, fazendo uma série de leituras intermediárias a cada parada do veículo, até o limite de 3 metros;
- f) Com o valor dessas leituras obtém-se as deflexões nas distâncias desejadas, conforme as Equações 11 e 12.

$$d = (L_i - L_f) \times F \quad (11)$$

Onde:

d = deflexão máxima (10^{-2} mm);

L_i = leitura inicial no extensômetro com o caminhão parado (10^{-2} mm);

L_f = leitura final no extensômetro, quando o pavimento recupera sua condição original (10^{-2} mm);

F = constante da viga, definida como a relação entre a parte maior e a menor do braço de prova.

$$d_i = (L_i - L_f) \times F \quad (12)$$

Onde:

d_i = leitura da deflexão intermediária (10^{-2} mm);

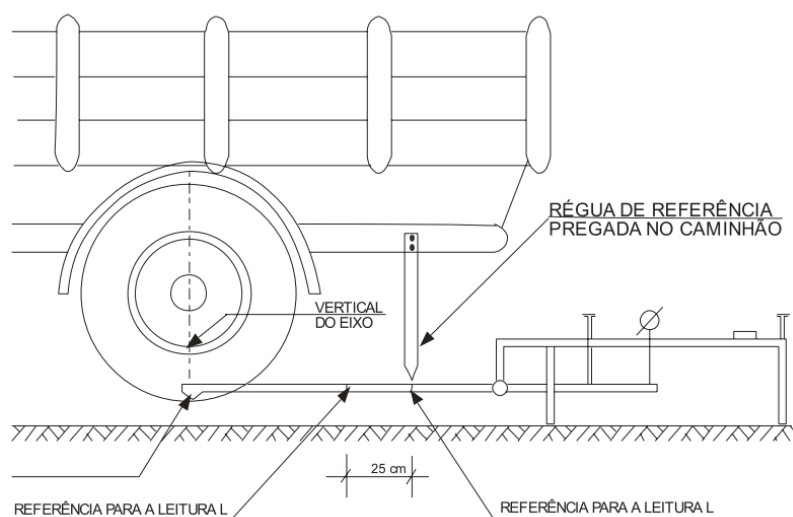
L_i = leitura inicial no extensômetro com o caminhão parado (10^{-2} mm);

L_f = leitura no ponto considerado no extensômetro (10^{-2} mm);

F = constante da viga, definida como a relação entre a parte maior e a menor do braço de prova.

O ensaio VB é ilustrado na Figura 9 e na Figura 10. Já o procedimento que deve ser realizado em campo para obtenção da bacia de deflexão com a VB é apresentado na Figura 11 e a Figura 12.

Figura 9 - Posição da VB e da prova de carga.



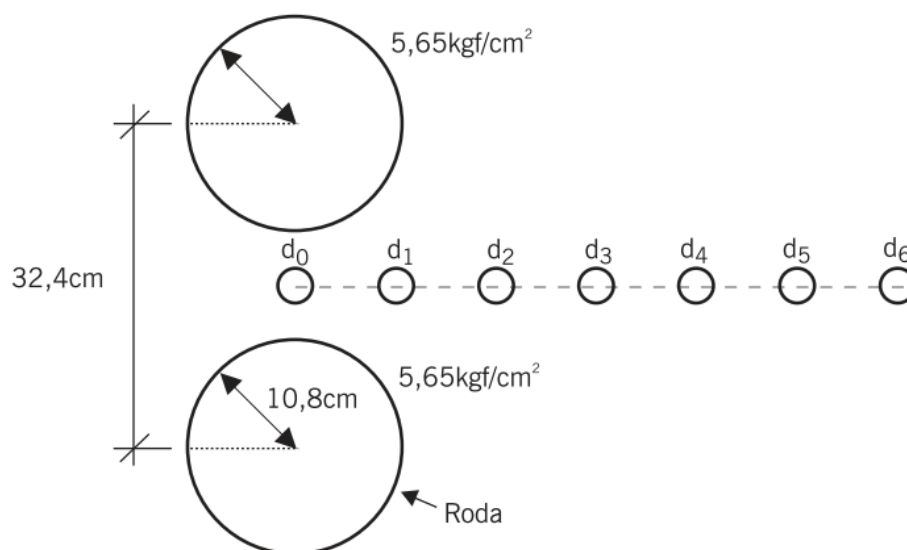
Fonte: (DNIT, 2006).

Figura 10 - Ensaio VB em campo.



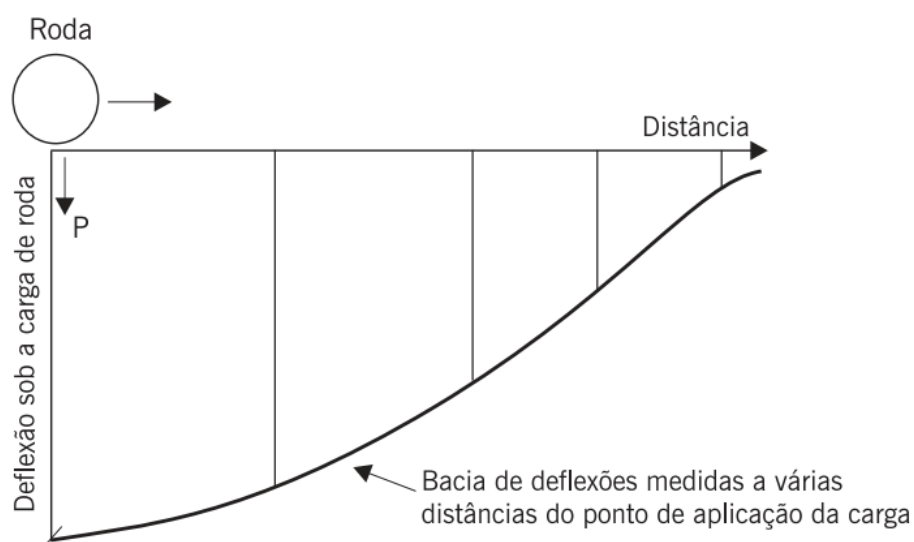
Fonte: Bueno (2016).

Figura 11 - Procedimento de leitura da VB para obtenção da deformada - em planta.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

Figura 12 - Procedimento de leitura da VB para obtenção da deformada - resultado.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

A obtenção da leitura completa das bacias é um procedimento trabalhoso, que por vezes pode apresentar pouca precisão, e todas as leituras intermediárias devem ser relacionadas a leitura final para cálculo da deflexão no ponto considerado, exposto anteriormente na Equação 12 (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O ensaio VB pode apresentar algumas dificuldades como a determinação do raio de curvatura da bacia de deflexão, dispersão elevada das leituras, não se pode

assegurar que as bases de apoio da viga estejam fora da deformada e morosidade no ensaio (BORGES, 2001).

Além dos fatores citados acima, o Manual de Restauração do DNIT (2006) orienta que os dados das bacias deflectométricas, obtidas através de um ensaio VB convencional, não são adequados para obtenção dos módulos de resiliência por retroanálise. A justificativa para preferência pelos dados obtidos por um ensaio FWD vai além da maior acurácia presente nos equipamentos de carga por pulsos. No ensaio VB, as distâncias das leituras são bastante aproximadas o que pode gerar um delineamento menos confiável da bacia com grandes dispersões nos resultados.

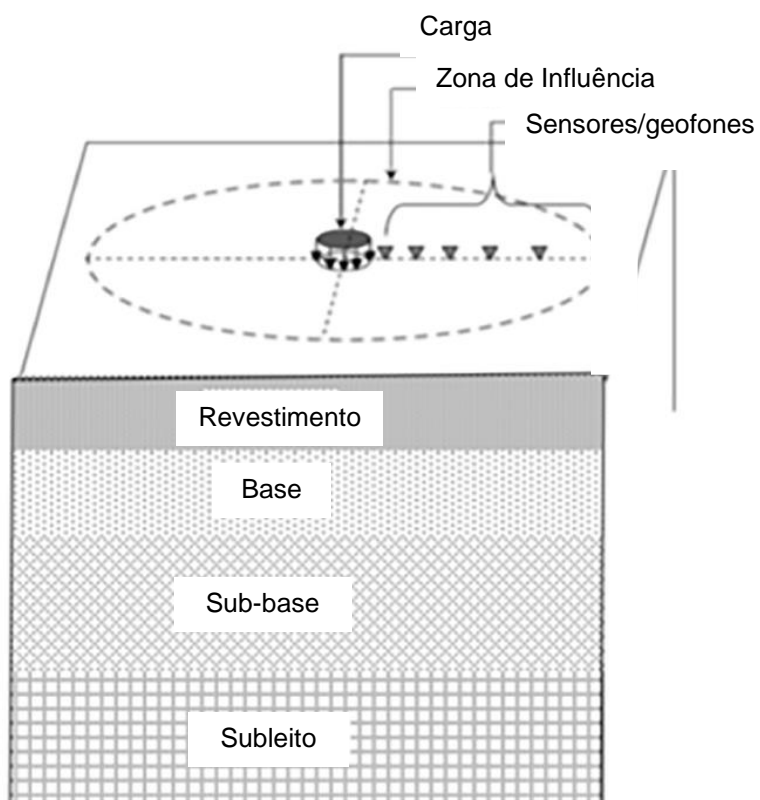
2.1.4.2 *Falling Weight Deflectometer - FWD*

O *Falling Weight Deflectometer* (FWD) é utilizado para avaliação *in situ* da condição do pavimento e impõe um carregamento dinâmico de impacto na superfície do pavimento (WANG *et al.*, 2020).

No ensaio FWD, uma carga de impulso é imposta à superfície do pavimento, deixando cair, de determinada altura, um peso sobre uma placa circular metálica (diâmetro 30 cm). Entre a placa e o pavimento existe um conjunto de amortecedores, com o objetivo de evitar o impacto direto da carga. Sensores e geofones localizados em sete a nove pontos radiais, sendo o primeiro deles no ponto de aplicação da carga, são utilizados para medir as deflexões do pavimento (Figura 13). A medição feita por cada geofone representa a deflexão da estrutura do pavimento e os valores de picos lidos em cada um deles permite traçar a chamada bacia de deflexão (GOKTEPE; AGAR; LAV, 2006).

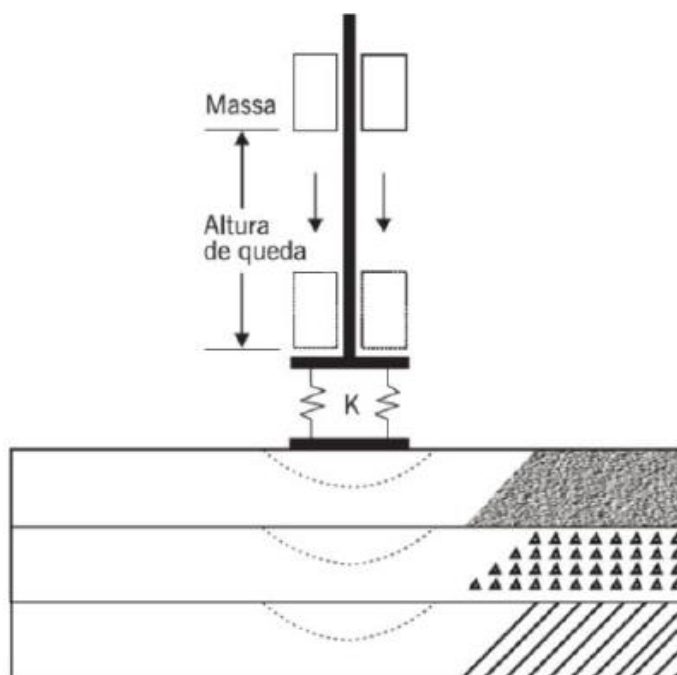
A Figura 14 ilustra o princípio de funcionamento de um deflectômetro de impacto com a queda das massas de determinada altura sobre a placa e o conjunto de amortecedores.

Figura 13 - Configuração de um Ensaio FWD.



Fonte: Adaptado de Hamim *et al.* (2018).

Figura 14 - Esquema de um deflectômetro de impacto.



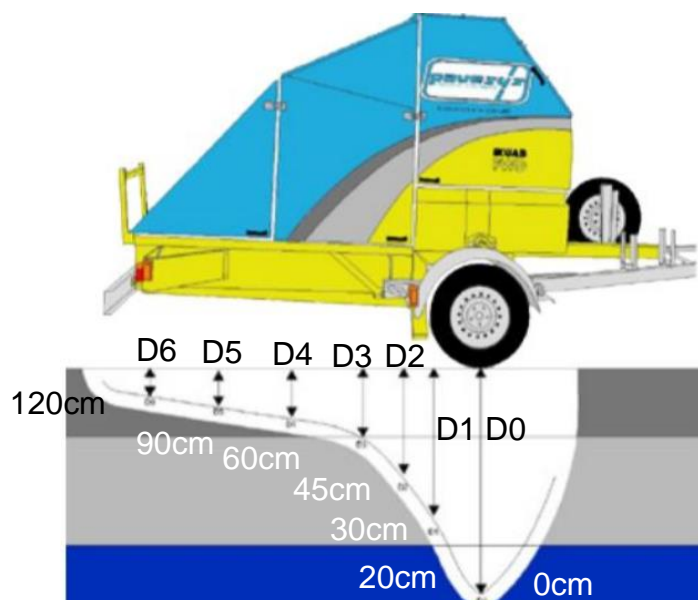
Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

A forma do pulso da carga gerada pelo equipamento visa simular a carga de uma roda em movimento, reproduzindo com maior precisão as deformações reais sobre os pavimentos. Com o impacto da carga, a forma da bacia de deflexão é medida e registrada (PINTO *et al.*, 2013).

A medida mais importante é a deflexão, registrada por meio dos geofones, porém, também devem ser registrados no ensaio: a carga aplicada, temperatura do ar e do pavimento, GPS (*Global Positioning System*) para registro das coordenadas do local da medição e distância de cada sensor em relação ao ponto de aplicação da carga (PINTO *et al.*, 2013). A linha de influência do equipamento FWD é representada na Figura 15 e a aplicação da carga circular com os sensores de medição é ilustrada na Figura 16.

O equipamento é automatizado e pode ser rebocado por um veículo leve. A bordo também segue um computador conectado aos sensores que obtém os dados deflectométricos, temperatura do ar e da superfície do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 15 - Linha de influência do equipamento FWD Kuab.



Fonte: Adaptado de Pinto *et al.* (2013).

Figura 16 - Equipamento FWD - carga circular e sensores.



Fonte: Zheng, Zhang e Liu (2017).

No mercado há algumas empresas que fabricam o equipamento FWD e percebe-se que eles diferem quanto a sua forma, sistema de aplicação de cargas, tempo de pulso e registro das deflexões. Algumas características da diferença entre eles foram determinadas e apresentadas na Tabela 6 (LUIS, 2009).

Tabela 6 - Comparação entre equipamentos FWD das empresas do mercado.

Característica	FWD Dynatest	FWD Jils	FWD Kuab
Montagem	Trailer aberto	Caminhonete	Trailer fechado
Pulso de carga	Queda de um conjunto de massas	Queda de um conjunto de massas	Queda de dois conjuntos de massas
Tempo de duração do pulso	0,030 s	0,024 s	0,034 a 0,05 s
Placa rígida de carga	Uma com 30 cm de diâmetro e outra com 45 cm	Placa sólida com 30,5 cm de diâmetro	Placa segmentada e 4 partes unidas por êmbolos
Ajuste à superfície do pavimento	Inclinação da placa até 6° em relação a horizontal	Placa rígida a 90° em relação a superfície	Segmentação da placa
Força aplicada	7 a 111 kN	14 a 93 kN	14 a 150 kN
Medida de deflexão	7 geofones	9 geofones	7 sismômetros
Deflexão máxima	2 mm	2 mm	5 mm

Fonte: Luis (2009).

As vantagens de sua utilização são relacionadas à acurácia na medição de deflexões, pequena dispersão das medidas, aplicação de vários níveis de carga e em um mesmo ponto, rapidez e facilidade de operação (independente das condições climáticas), medidas e registros automáticos das temperaturas e distância entre pontos pré-estabelecidos (PINTO; DOMINGUES, 2001).

2.1.5 Adaptação dos resultados do ensaio da Viga *Benkelman* na retroanálise

Diversos *softwares* de retroanálise de pavimentos estão configurados para receber como dados de entrada o raio da placa circular e o carregamento aplicado em um ensaio FWD. Dessa forma, é preciso a escolha de um método para conversão do carregamento obtido por um ensaio VB em um carregamento FWD para entrada das informações nesses programas (NERY, 2020).

Apesar da maior produtividade do ensaio FWD, a VB ainda é muito utilizada no Brasil, dessa forma, visando englobar o dimensionamento de reforços nos *softwares* com critérios de deflexão *Benkelman* se buscam correlações entre ambos os ensaios (SANTOS; ASSIS; JÚNIOR, 2019).

Medina, Macêdo e Motta (1994) afirmam que as correlações entre ambos os ensaios dependem das estruturas analisadas, das condições climáticas, do modo de carregamento e a metodologia adotada durante o ensaio.

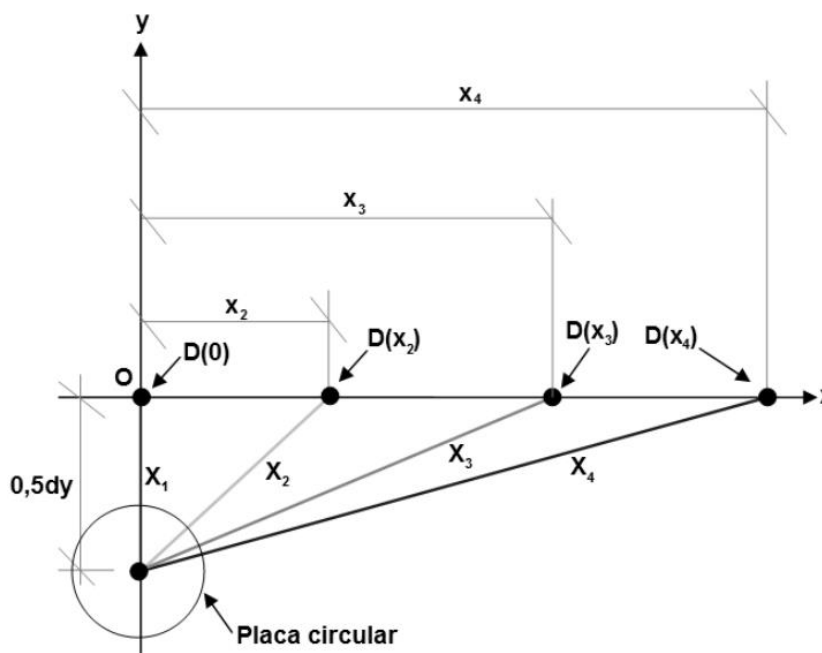
Diversos autores já apresentaram correlações entre as medidas VB e FWD embasadas na deflexão máxima de trechos homogêneos (BORGES, 2001). Propostas mais recentes, como a de Theisen *et al.* (2009), apresentam um modelo de conversão com base na transformação das distâncias entre a aplicação da carga e a leitura de deflexão. Baseado no princípio da sobreposição de efeitos, considera que cada uma das cargas (eixo simples de rodas duplas) do caminhão do ensaio VB é responsável por metade da deflexão sofrida pelo pavimento, assim, deve-se considerar apenas o carregamento de um dos pneus e metade da deflexão medida em campo.

Hipóteses adotadas para validade do método de Theisen *et al.* (2009) referem-se à consideração das camadas do pavimento horizontalmente infinitas e de espessura constante; materiais lineares elásticos, homogêneos e isotrópicos com módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson constantes; carregamento por placas

circulares de pressão uniforme; e centros geométricos das placas carregadas igualmente distantes dos pontos de medida de deflexões na superfície do pavimento.

As considerações apresentadas por Theisen *et al.* (2009) alteram a distância entre o ponto de aplicação da carga e os pontos de leituras dos deslocamentos verticais, criando uma nova distância “X” em relação ao centro da carga “O” em função das distâncias “x” do levantamento deflectométrico, conforme ilustrado na Figura 17 e na Equação 13. No “eixo x” são representadas as deflexões em campo em função de “ x_i ” e “ d_y ” é a distância entre os centros das placas circulares do carregamento. O centro de carga está distante do ponto onde é medida “ $D(x_i)$ ” a uma distância “ X_i ”. Considera-se 0,5 para representar a atuação de apenas uma roda.

Figura 17 - Adequação das distâncias de aplicação da carga.



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

$$X_i = \sqrt{(x_i)^2 + (0,5dy)^2} \quad (13)$$

Onde:

X_i = distância calculada (cm);

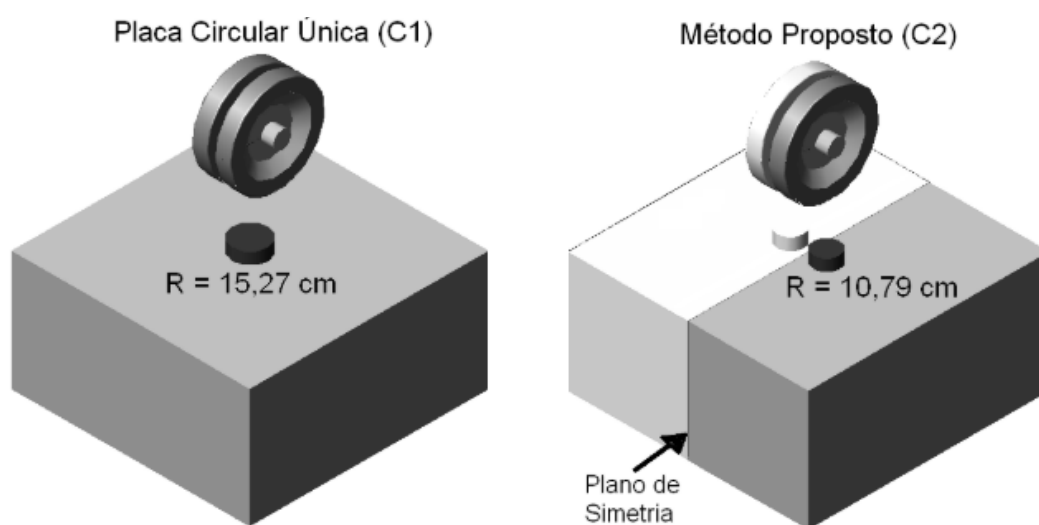
x_i = distância para o centro geométrico “O” do carregamento (cm);

dy = distância entre o centro das placas circulares (cm).

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

Os autores ainda aplicam o método em duas condições de distribuição de cargas diferentes. O que eles chamam de C1 (placa circular única), considera a carga do semieixo distribuída apenas em uma placa circular de pressão uniforme de 560 kPa. Já o que eles denominam C2 (método proposto), considera a atuação das duas rodas do semieixo, com os mesmos 560 kPa, distância entre os centros geométricos das cargas de 30 cm, porém analisando-se o efeito de apenas uma delas a partir do plano de simetria. As situações C1 e C2 são apresentadas na Figura 18, sendo o método C2 a representação da proposta dos autores.

Figura 18 - Condições C1 e C2 para retroanálise de Theisen *et al.* (2009).



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

Entre ambas as condições estudadas, a condição C1 demonstrou um aumento na tensão de tração na base do revestimento, o que interfere na distribuição de tensões nas camadas inferiores e pode interferir na previsão de deformações permanentes das camadas e na vida de fadiga, subestimando os resultados. Dessa forma, a aplicação do método C2 obteve resultados melhores na pesquisa com maiores acurácias nos resultados das retroanálises (THEISEN *et al.*, 2009).

Já Bueno (2016) sugere a utilização da conversão por áreas equivalentes através da adaptação do valor de carga do eixo (80 kN) e do raio de aplicação e da carga imposta pelo caminhão ao pavimento.

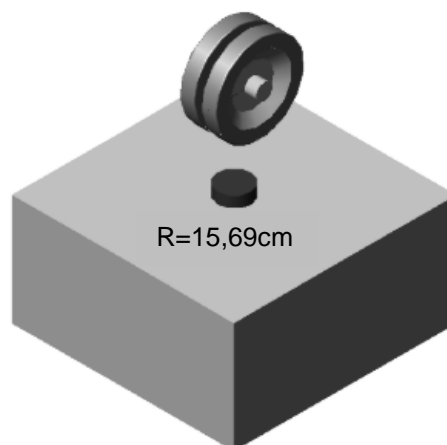
O procedimento, apresentado na Tabela 7, a carga do Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD) é transformada na carga do semieixo, de forma que o carregamento se torne semelhante ao aplicado em um ensaio FWD. Para transformar a área de aplicação da carga do caminhão em uma placa de carga, foi calculada a área equivalente da roda. Considerou-se a carga do eixo dividida por quatro e distribuída na respectiva pressão de enchimento dos pneus, e então multiplicada por dois para determinar a área equivalente de duas rodas do semieixo do caminhão. Por fim esta área é transformada em um raio equivalente, conforme apresentado na Figura 19.

Tabela 7 - Adaptações do carregamento VB para FWD de Bueno (2016).

Carga do ESRD (kN)	Pressão pneus (MPa)	Área para uma roda (cm ²)	Área para duas rodas (cm ²)	Raio para duas rodas (cm)	Carga FWD (kN)
80,00	0,56	386,39	772,78	15,69	40,00

Fonte: Bueno (2016).

Figura 19 - Raio equivalente na adaptação VB para FWD de Bueno (2016).



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

Sob esse mesmo aspecto, Medina e Motta (2015), ao invés de considerar a carga do semieixo distribuída em uma placa circular, adotaram a premissa da carga de atuação das duas rodas do semieixo (com distância entre os centros geométricos das cargas de 30 cm) e analisando o efeito de apenas uma delas a partir de um plano de simetria. Os autores detalharam o cálculo do diâmetro de uma roda do semieixo

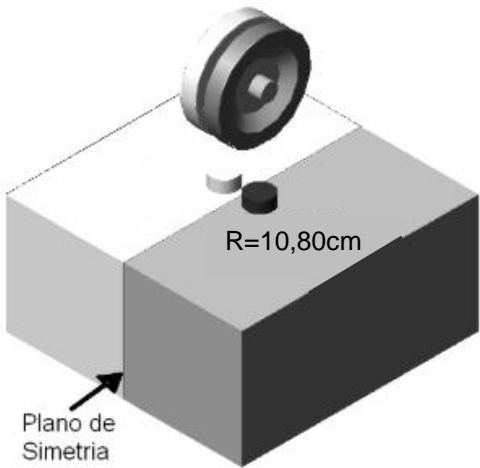
padrão e obtém o valor de 21,4 cm, ou seja, um raio de 10,8 cm, comumente utilizado em cálculos de tensões e deformações. Um resumo das condições propostas pelos autores é apresentado na Tabela 8 e ilustrado na Figura 20.

Tabela 8 - Adaptações do carregamento VB para FWD de Medina e Motta (2015).

Carga do ESRD (kN)	Pressão pneus	Área para uma roda (cm²)	Área para duas rodas (cm²)	Raio para duas rodas (cm)	Carga FWD (kN)
80,00	55 N/cm² 5,6 kgf/cm² 80 lb/pol²	363,00	726,00	10,8	20,00

Fonte: Adaptado de Medina e Motta (2015).

Figura 20 - Raio equivalente na adaptação VB para FWD de Medina e Motta (2015).



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

Por fim, com base na comparação realizada por Vieira (2020) entre os métodos de Bueno (2016) e Theisen *et al.* (2009), conclui-se que a configuração mais adequada de ajustes é o método C2 de Theisen *et al.*(2009), a ser adotado nesta pesquisa.

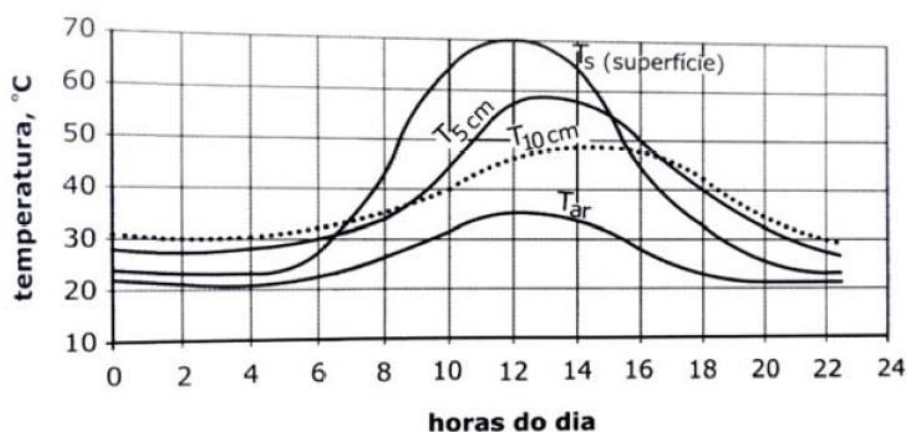
2.1.6 Influência da temperatura nas medidas de deflexão

Motta (1991) apresenta em seus estudos que a correta consideração da temperatura nos projetos de pavimentos asfálticos tem influência direta no revestimento, deformabilidade, e conseqüentemente, no desempenho previsto para a estrutura dimensionada.

Noureldin (1993) *apud* Bueno (2016) destaca que diversos estudos foram realizados para verificar o motivo dos altos valores encontrados para os módulos das camadas de revestimento asfáltico obtidos nos processos de retroanálise. Estes, evidenciaram que a grande variação tinha relação com as medidas de deflexão obtidas com a sazonalidade e temperatura no momento do ensaio, convencionando, então, o ajuste das leituras em relação às condições climáticas.

Medina e Motta (2015) ressaltam que as variações diárias e sazonais de temperatura causam variações nas rigidezes dos pavimentos asfálticos. Logo, ao longo de um único dia, a temperatura presente no ar e na superfície da camada asfáltica geram deflexões variadas, situação que pode ser observada na Figura 21.

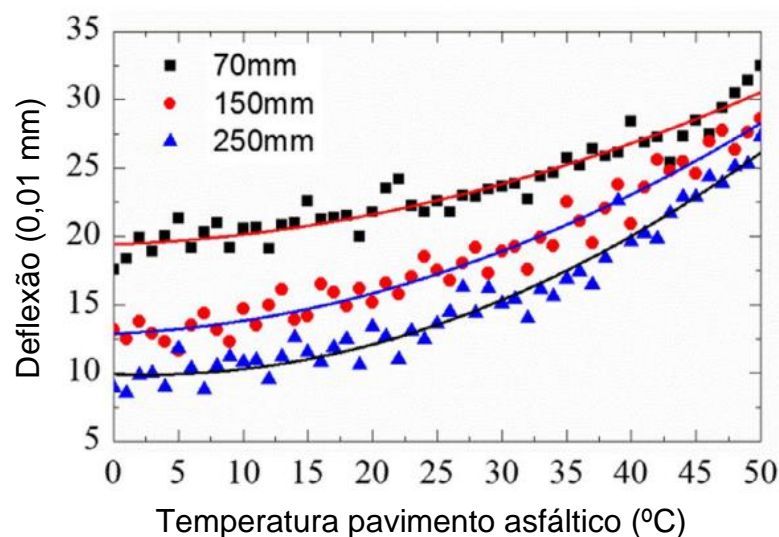
Figura 21 - Temperatura do ar e do pavimento em um dia de verão - Rio de Janeiro.



Fonte: Medina e Motta (2015).

Zheng, Zhang e Liu (2019) ao analisarem a influência da temperatura na forma da bacia de deflexão, verificaram que ela é afetada com a mudança da rigidez do pavimento pela variação da temperatura. Parâmetros como a deflexão máxima, por exemplo, são alterados conforme varia-se a temperatura do pavimento. Ainda concluíram que quanto mais espessa a camada de mistura asfáltica, maior é a influência que a temperatura exerce sobre ela, necessitando de atenção especial nas análises e retroanálises. Na Figura 22 são ilustradas as deflexões máximas variando em função da temperatura e da espessura das camadas asfálticas.

Figura 22 - Variação das deflexões máximas em função da temperatura



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

Pais *et al.* (2018), corroboram com a definição de que, devido as características viscoelásticas das misturas asfálticas, as medidas das deflexões dos pavimentos em campo são diretamente influenciadas por essa variação de temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura em campo (seja do ar ou na superfície do pavimento), maiores serão as deflexões das bacias medidas. Portanto, padronizam que todas as medidas de deflexão das bacias de campo devem ser corrigidas para uma temperatura de 20°C, conforme Equação 14.

$$DR = (\beta_1 + \beta_2(T - 20).d) * (\beta_3 + \beta_4(T - 20).log(H)) * (\beta_5 + \beta_6(T - 20).E) * (\beta_7.T^2 + \beta_8.T + \beta_9) \quad (14)$$

Onde:

DR = razão da deflexão, número a ser multiplicado para transformar a deflexão em uma temperatura qualquer para a deflexão na temperatura padrão de 20°C;

T = temperatura do pavimento (°C);

d = afastamento da leitura em relação ao carregamento (m);

H = espessura da camada de revestimento (m);

E = módulo de elasticidade do subleito (MPa);

β = coeficientes estatísticos.

Sendo os valores de β dispostos na Tabela 9.

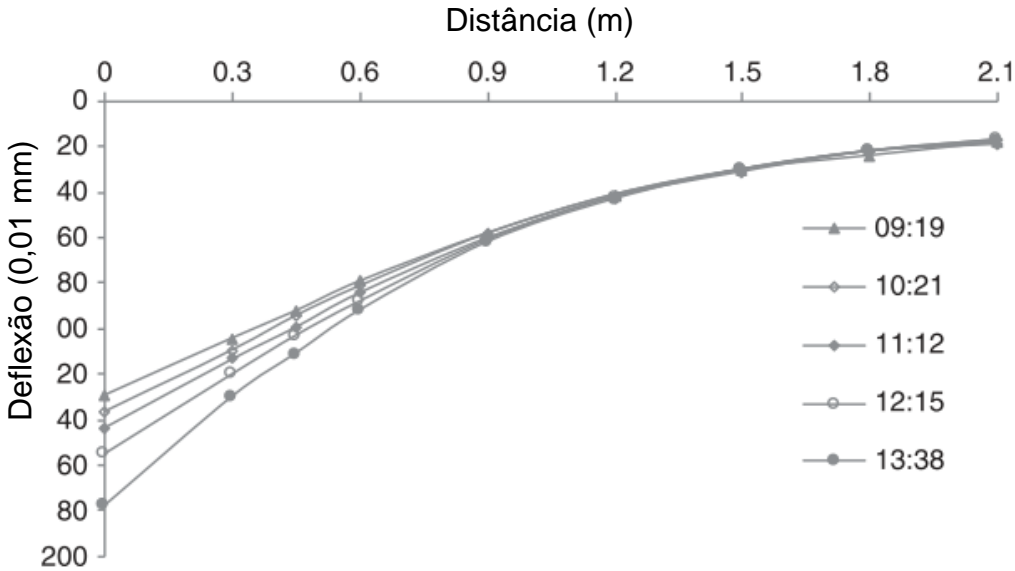
Tabela 9 - Valore de β da Equação 14.

Coeficiente β	Valores de β
β_1	$-3,46 \times 10^{-1}$
β_2	$-3,957 \times 10^{-3}$
β_3	$-2,112 \times 10^{-1}$
β_4	$2,318 \times 10^{-3}$
β_5	$4,937 \times 10^1$
β_6	$2,006 \times 10^{-3}$
β_7	$8,021 \times 10^{-5}$
β_8	$-1,342 \times 10^{-2}$
β_9	$5,136 \times 10^{-1}$

Fonte: Adaptado de Pais *et al.* (2018).

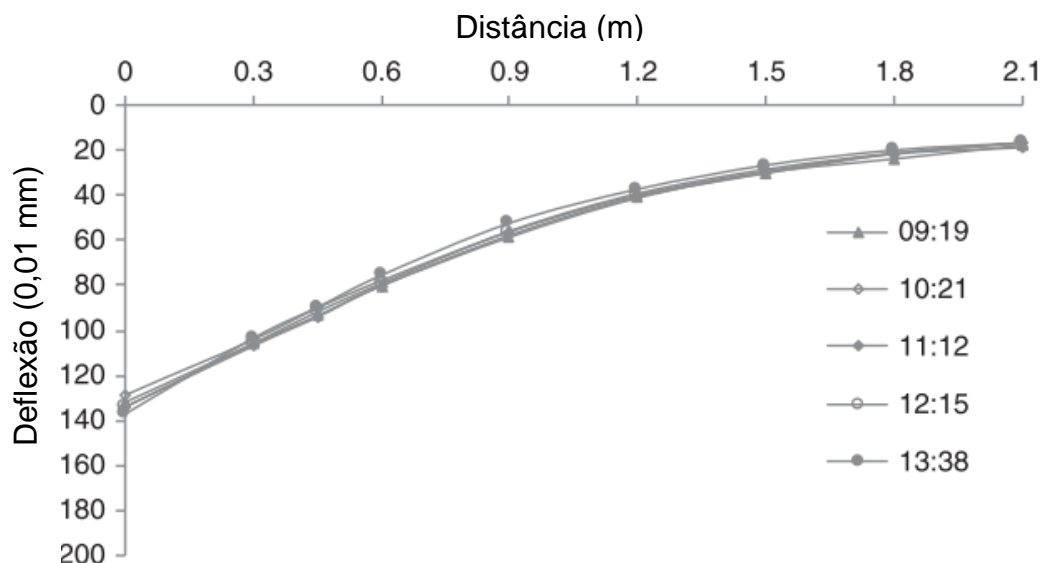
Os resultados das bacias de campo são apresentados na Figura 23 e as bacias corrigidas pela Equação 14 estão ilustradas na Figura 24.

Figura 23 - Bacias deflectométricas obtidas através do ensaio FWD em campo em diferentes horas do dia.



Fonte: Adaptado de Pais *et al.* (2018).

Figura 24 - Bacias deflectométricas corrigidas pela Equação 14.



Fonte: Adaptado de Pais *et al.* (2018).

Conforme Pais *et al.* (2018) concluíram no seu estudo, com o ajuste de todas as temperaturas medidas em campo para um modelo de temperatura padrão de 20°C, ao multiplicar as bacias deflectométricas por esse valor de ajuste, é possível plotar corretamente a forma da bacia de deflexão na temperatura de 20°C e então realizar as comparações e análises necessárias quanto ao pavimento.

No Brasil, utiliza-se como referência uma temperatura padrão de 25°C, conforme proposto pelo DER-SP (2006), o ábaco da Figura 25 é uma adaptação do ábaco da Figura 26 desenvolvido pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) em 1993, quanto à necessidade de correção dos valores de deflexão em função de uma temperatura de referência.

De forma a uniformizar as leituras de deflexão para uma temperatura padrão de 25°C, Bueno (2016) propôs a Equação 15 adaptada do ábaco da Figura 25.

$$D_{25} = \frac{D_p}{\left(\left(\left(\frac{h_{CA}}{1000} \right) * (T - 25) \right) + 1 \right)} \quad (15)$$

Onde:

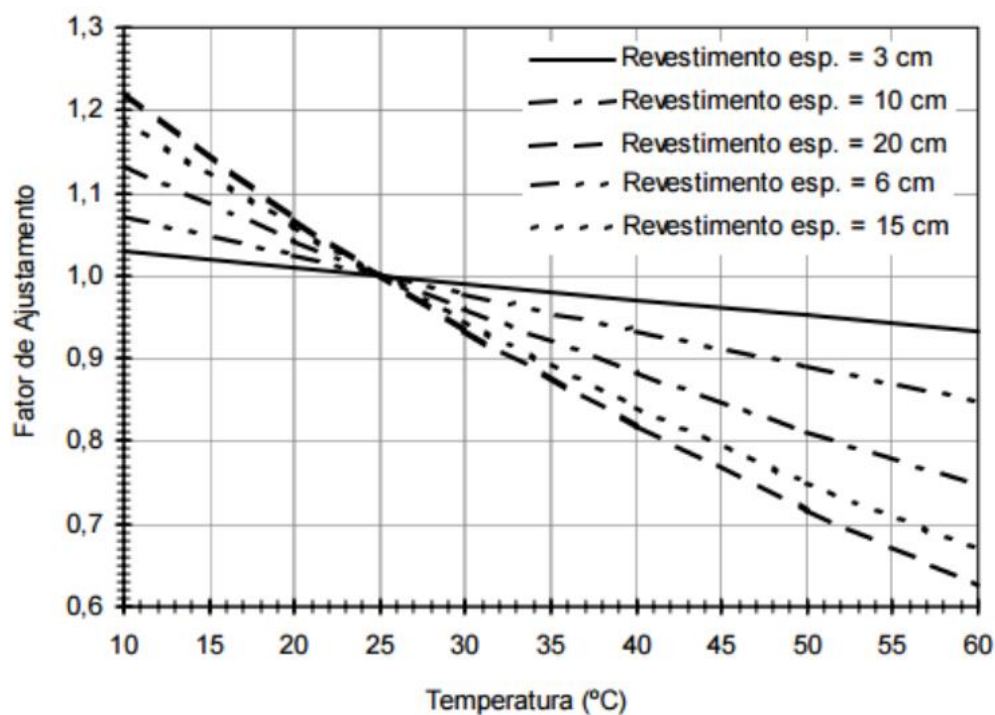
D_{25} = deflexão corrigida para a temperatura de 25°C (10⁻² mm);

D_p = deflexão medida na pista (10⁻² mm);

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

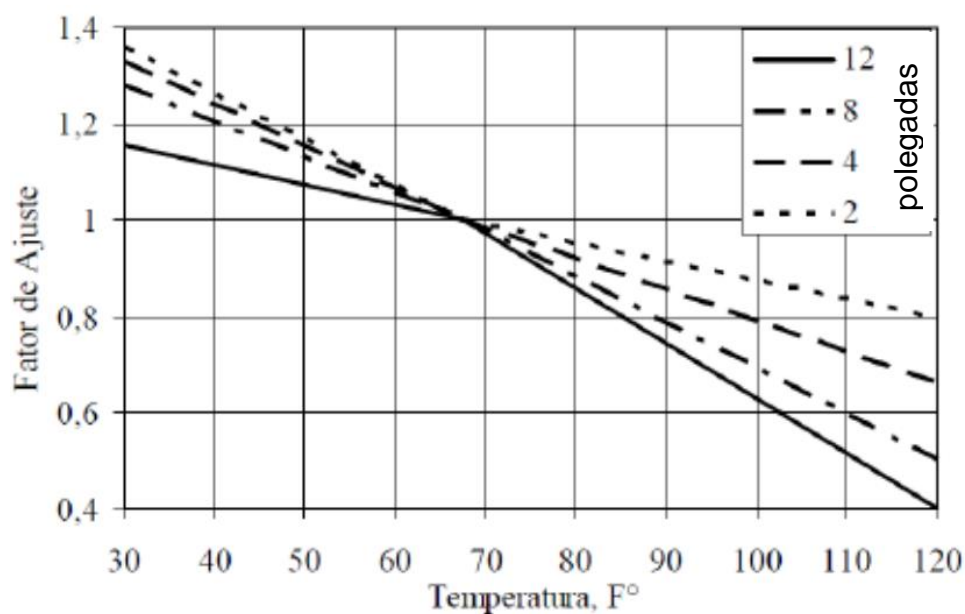
T = temperatura da superfície do pavimento no momento do ensaio ($^{\circ}\text{C}$).

Figura 25 - Ábaco adaptado para correção das deflexões em função da temperatura.



Fonte: DER-SP (2006).

Figura 26 - Ábaco para correção das deflexões em função da temperatura da AASHTO.



Fonte: Adaptado AASHTO (1993) *apud* Bueno (2016).

Dessa forma, Bueno *et al.* (2020) realizaram reatransmissões de dois trechos monitorados na cidade de Santa Maria/RS. Foram realizadas as reatransmissões com os *softwares* BAKFAA e BackMeDiNa inicialmente com os dados das bacias de deflexão sem correção de temperatura. Na sequência, o mesmo cálculo foi feito corrigindo, para uma temperatura padrão (Equação 15), as deflexões medidas nas distâncias D0, D1 e D2 em relação à aplicação da carga (conforme Figura 15), uma vez que as distâncias mais afastadas não são influenciadas por tensões verticais existentes na camada de revestimento asfáltico (ou seja, não tem influência do material termossuscetível nos resultados das deflexões medidas por esses sensores).

Os autores supracitados concluíram que a forma mais adequada para correção da temperatura e obtenção dos módulos resilientes equivalentes é a determinação de maneira preliminar dos valores dos módulos a partir da bacia de campo sem nenhum ajuste. Com os valores dos módulos das camadas granulares (base e sub-base) e do subleito já determinados (materiais que não são termossuscetíveis), fixam-se esses valores dos módulos e realiza-se a correção da temperatura e a reatransmissão novamente para determinar as novas leituras das rigidezes nos pontos D0, D1 e D2 (leituras representativas à compressão elástica do concreto asfáltico).

Em resumo, quanto maior a temperatura, maiores são as deflexões das camadas (principalmente das termossuscetíveis) e menor é o MR encontrado.

A presente pesquisa adota as considerações de Bueno *et al.* (2020) nos cálculos de correção das temperaturas para reatransmissão nos *softwares* BackMeDiNa e BAKFAA.

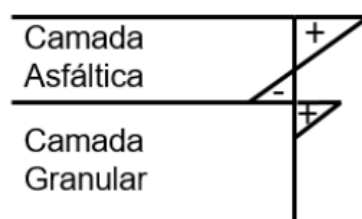
2.1.7 Influência da aderência das camadas dos pavimentos nas medidas de deflexão

Carvalho e Filho (2014) especificam que a aderência é um fenômeno onde dois ou mais materiais com resistências diferentes, trabalham juntos, apresentando as mesmas deformações. Camadas aderidas trabalham juntas à solicitação, como se fossem um bloco monolítico, já camadas não aderidas trabalham independentemente, cada uma com sua própria linha neutra.

A Figura 27 ilustra o revestimento e base não aderidos, cada camada trabalha com sua própria linha neutra, sendo o revestimento resistente à compressão e tração na flexão e a base resiste somente à compressão na flexão, da fibra superior até a

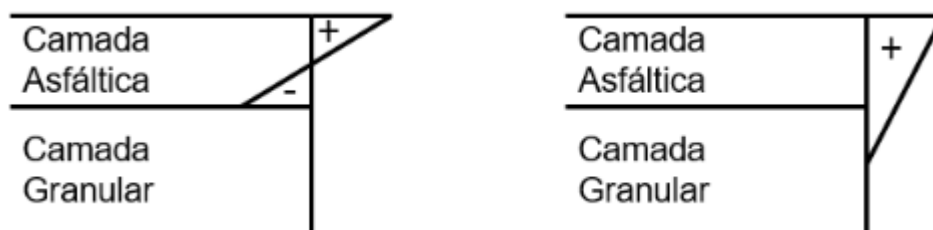
linha neutra. Já a Figura 28 mostra o revestimento e a base granular aderidos, ou seja, com as camadas trabalhando de forma monolítica e com uma única linha neutra. Caso essa linha neutra fique posicionada no revestimento, este resistirá à compressão e a tração na flexão e a base não atua à flexão, já se a linha neutra estiver na camada granular, todo o revestimento e a parte superior da base até a linha neutra resistirão à compressão na flexão (SCHERER, 2018).

Figura 27 - Linha neutra em camadas não aderidas.



Fonte: Adaptado de Scherer (2018).

Figura 28 - Linha neutra em camadas aderidas.



Fonte: Adaptado de Scherer (2018).

Huang (2004) e Canestrari *et al.* (2013) apresentaram em seus estudos que assumir aderência total entre todas as camadas que constituem o sistema, não representa a verdadeira condição da estrutura em campo.

Bueno (2016) afirma que a condição de aderência das camadas, por ser um parâmetro mecânico, precisa receber a devida atenção nos projetos de restauração e reforços.

Alguns estudos já foram realizados para verificar a influência da condição de aderência nos processos de retroanálise de pavimentos.

Wu *et al.* (2017) realizaram a modelagem das três condições, aderência completa, parcial e nula, e analisaram as tensões de deflexão e tensões de cisalhamento, concluindo que a perda de aderência entre as camadas altera o estado de tensões da camada asfáltica de compressão para tração em casos críticos.

De acordo com os estudos de Scherer (2018), quando o revestimento asfáltico e a base granular são considerados não aderidos, os valores de dano à fadiga são maiores do que quando considerados aderidos, ou seja, a maior aderência entre as camadas traz melhorias no desempenho dos pavimentos. Nas análises realizadas, foi concluído que o revestimento asfáltico e a base granular são mais bem caracterizados quando considerados não aderidos entre si. O autor ainda reforça que como a aderência entre as camadas é um dos fatores de entrada de diversos *softwares* de dimensionamento, o conhecimento dessa interface deixa de ser uma decisão de projeto e deveria passar a ser uma propriedade que deve ser analisada diretamente em campo.

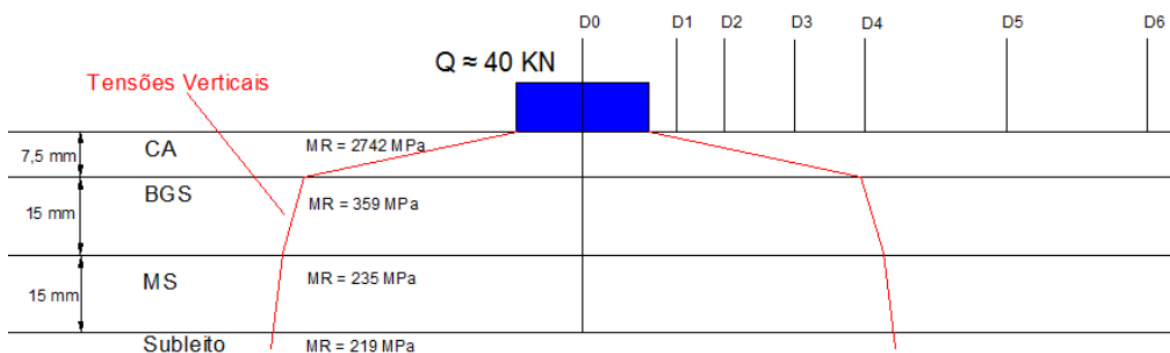
Santos, Assis e Júnior (2019) estimaram o comportamento mecânico das estruturas dos pavimentos sob diferentes condições de aderência no *software* Abaqus, aplicando a metodologia dos elementos finitos. Neste, é possível estimar a aderência completa, parcial ou nula entre as camadas, sendo que a consideração adotada nas duas primeiras interfaces entre as camadas do pavimento pode alterar significativamente as respostas estruturais do revestimento e do subleito. Também concluíram que quanto mais rígida for a camada de asfalto, maior o impacto que a aderência considerada irá gerar nos resultados de desempenho do pavimento. Os autores ressaltam ainda que a consideração correta da aderência deve ser estimada de acordo com as condições que efetivamente ocorrerão no pavimento em serviço.

Bueno *et al.* (2020) afirmam que a aderência entre as camadas é um fator que interfere diretamente nos resultados dos módulos resilientes equivalentes obtidos nos processos de retroanálises. Os módulos resilientes equivalentes quando analisados em camadas totalmente aderidas foram menores, pois ocorre a distribuição gradual dos esforços ao longo da estrutura, exigindo menores valores de módulo para o ajuste da bacia deflectométrica teórica à de campo. A Figura 29 e a Figura 30, mostram a diferença na distribuição dos esforços nas camadas do pavimento, quando consideradas não aderidas (diagrama de tensões pouco distribuído) e aderidas (diagrama de tensões bem distribuído).

A pesquisa de Vieira (2020) também encontrou valores de módulo menores, quando as camadas foram consideradas totalmente aderidas, quando comparados à consideração não aderida.

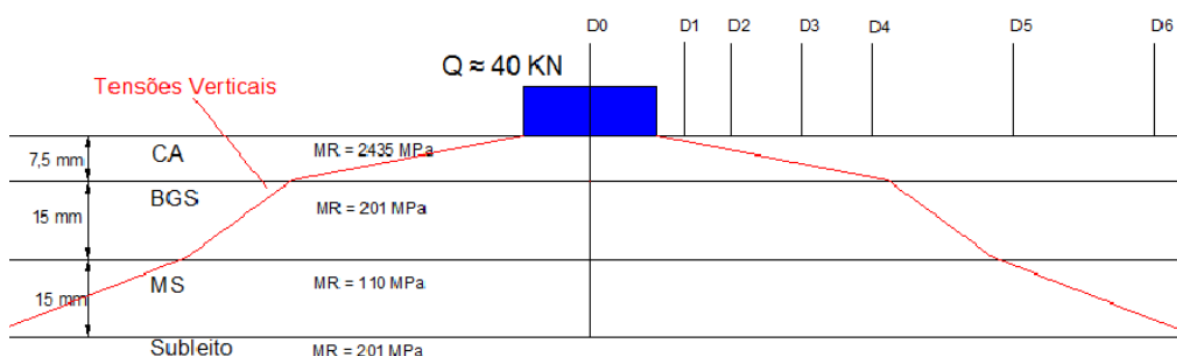
A consideração de interfaces não aderidas (entre a camada asfáltica e a base granular) é a que mais se assemelha aos contatos existentes em pista, conforme apresentado por Silva (2017) e Scherer (2018).

Figura 29 - Camadas não aderidas - diagrama de tensões pouco distribuído.



Fonte: Bueno *et al.* (2020).

Figura 30 - Camadas aderidas - diagrama de tensões bem distribuído.



Fonte: Bueno *et al.* (2020).

Em resumo:

- Quanto maior a aderência entre a camada asfáltica e a base granular, menor o módulo resiliente equivalente retroanalisado;
- Quanto maior a aderência entre as camadas, melhor o desempenho do pavimento;
- Quanto menor a aderência entre as camadas, maiores danos por fadiga atuantes no pavimento;
- Quanto menor a aderência entre as camadas, maior a quantidade de deformações ocorridas no pavimento.

A adoção da consideração de camadas não aderidas vai a favor da segurança no cálculo da vida de fadiga realizado por um engenheiro (condição mais crítica). Em

geral, o projetista deve efetuar as retroanálises considerando as condições de interface que serão adotadas pelo *software* de dimensionamento do referido pavimento (SOUZA JÚNIOR, 2018; BUENO *et al.*, 2020).

Esta pesquisa vai estudar a condição de interface das camadas na retroanálise dos módulos resilientes equivalentes das camadas do pavimento.

2.1.8 Influência da carga aplicada na retroanálise

Os *softwares* de retroanálise com base na TSCE, em geral, encontram o módulo resiliente equivalente através do ajuste das bacias deflectométricas teóricas/calculadas com as de campo e já consideram nos dados de entrada, os valores das cargas aplicadas no ensaio FWD (BUENO, 2016). Devido a esse motivo, não é necessário realizar o ajuste desses valores, pois eles já são considerados nos cálculos iterativos.

Para a entrada e análise dos valores das deflexões em *softwares* de elementos finitos, em que é necessário definir um valor da carga como um dado de entrada padrão, o ajuste da carga é necessário.

Conforme Moraes (2015), as deflexões obtidas pelo ensaio FWD podem ser interpoladas linearmente, considerando a carga pré-estabelecida e a carga realmente aplicada. O procedimento indicado é baseado no Protocolo 10 do “*Falling Weight Deflectometer Calibration Guide*” elaborado pela *Plataform for Infrastructure, Traffic, Transport and Public Space* (CROW) de 2011. A Equação 16 apresenta o ajuste sugerido.

$$d_{i,j,k,m} = u_{i,j,k,m} * \frac{FR}{F_{i,k,m}} \quad (16)$$

Onde:

$d_{i,j,k,m}$ = deflexão corrigida;

$u_{i,j,k,m}$ = deflexão medida;

FR = carga pré-definida;

$F_{i,k,m}$ = carga aplicada.

2.2 SOLUÇÃO ANALÍTICA ATRAVÉS DA TEORIA DOS SISTEMAS DE CAMADAS ELÁSTICAS

2.2.1 Teoria dos Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE)

Através dos estudos realizados em meados do século XX por Donald Burmister é que surgiu a base para o desenvolvimento do que hoje é a TSCE, possibilitando um grande salto qualitativo nas análises de pavimentos (BALBO, 2007).

A retroanálise através da TSCE é um método iterativo que busca obter analiticamente os módulos das camadas do sistema existente (pavimento e subleito) e através destes módulos, das espessuras das camadas e das cargas atuantes, calcula as tensões, deformações e deslocamentos em qualquer ponto do sistema analisado (FONSECA, 2002; FRITZEN *et al.*, 2019).

Conforme Yoder e Witczak (1975), Haas *et al.* (1994) e Huang (2004) *apud* Santos (2018) a solução analítica pela teoria das camadas elásticas é uma boa solução para estimar o comportamento estrutural dos pavimentos flexíveis.

De forma geral, conforme Macêdo (1996) *apud* Souza Júnior (2018) os processos de retroanálise ocorrem da seguinte forma:

- a) Estimativa dos módulos iniciais através de técnicas de aproximação ou banco de dados;
- b) Cálculo da bacia de deflexão com o uso dos módulos estimados anteriormente;
- c) Comparação dos resultados entre as bacias calculadas (teóricas) e as bacias medidas em campo;
- d) Ajuste nos valores dos módulos através de técnica que reduza as diferenças entre as deflexões teóricas e de campo;
- e) Repetição dos passos “b” e “d” até que o erro verificado entre as bacias teóricas e de campo obedeça ao critério de tolerância estabelecido.

Existem diversos programas empregados para o dimensionamento e avaliação de pavimentos baseados na TSCE que usam considerações simplificadas, com modelagens simples, menores capacidades de processamento computacional e geram resultados satisfatórios. Dentre estes programas podem ser citados o BAKFAA, BISDEF, CHEVDEF, ELSDEF, EMOD, EVERCALC, FPEDDI, ISSEM4, MODCOMP3, MODULUS, PADAL, WESDEF, LEEPWIN e MICHBACK citados por Fonseca (2002)

em sua pesquisa. E ainda, métodos mais recentes citados por Scherer (2018), como o MnLayer, BISER, ILLI-PAVE, JULEA e o pacote MeDiNa.

2.2.2 Retroanálise com o *software* BackMeDiNa

O BackMeDiNa é um *software* em visual C++ criado para auxiliar a retroanálise de bacias deflectométricas obtidas através do ensaio FWD, desenvolvido para uso como um componente nos programas MeDiNa e AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) (SOUZA JÚNIOR, 2018).

O programa MeDiNa vem com uma base de dados incorporada com informações de materiais ensaiados e que constam em publicações técnicas, não são passíveis de alterações em suas propriedades, apenas a espessura e o tipo de módulo (elástico linear ou não linear) quando disponíveis. O *software* também permite que o projetista salve seus materiais ensaiados na base de dados do programa, permitindo o intercâmbio de informações entre usuários (FRANCO; MOTTA, 2020).

Os autores Franco e Motta (2020) apresentam no manual do programa MeDiNa algumas hipóteses fundamentais consideradas nos programas BackMeDiNa e AEMC para problemas de elasticidade linear e sistemas de múltiplas camadas e contínuos:

- a) Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- b) A lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- c) As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- d) Todas as camadas possuem espessura finita, exceto a camada inferior que é semi-infinita;
- e) A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- f) Na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- g) A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda área circular de contato;
- h) A grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- i) As condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

A rotina de cálculo para obtenção dos módulos resilientes equivalentes das camadas é realizado de forma iterativa através do BackMeDiNa e da análise elástica

linear presente no AEMC, a partir da variação dos módulos em torno de um valor central até se obter a bacia deflectométrica teórica mais próxima da bacia real medida em campo. O programa AEMC ainda fornece valores de tensões e deformações que podem ser utilizados para estimativa da vida útil do pavimento (FRANCO; MOTTA, 2020).

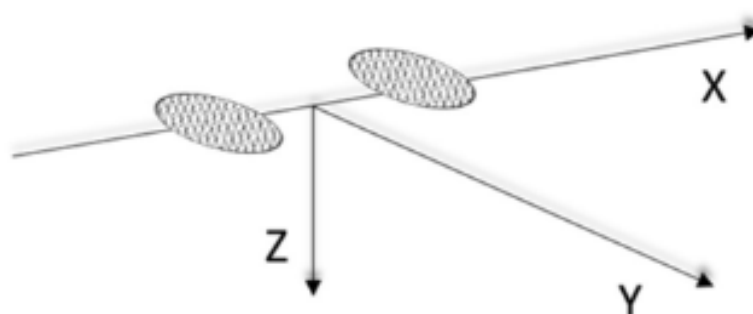
Algumas das variáveis presentes nos *softwares* são apresentadas na Tabela 10 e a Figura 31 indica a consideração do sistema de coordenadas com base nos resultados do ensaio FWD para cada posicionamento dos geofones (valores positivos de tensão e deformação indicam que o ponto está sob compressão, e valores negativos, em tração).

Tabela 10 - Variáveis presentes no BackMeDiNa e AEMC.

Variável	Unidade
Espessuras e distâncias	cm
Raio de carregamento	cm
Deslocamento	μm
Deformações específicas	m/m
Áreas de contato	cm^2
Pressão de inflação e tensões	MPa
Carga de eixo ou de roda	ton
Erro quadrático médio (RMS)	%

Fonte: Franco e Motta (2020).

Figura 31 - Sistema de coordenadas adotado com base no FWD.



Fonte: Franco e Motta (2020).

Para as condições de carregamento, o *software* adota a carga de roda como uniformemente distribuída em uma área de contato circular entre o pneu e a superfície do pavimento e utiliza o eixo padrão rodoviário com as considerações apresentadas na Figura 32.

Figura 32 - Eixo padrão adotado no *software* MeDiNa.



Fonte: Franco e Motta (2020).

A análise no *software* inicia-se com a entrada do arquivo (.csv) contendo as informações das bacias de deflexão obtidas em campo através do ensaio FWD. No caso em que o ensaio de campo foi realizado com a VB, deve-se realizar a conversão dos resultados para o formato de dados do ensaio FWD (FRANCO; MOTTA, 2020).

Na sequência é preciso informar as camadas de pavimentação que irão compor sua estrutura, podendo ser elas: camadas asfálticas, estabilizadas, granulares ou em solos naturais e o subleito. Ao preencher no *software* as informações quanto as camadas (espessura, inferência inicial do módulo e coeficiente de Poisson), ele preenche automaticamente a condição de aderência para cada uma delas, sendo as condições pré-estabelecidas apresentadas na Tabela 11 (FRANCO; MOTTA, 2020). Essas condições devem ser respeitadas para que a retroanálise possa ser reconhecida pelo *software*.

Tabela 11 - Condições de aderência consideradas no BackMeDiNa e AEMC.

Camada	Condição
Camada asfáltica sobre outra camada asfáltica	Aderida
Camada asfáltica sobre camadas estabilizadas	Não aderida
Camada asfáltica sobre camadas de solos ou granulares	Não aderida
Camada estabilizada sobre outra camada estabilizada	Não aderida
Camada estabilizada sobre camadas de solos ou granulares	Não aderida
Camadas de solos ou granulares sobre camadas asfálticas, cimentadas, de solos ou granulares	Não aderida

Fonte: Franco e Motta (2020).

O critério de cálculo que o programa utiliza para condição de aderência é relacionado às Equações 17 e 18, onde faz uma modelagem física similar a teoria das molas, permitindo o movimento horizontal relativo na interface entre duas camadas, sendo que a mola atua na direção radial resistindo ao deslocamento relativo ao longo da interface entre as duas camadas (FRANCO; MOTTA, 2020).

$$\tau_i = k_i * (u_i - u_{i+1}) \quad (17)$$

Sendo:

$$k_i = \frac{l_i}{1 - l_i} \quad (18)$$

Onde:

τ_i = tensão de cisalhamento radial entre as camadas i e i+1;

$u_i - u_{i+1}$ = deslocamento radial relativo ao longo da interface das camadas i e i+1;

k_i = módulo de rigidez da “mola” que resiste ao deslocamento radial relativo ao longo da interface;

l_i = igual a “0”, para condição “não aderida” ou igual a “1” para a condição “aderida”.

Já o critério de cálculo adotado para a obtenção dos módulos de resiliência das camadas, considerando os materiais elásticos lineares, quando o usuário atribui a condição linear, o programa leva em conta apenas o valor inferido para o módulo, sem a análise de outros coeficientes e constantes.

A inferência do módulo, se tratando de materiais conhecidos, pode ser através de “módulos sementes” que permitem otimizar os resultados obtidos. O *software* BackMeDiNa já traz módulos padrões, sendo 5000 MPa para camada asfáltica, 400 MPa para base de brita graduada simples (BGS), 400 MPa para sub-base de macadame seco e 150 MPa para o subleito. Porém, tais valores podem ser alterados pelo projetista, de forma a facilitar a convergência para a solução final, reduzindo as iterações necessárias para obter os resultados calculados pelo programa, agilizando o tempo de processamento (CORREIA, 2017).

Após o preenchimento de todos os dados inicia-se a retroanálise e o *software* BackMeDiNa começa o cálculo automático em busca do menor erro quadrático médio com auxílio da rotina AEMC. O programa inicia o cálculo com o módulo inferido pelo usuário e vai variando o valor conforme o erro encontrado na retroanálise, sendo que para erros elevados a faixa de variação é de 50% do valor indicado para o módulo (para maior e menor) e para erros menores essa faixa de variação cai para 10% (FRANCO; MOTTA, 2020).

Para todo processo iterativo de retroanálise é necessário estabelecer um critério de parada, ou seja, o momento em que o ajuste entre as bacias de campo e

retroanalizadas seja satisfatório. Neste caso, o BackMeDiNa adota a Raiz Média Quadrática (RMS), e busca o menor erro quadrático médio. O RMS é calculado a partir das diferenças encontradas entre as deflexões calculadas e medidas, conforme a Equação 19, e quando atinge 5% o programa entende que houve uma boa relação e retorna a resposta (FRANCO; MOTTA, 2020).

$$Erro (RMS\%) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(100 * \frac{d_{calc} - d_{medido}}{d_{medido}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Onde:

Erro (RMS) = erro da Raiz Média Quadrática, deve ser < 5%;

d_{calc} = deflexão calculada pelo *software*;

d_{medido} = deflexão medida em campo.

Como critério de parada, o *software* indica em cor verde os erros menores que 5 % (boa correlação), em cor amarela erros entre 5 e 10 % (correlação razoável) e cor vermelha quando a correlação encontrada não é satisfatória (FRANCO; MOTTA, 2020).

Dessa forma, o usuário deve realizar tantas iterações quanto necessárias até a estabilização do erro calculado pelo programa, além de considerar no critério de parada as faixas usuais consideradas para os módulos das camadas em estudo (CAMARINI; JUNIOR; FONTENELE, 2019).

Esta pesquisa utilizará como critério o menor erro possível, entendendo que este trará os melhores resultados.

Sendo assim, através desse método é possível a obtenção dos resultados de módulos resilientes equivalentes, tensões, deformações e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura sem a necessidade de aplicação do MEF (FRANCO; MOTTA, 2020). E conforme apresentado por Knabben e Carpio (2020), os resultados obtidos das análises do *software* são utilizados para prever o comportamento da estrutura durante sua vida útil e garantir seu bom desempenho quanto aos problemas relacionados ao trincamento do revestimento por fadiga e à deformação permanente.

2.2.3 Retroanálise com o software BAKFAA

O BAKFAA é um *software* clássico em linguagem *Visual Basic* utilizado para auxiliar a retroanálise de bacias deflectométricas e disponibilizado gratuitamente pela *Federal Aviation Administration* (FAA). A escolha dessa opção para confrontar os resultados do BackMeDiNa, foi devido ser um *software* utilizado internacionalmente, além da facilidade na operação e a necessidade de entrada dos mesmos dados do BackMeDiNa.

Os parâmetros de entrada solicitados pelo *software* são as espessuras das camadas, posição das leituras, raio de aplicação da carga, coeficiente de Poisson, módulos sementes, deflexões medidas em campo, condições de aderência entre as camadas e magnitude do carregamento aplicado, conforme resumido na Tabela 12 e na Tabela 13.

Tabela 12 - Variáveis presente no BAKFAA.

Variável	Unidade - <i>english</i>	Unidade - <i>metric</i>
Espessuras e distâncias	in	mm
Raio de carregamento	in	mm
Deslocamento	mil	μm
Pressão de inflação e tensões	PSI	MPa
Carga de eixo ou de roda	lb	kN
Erro quadrático médio (RMS)	mil	μm

Fonte: A autora (2022).

Tabela 13 - Condições de aderência consideradas no BAKFAA.

Camada	Coefficiente <i>Interface parameter</i>
Camadas aderidas	1,0
Camadas não aderidas	0,0
Camadas parcialmente aderidas	0,5
*podem ser utilizados valores entre 0 e 1 para diferentes aderências	

Fonte: A autora (2022).

Vieira (2020) também utilizou esse *software* em suas retroanálises e ressaltou que, assim como o BackMeDiNa, o BAKFAA também foi desenvolvido para entrada de dados de ensaios FWD, motivo pela qual pode-se aplicar as mesmas

considerações da metodologia para adaptação das cargas do ensaio VB propostas por Theisen *et al.* (2009).

Uma diferença apontada em relação ao BackMeDiNa é a quantidade de sensores que ele permite entrada de valores, enquanto o BackMeDiNa permite informação de nove sensores, o BAKFAA dispõe de apenas sete (VIEIRA, 2020).

Conforme USDOT (2011) *apud* Bueno (2016), as deflexões retroanalizadas dentro do *software* solicitam a sub-rotina do programa LEAF (também desenvolvido pela FAA) juntamente com um método numérico de minimização multidimensional. Este último refere-se a soma dos quadrados das diferenças entre os desvios das bacias retrocalculadas pela TSCE e as medidas em campo, ou seja, o critério de parada segue o erro RMS de valor absoluto.

Apesar desta pesquisa almejar o menor erro possível, conforme já mencionado na seção sobre o BackMeDiNa, vale ressaltar que, conforme apresentado por Bueno (2016), o critério de parada com base em RMS muito reduzido pode trazer valores de módulos não compatíveis com a realidade. O autor sugere como critério de parada, os valores mínimos dos erros apresentados na Tabela 14, que se refere a diferença entre a bacia medida em campo e a bacia calculada, sendo o resultado dividido pela bacia de campo e a porcentagem encontrada tem uma tolerância maior conforme afasta-se do ponto de aplicação da carga.

Tabela 14 - Critérios de erros admissíveis.

Distância do ponto de aplicação de carga (mm)	Erro admissível (%)
0	10
200	10
300	10
450	10
600	20
900	20
1200	50

Fonte: Bueno (2016).

Sendo assim, como resultado desses dois *softwares*, obtém-se os módulos resilientes equivalentes, tensões, deformações e deslocamentos das camadas pavimento.

2.3 SOLUÇÃO NUMÉRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

2.3.1 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo determinar o estado de tensão e de deformação para um sólido de geometria qualquer que esteja sujeito à ações exteriores (AZEVEDO, 2003). O MEF ganhou destaque na década de 60 quando o uso do computador para a análise de estruturas se tornou mais comum. Esta nova realidade permitiu que estruturas com geometrias arbitrárias, com os mais diversos materiais e carregamentos pudessem ser rapidamente analisadas, quando comparadas aos métodos anteriores (COOK *et al.*, 2002).

O método permite a análise de tensões e deformações com base em deslocamentos, modelos de equilíbrio, métodos híbridos e mistos (COOK *et al.*, 2002), sendo que a presente pesquisa irá considerar o MEF relacionado aos deslocamentos nodais com a aplicação da teoria da elasticidade.

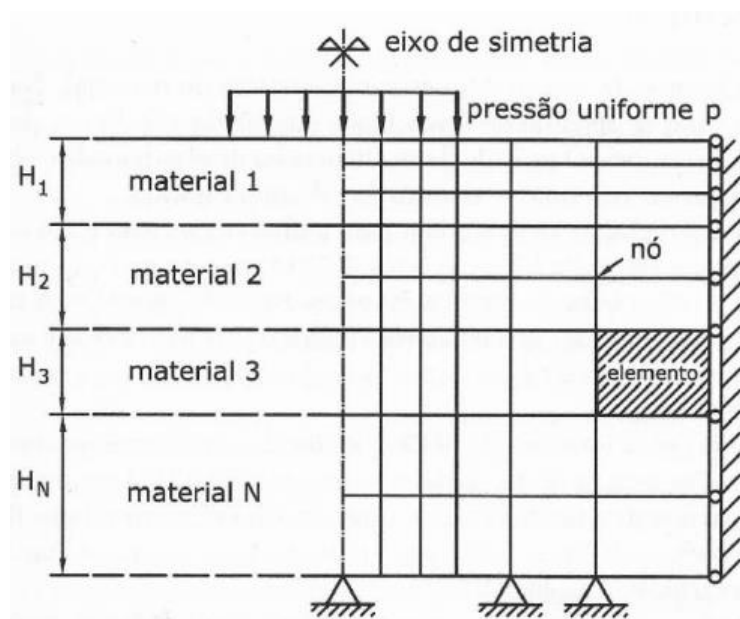
De acordo com Assan (2010), o método dos elementos finitos é baseado no método Rayleigh-Ritz e de Galerkin, que prevê a divisão do sistema de análise em pequenas regiões, chamadas de elementos finitos, transformando o meio contínuo em um meio discreto de análises. É no domínio discreto que se encontra a solução global para o problema, uma vez que, o meio contínuo é dividido em números finitos de elementos com finitos graus de liberdade gerando um sistema equivalente menor e discreto.

Medina e Motta (2015) afirmam que a aplicação do MEF resulta na divisão da estrutura em elementos fictícios, chamados de malha, como o exemplo da Figura 33. A malha formada pode ser aumentada ou diminuída, alterando o tamanho de cada elemento finito. Os pontos de interseção das linhas das redes são chamados de nós, ou seja, o ponto de união entre dois ou mais elementos adjacentes, semelhantes às articulações sem atrito (ASSAN, 2010).

A solução encontrada para cada subdomínio (elemento finito) e o seu comportamento pode ser definido em função dos seus nós. Cada elemento possui uma condição de deslocamento e tensões, que através do sistema de equações de equilíbrio definem as incógnitas pertinentes ao sistema (SORIANO; LIMA, 2004).

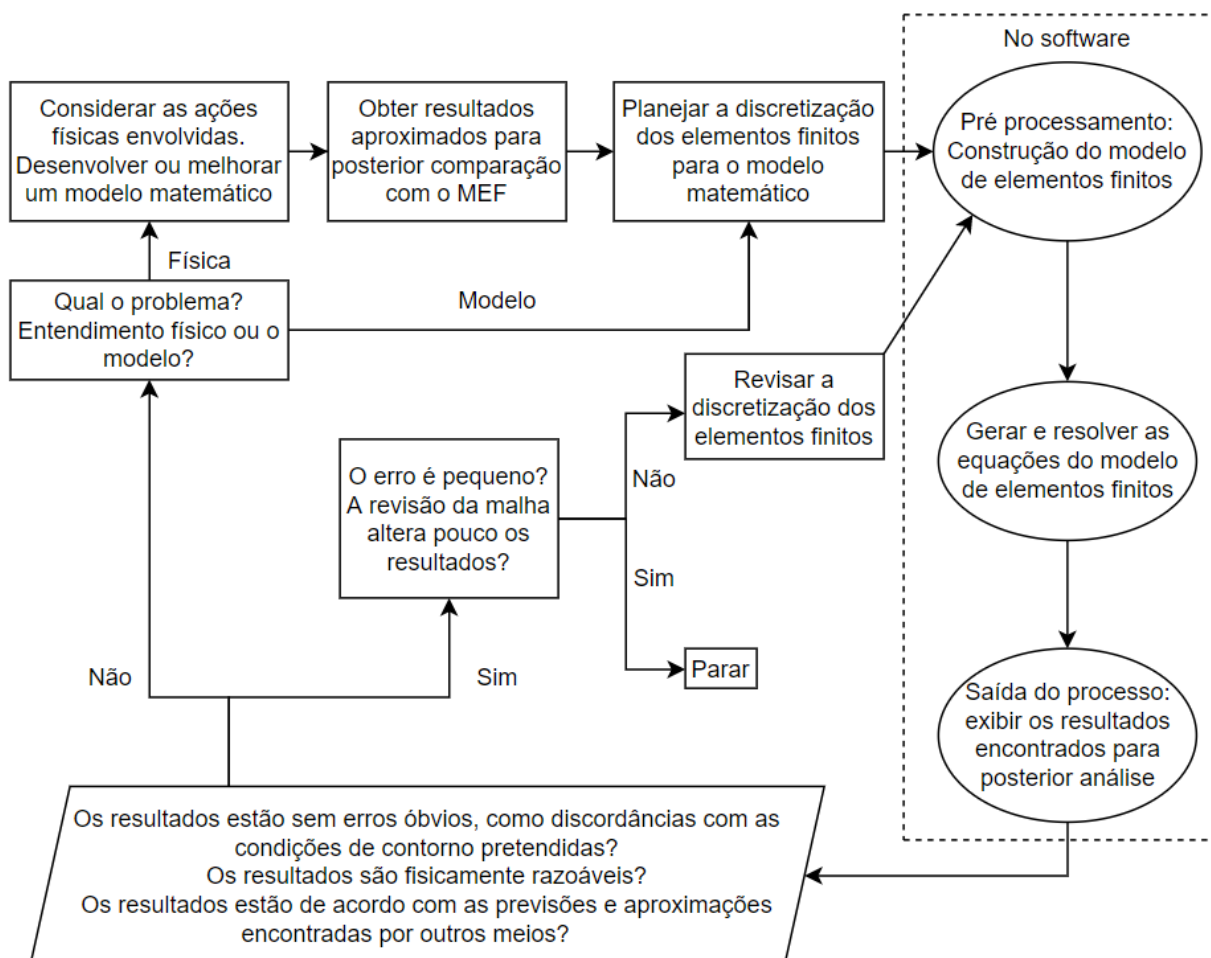
Em geral, o fluxograma da Figura 34 ilustra os passos para análise de um projeto com o uso de elementos finitos.

Figura 33 - Elementos finitos de uma estrutura estratificada.



Fonte: Medina e Motta (2015).

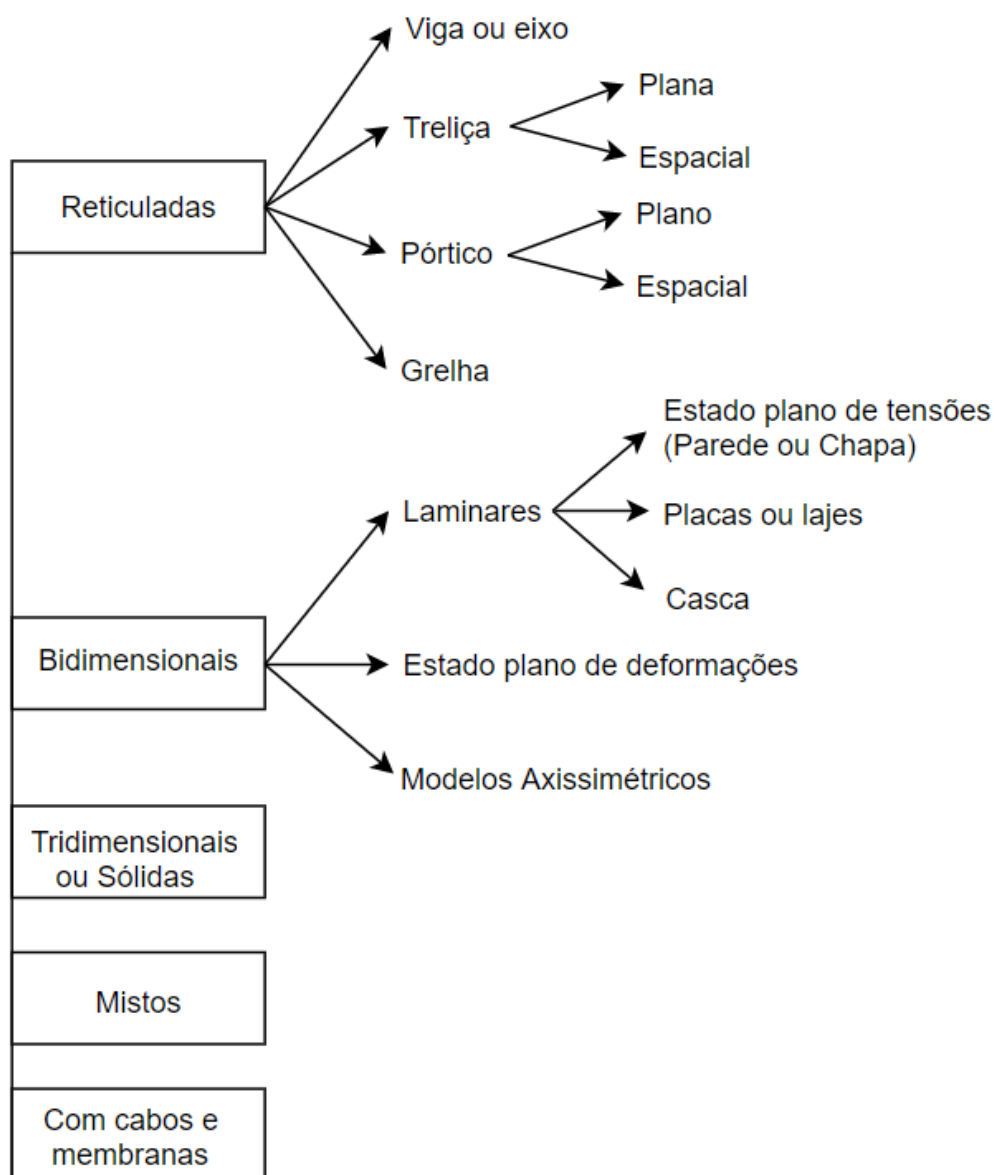
Figura 34 - Fluxograma de análise de um projeto com o uso de elementos finitos.



Fonte: Adaptado de Cook (2002).

Ao iniciar a análise de uma estrutura, deve-se considerar a sua classificação quanto a geometria, modelo do material que a constitui e as ações aplicadas (AZEVEDO, 2003). Quanto à geometria, a estrutura pode ser classificada conforme a Figura 35, ou seja, estruturas reticuladas, bidimensionais, tridimensionais ou sólidas, mistas e com cabos e membranas.

Figura 35 - Resumo - Análise da geometria da estrutura.



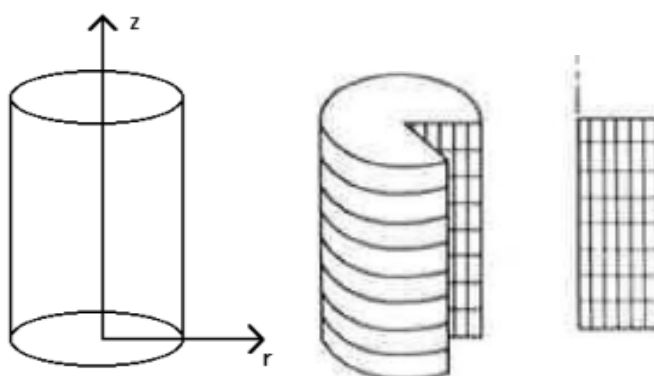
Fonte: A autora (2021).

Esta pesquisa terá como foco as estruturas de geometria bidimensionais. Entre elas existem as laminares, por exemplo, uma superfície plana cuja espessura é muito inferior ao restante das dimensões. Também o estado plano de deformações, ou seja,

uma estrutura onde as deformações segundo um dos eixos podem ser consideradas nulas, por exemplo, estruturas alongadas em uma direção e carregamentos atuantes nas demais direções (AZEVEDO, 2003).

E ainda as estruturas bidimensionais axissimétricas 2D, que serão utilizadas na presente pesquisa. Conforme exposto por Azevedo (2003), os modelos axissimétricos configuram uma estrutura de um sólido em revolução e todas as ações são axissimétricas em relação ao mesmo eixo (Figura 36).

Figura 36 - Modelo axissimétrico.



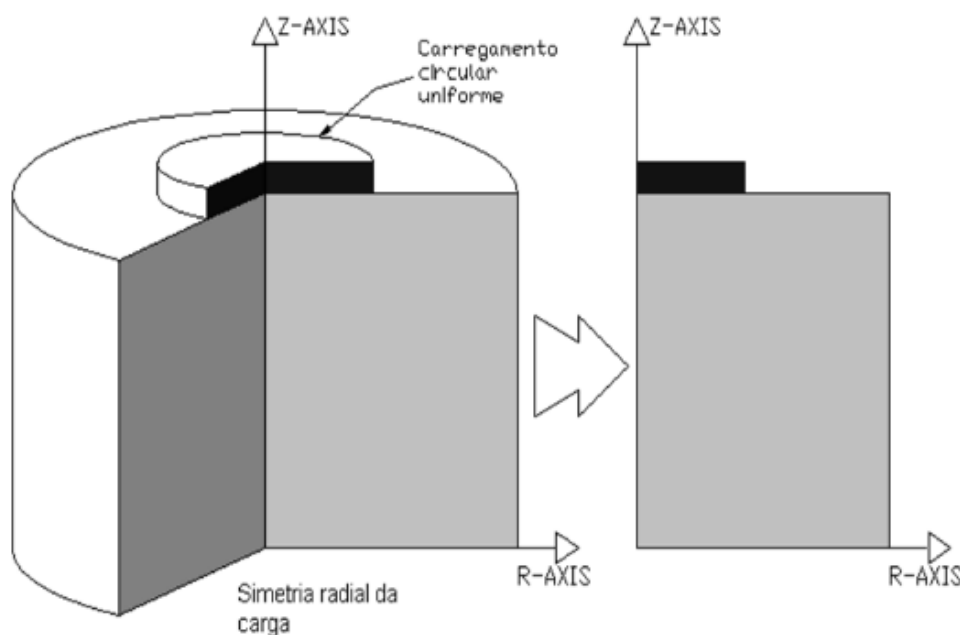
Fonte: Adaptado de Duncan *et al.* (1968) e Ponte (2007).

Nada mais é do que um corpo tridimensional que é desenvolvido pela rotação de uma seção plana sobre o eixo central. Este elemento pode apresentar várias formas de seção transversal, mas sendo as cargas axissimétricas, pode-se reduzir sua análise a representação de uma seção bidimensional (AZEVEDO, 2003).

Theisen *et al.* (2009) utilizaram a estrutura axissimétrica 2D em suas análises, e explicam que essa simplificação é possível também na retroanálise de pavimentos, uma vez que, o carregamento FWD é assumido como uma placa circular de pressão constante na superfície do pavimento, implicando respostas estruturais iguais em qualquer ponto distante de um raio “r” do eixo “z” na estrutura, permitindo a redução de um problema tridimensional para bidimensional, conforme Figura 37.

Para representação das estruturas, deve ser realizado o desenho da geometria retangular com as ferramentas fornecidas pelos *softwares*. Os comprimentos vertical e horizontal do modelo devem ser selecionados de tal forma que a influência da área de carregamento se torne insignificante em uma região de campo distante (TAREFDER; AHMED, 2014).

Figura 37 - Simplificação para um modelo bidimensional axissimétrico 2D.



Fonte: Theisen *et al.* (2009)

Algumas soluções de geometria verificadas na literatura são apresentadas na Tabela 15 e referenciam autores que também realizaram a consideração da estrutura de um pavimento como um modelo axissimétrico 2D em suas pesquisas e obtiveram resultados satisfatórios para tais.

A presente pesquisa irá utilizar o modelo de Tarefder e Ahmed (2014), também utilizado por Hamim *et al.* (2018) na análise de bacias de deflexão.

Tabela 15 - Modelos de geometria propostas da literatura.

Autores	O que estudou	Tipo pavimento	Número camada	Geometria axissimétrica
Duncan <i>et al.</i> (1968)	Aplicação do MEF na análise de sistemas representativos de estruturas de pavimentos	Rodoviário	3	12 x raio de carregamento (horizontal) 50 x raio de carregamento (vertical)
Silva (1995)	Contribuição para estudos em pavimentos flexíveis programa FEPAV2	Rodoviário	4	20 x raio de carregamento (horizontal) 45 a 50 x raio de carregamento (vertical)

Autores	O que estudou	Tipo pavimento	Número camada	Geometria axissimétrica
Aedo (1997)	Programa para análise tridimensional de pavimentos asfálticos	Rodoviário	3	18 x raio de carregamento (horizontal) 36 x raio de carregamento (vertical)
Franco (2004)	Versão da macro de Excel desenvolvida para o programa FEPAVE	Rodoviário	4	20 x raio de carregamento (horizontal) 45 a 50 x raio de carregamento (vertical)
Ceylan <i>et al.</i> (2005)	Redes neurais artificiais para previsão das respostas dos pavimentos flexíveis	Rodoviário	-	12 x raio de carregamento (horizontal) 50 x raio de carregamento (vertical)
Holanda <i>et al.</i> (2006)	Técnicas de modelagem MEF para pavimentos flexíveis utilizando Programação Orientada a Objetos	Rodoviário	3	14 x raio de carregamento (horizontal) 20 x raio de carregamento (vertical)
Kim, Tutumluer e Kwon (2009)	Análise da fundação de pavimentos flexíveis através do MEF com geometrias 3D e axissimétrica	Rodoviário	4	20 x raio de carregamento (horizontal) 140 x raio de carregamento (vertical)
Gopala-krishnan (2010)	Utilização de redes neurais com algoritmo híbrido não linear por inteligência de enxame para a retroanálise de pavimentos	Rodoviário	3	Conforme Raad e Figueroa (1980) que se baseiam em Duncan <i>et al.</i> (1968)
Ghadimi <i>et al.</i> (2013)	Modelagem numérica dos materiais granulares do pavimento	Rodoviário	3	55,55 x raio de carregamento (horizontal) 166,7 x raio de carregamento (vertical)
Tang e Yang (2013)	Análise através do MEF e algoritmos genéticos	Rodoviário	3	0,43 metros de raio (horizontal) 1,27 metros de profundidade (vertical)

Autores	O que estudou	Tipo pavimento	Número camada	Geometria axissimétrica
Tarefder e Ahmed (2014)	Modelagem das bacias deflectométricas através do FWD para pavimentos de aeroportos	Aeroportuário	3	5,08 metros de raio (horizontal) 5,08 metros de profundidade (vertical) ou 33,33 x Raio de carregamento
Hamim <i>et al.</i> (2018)	Estudo comparativo com o uso de MEF estáticos e dinâmicos para análise de medidas FWD em pavimentos flexíveis	Rodoviário	4	Conforme Tarefder e Ahmed (2014) 5,00 metros de raio (horizontal) 5,00 metros de profundidade (vertical)
Rabbi e Mishra (2019)	Uso de parâmetros da bacia de deflexão para avaliar o nível de serviço da rodovia	Rodoviário	3	4,00 metros de raio (horizontal) 4,00 metros de profundidade (vertical) *ajustado com incrementos
Wang <i>et al.</i> (2020)	Previsão das respostas de deflexões superficiais do pavimento de um aeródromo com um modelo tradicional e através de redes neurais artificiais	Aeródromo	4	2,5 metros de raio (horizontal) 8 metros de profundidade (vertical)
Deng <i>et al.</i> (2021)	Modelo de elementos finitos baseado e inteligência artificial	Rodoviário	3	7,62 metros de raio (horizontal) 2,03 metros de profundidade (vertical)

Fonte: A autora (2022).

O próximo ponto de análise é quanto ao modelo ser analisado como estático ou dinâmico.

As análises dinâmicas são classificadas em três grupos. A análise modal consiste em buscar os modos e frequências fundamentais de vibração de uma estrutura, com foco em verificar seu comportamento estrutural, sem buscar variações temporais de deslocamentos. A análise para resposta no tempo, reproduz a variação dos deslocamentos ao longo do tempo em uma estrutura submetida às forças variáveis ou às condições iniciais. Por fim, a análise de vibrações randômicas estuda o comportamento de uma estrutura sujeita à vibrações de origem aleatória (TORII, 2012).

As ações sobre as estruturas, em geral, são dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações de cada um dos componentes. Contudo, em muitas situações é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezíveis as forças de inércia, podendo considerar a análise estática. Com a análise estática é possível verificar o comportamento da estrutura através de parâmetros como tensões, deformações, além de outras informações complementares que forem pertinentes ao modelo (AZEVEDO, 2003).

Tarefder e Ahmed (2014) analisaram as bacias de deflexão através de considerações dinâmicas e estáticas ao modelo e os resultados entre ambas foram muito semelhantes, com as bacias teóricas obtidas pela análise estática se destacando pela proximidade com os resultados das bacias medidas em campo.

Já um estudo comparativo entre os dois tipos de análises foi realizado por Hamim *et al.* (2018), utilizando o método dos elementos finitos para analisar os resultados de um ensaio FWD em uma estrutura de pavimento flexível com a utilização do *software* ANSYS. Os resultados mostraram que a análise dinâmica é melhor para a modelagem, quando comparada a análise estática. A porcentagem de erros das bacias de deflexão teóricas considerando a abordagem dinâmica foram menores.

Devido à complexidade da análise dinâmica e seu alto custo computacional, a análise estática tem sido convencionalmente assumida na prática de retroanálise das propriedades das camadas do pavimento (TANG; YANG, 2013).

A Tabela 16 apresenta as propostas de alguns autores para o tipo de análise, dinâmica ou estática, dos modelos de elementos finitos propostos em suas pesquisas.

Tabela 16 - Tipos de análises propostas da literatura - estática ou dinâmica.

Autores	Tipo de análise
Holanda <i>et al.</i> (2006)	Estática
Kim, Tutumluer e Kwon (2009)	Dinâmica
Picoux <i>et al.</i> (2009)	Dinâmica
Ghadimi <i>et al.</i> (2013)	Estática
Tang e Yang (2013)	Dinâmica e estática (melhor)
Tarefder e Ahmed (2014)	Dinâmica e estática (melhor)
Hamim <i>et al.</i> (2018)	Dinâmica transitória (melhor) e estática
Wang <i>et al.</i> (2020)	Dinâmica
Deng <i>et al.</i> (2021)	Dinâmica estacionária
Jiang <i>et al.</i> (2022)	Dinâmica

Fonte: A autora (2022).

A pesquisa irá estudar a magnitude das diferenças das bacias de deflexão simuladas numericamente, quando comparados os modelos estáticos e dinâmicos.

Por fim, define-se a análise quanto ao comportamento dos materiais, linear ou não linear elástico.

O pavimento é composto por materiais diferentes e de propriedades distintas, sendo que estes podem apresentar comportamentos: elásticos lineares e não lineares, viscoelásticos e plásticos. Sendo assim, a definição do seu comportamento estrutural é difícil de prever (YASSENN *et al.*, 2015).

Ao analisar uma estrutura sólida é comum considerar que os deslocamentos oriundos das ações externas são muito pequenos quando comparados as dimensões de todos os componentes da estrutura. Neste cenário, pode-se admitir que, ao modificar a geometria da estrutura, não há alteração na distribuição dos esforços e tensões, considerando a geometria indeformada. Caso esta hipótese não seja considerada, a análise é não linear (AZEVEDO, 2003).

Quando é voltada a análise para o material que forma a estrutura, a relação entre as tensões e deformações pode ser entendida como linear. Quando não adotada essa simplificação, a necessidade de algoritmos para auxiliar os cálculos será necessária (AZEVEDO, 2003).

Hadi e Bodhinayake (2003) utilizaram o *software* Abaqus para simular a aplicação de cargas estáticas e cíclicas a uma estrutura de pavimento flexível, considerando a estrutura com propriedades lineares e não lineares. Os resultados obtidos indicaram que os deslocamentos cíclicos quando adotados materiais não lineares são mais próximos das deflexões obtidas em campo.

Duncan, Monismith e Wilson (1968) analisando um elemento finito axissimétrico, também aplicado a problemas de pavimentação, obtiveram análises precisas para o comportamento das estruturas ao considerar os materiais com propriedades lineares.

No estudos de Ghadimi *et al.* (2013), foram feitas simulações para um pavimentos composto por materiais granulares. As simulações foram realizadas em diferentes *softwares*, sendo um deles o Abaqus, e buscaram prever a resposta dos materiais à diferentes condições de carregamento, com o objetivo de encontrar o melhor cenário de análises. Os pesquisadores consideraram a hipóteses dos materiais como elásticos lineares e afirmam que para uma representação mais

verdadeira do comportamento das camadas deve ser adotado considerações elastoplásticas não lineares.

Já ao analisar a influência da interação entre as camadas também com o uso do Abaqus, Santos, Assis e Júnior (2019), consideraram todos os estudos considerando o comportamento linear do pavimento.

A utilização de um sistema considerado elástico linear de modelagem para a estrutura de um pavimento com carregamento normal de tráfego, também é defendida por Yassen, Endut e Ishak (2015).

Logo, a definição do comportamento linear ou não linear do elemento finito em estudo, vai depender da necessidade de precisão dos resultados. Um resumo dos comportamentos estudados por alguns autores é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Tipos de análises propostas da literatura.

Autores	Tipo do comportamento considerado na análise dos materiais do pavimento
Duncan <i>et al.</i> (1968)	Linear e não linear elástica
Hadi e Bodhinayake (2003)	Linear e não linear elástica
Ceylan <i>et al.</i> (2005)	Não linear elástica
Holanda <i>et al.</i> (2006)	Linear e não linear elástica / viscoelástica
Kim, Tutumluer e Kwon (2009)	Linear e não linear elástica
Gopalakrishnan (2010)	Linear e não linear elástica
Ghadimi <i>et al.</i> (2013)	Linear elástica
Tang e Yang (2013)	Linear elástica
Tarefder e Ahmed (2014)	Elastoplástica
Yassenn, Endut e Ishak (2015)	Linear elástica
Rabbi e Mishra (2019)	Linear elástica
Hamim <i>et al.</i> (2018)	Não linear elástica
Santos, Assis e Júnior (2019)	Linear elástica
Wang <i>et al.</i> (2020)	Linear elástica
Deng <i>et al.</i> (2021)	Linear elástica e viscoelástica para camada superficial

Fonte: A autora (2022).

2.3.2 Modelagem com o software Abaqus

O programa Abaqus é propriedade da empresa *Dassault Systèmes Simulia* e foi lançado em 1978. O *software* executa a modelagem de elementos finitos em três etapas principais, sendo o pré-processamento acessado através do Abaqus/CAE, o processamento realizado no Abaqus/Standard e Abaqus/Explicit, e o pós

processamento realizado também pelo Abaqus/CAE com o módulo de visualização Abaqus/Viewer. O modelo construído gera um arquivo de entrada que é enviado aos módulos de análises do *software*, permitindo que o usuário monitore o andamento dos trabalhos, e após a conclusão, gera um banco de dados de saída para a análise dos resultados (DASSAULT SYSTÈMES, 2014).

O Abaqus é um programa de análise numérica para aplicações em problemas de engenharia, possui uma extensa biblioteca de elementos capazes de modelar qualquer geometria. O programa possui também uma extensa lista de leis constitutivas que possibilita a simulação do comportamento dos principais materiais utilizados na engenharia, como, por exemplo, materiais geotécnicos, espumas, borracha, concreto reforçado, materiais compósitos e polímeros (APONTE, 2011).

Por se tratar de um programa genérico, a modelagem no Abaqus exige do usuário um número maior de dados em seus ficheiros de entrada (SANTOS, ASSIS; JÚNIOR, 2019).

Santos *et al.* (2019) utilizam o Abaqus em sua pesquisa e mencionam que é um dos programas de uso geral mais empregado quando o foco é a resolução de problemas que envolvam a análise de tensões e deformações, e problemas de transferência de calor com base no MEF. O programa permite estimar o comportamento mecânico das estruturas, atribuir diferentes condições de aderência e modelar os materiais (homogêneos e isotrópicos, por exemplo) com a entrada de dados como o coeficiente de Poisson e o módulo de resiliência.

Os modelos incorporados no Abaqus mostraram prever de forma confiável o comportamento mecânico dinâmico e estático de pavimentos asfálticos da pesquisa de Rabaiotti e Caprez (2006).

Alguns autores que também utilizam o Abaqus com sucesso em suas análises de pavimento são: Hadi e Bodhinayake (2003), Kuo e Chou (2004), Yoo e Al-Qadi (2007), Kim *et al.* (2009), Ghadimi *et al.* (2013), Tang e Yang (2013), Tarefder e Ahmed (2014), Liu *et al.* (2015), Liu *et al.* (2017), Rabbi e Mishra (2019), Wang *et al.* (2019), Ling *et al.* (2019) e Deng *et al.* (2021).

O programa Abaqus/CAE é composto por módulos, que apresentam uma sequência lógica para criação dos modelos. Os módulos e as tarefas desenvolvidas nestes são resumidos a seguir (DASSAULT SYSTÈMES, 2014).

- a) *The Part module*: definição das partes, peças ou da geometria que irá compor o modelo, sendo que nesta pesquisa, o desenho da estrutura axissimétrica do pavimento;
- b) *The Property module*: definição dos materiais e propriedades mecânicas (coeficiente de Poisson, inferência do módulo de resiliência inicial) e atribuição desses materiais a cada uma das partes da geometria;
- c) *The Assembly module*: montagem do modelo, definindo o agrupamento das partes que constituem o modelo (montagem das partes criadas no passo “a”);
- d) *The Step module*: definição da sequência de passos da análise, definição de critérios de controle e especificação dos dados de saída, definição quanto a linearidade ou não do modelo;
- e) *The Interaction module*: definição das interações entre as camadas/partes do modelo, interações mecânicas e térmicas, acoplamentos, restrições de regiões de análise, inércia, molas;
- f) *The Load module*: especificação do carregamento (posição, tipo, magnitude) e das condições de contorno;
- g) *The Mesh module*: definição da malha de elementos finitos, a acurácia da análise dependerá do tamanho da malha, sendo que ela deve ser suficientemente refinada em torno o carregamento;
- h) *The Optimization module*: criação de uma tarefa de otimização do modelo, por exemplo, otimizar a topologia ou a forma de acordo com um conjunto de objetivos e restrições;
- i) *The Job module*: definição de iterações para rodar o programa e interação com outros *softwares*, momento da análise e acompanhamento do progresso, definição do arquivo de entrada de dados.

O arquivo de entrada de dados da etapa de pré-processamento, conforme descrito por Almeida (2019), pode ser dividido em:

- a) *Dados da geometria do modelo*: descrição dos nós, tipos de elementos, conectividades, propriedades dos materiais, condições de contorno e tipo de análise (estática ou dinâmica);
- b) *Dados do histórico de carregamento*: informações da sequência de cargas aplicadas, sendo elas, forças pontuais, de superfície, de corpo, geradas pela variação de temperatura, pressões de fluido, entre outros.

Na próxima etapa, o arquivo dos dados de entrada é submetido ao programa que realizará a simulação numérica, processamento e análise dos dados (Abaqus/*Standard* ou Abaqus/*Explicit*). Neste passo que ocorrerá o maior uso da capacidade computacional para realização de todas as operações matemáticas, podendo ou não convergir para a solução (RANGEL, 2017).

O Abaqus/*Standard* executa a análise com base em métodos implícitos na resolução dos sistemas de equações, indicado para problemas lineares, não lineares simples, com contato e para cargas estáveis e fixas. Já o Abaqus/*Explicit* utiliza métodos explícitos para resolução das equações, indicado para problemas não lineares complexos, com contatos complexos e cargas dinâmicas (RANGEL, 2017; ALMEIDA, 2019).

Na sequência, os dados de saída seguem para o pós-processamento no Abaqus/*Viewer*. São apresentados relatórios da análise de elementos finitos com gráficos e animações do comportamento da estrutura (RANGEL, 2017; ALMEIDA, 2019).

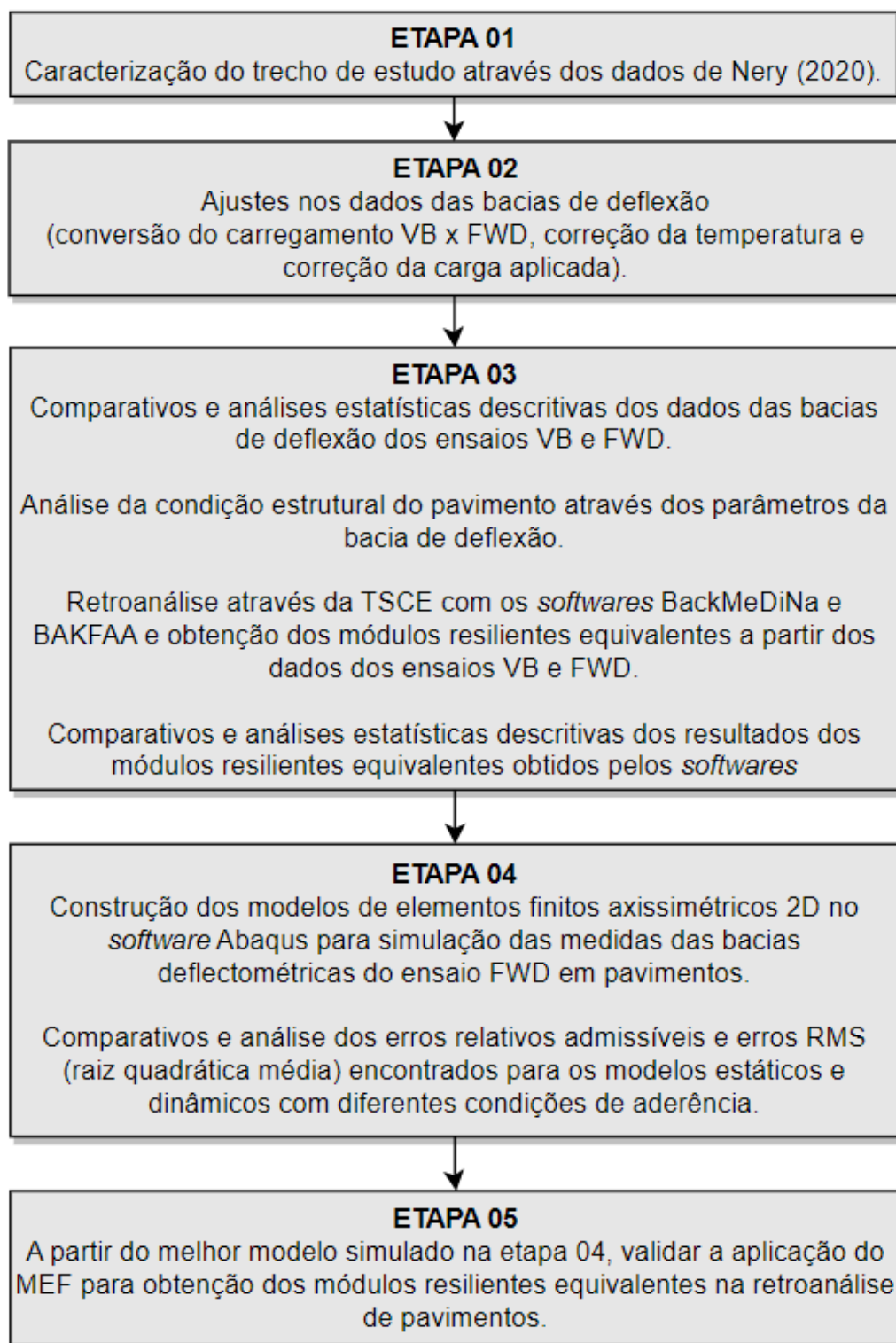
3 METODOLOGIA

Esta pesquisa tem como objetivo principal determinar o melhor modelo de elementos finitos, estático ou dinâmico, para realizar a retroanálise dos módulos resilientes equivalentes das camadas do pavimento. Para isso, foi necessário utilizar dados dos levantamentos defletoométricos com os equipamentos VB e FWD, os quais foram obtidos da pesquisa de Nery (2020) e realizados na Estrada Rio do Morro, localizada na cidade de Joinville/SC.

3.1 ETAPAS DA PESQUISA

A fim de atingir os objetivos da pesquisa, dividiu-se o seu desenvolvimento em cinco etapas principais, as quais estão elencadas no fluxograma da Figura 38.

Figura 38 - Fluxograma - Etapas da pesquisa.

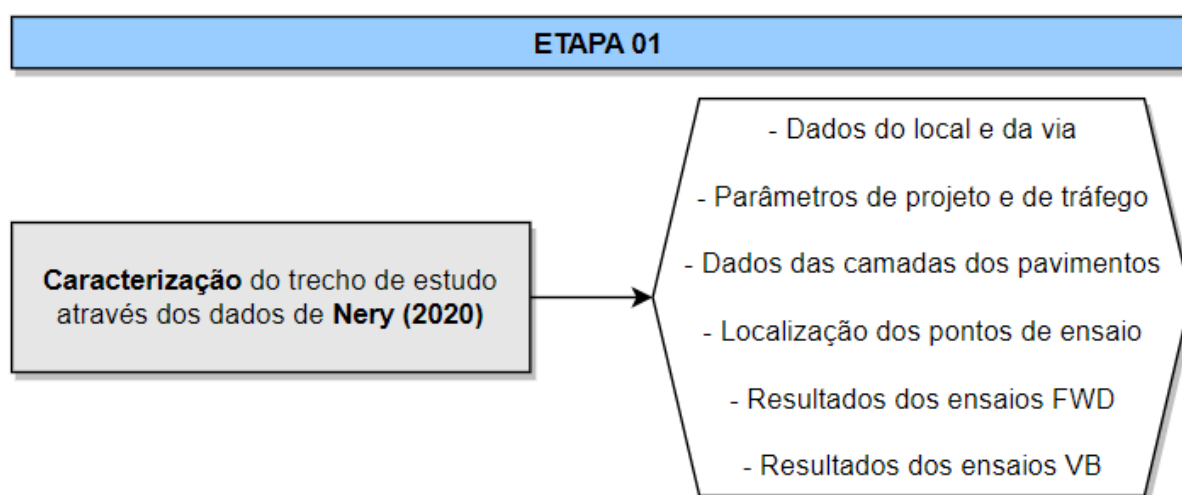


Fonte: A autora (2022).

3.1.1 Etapa 01 - Caracterização do trecho de estudo

Esta etapa apresenta a caracterização do trecho da rodovia a ser utilizado nesta pesquisa, o qual foi obtido através dos dados levantados em campo na pesquisa de Nery (2020), conforme Figura 39.

Figura 39 - Fluxograma - Etapa 01 da pesquisa.

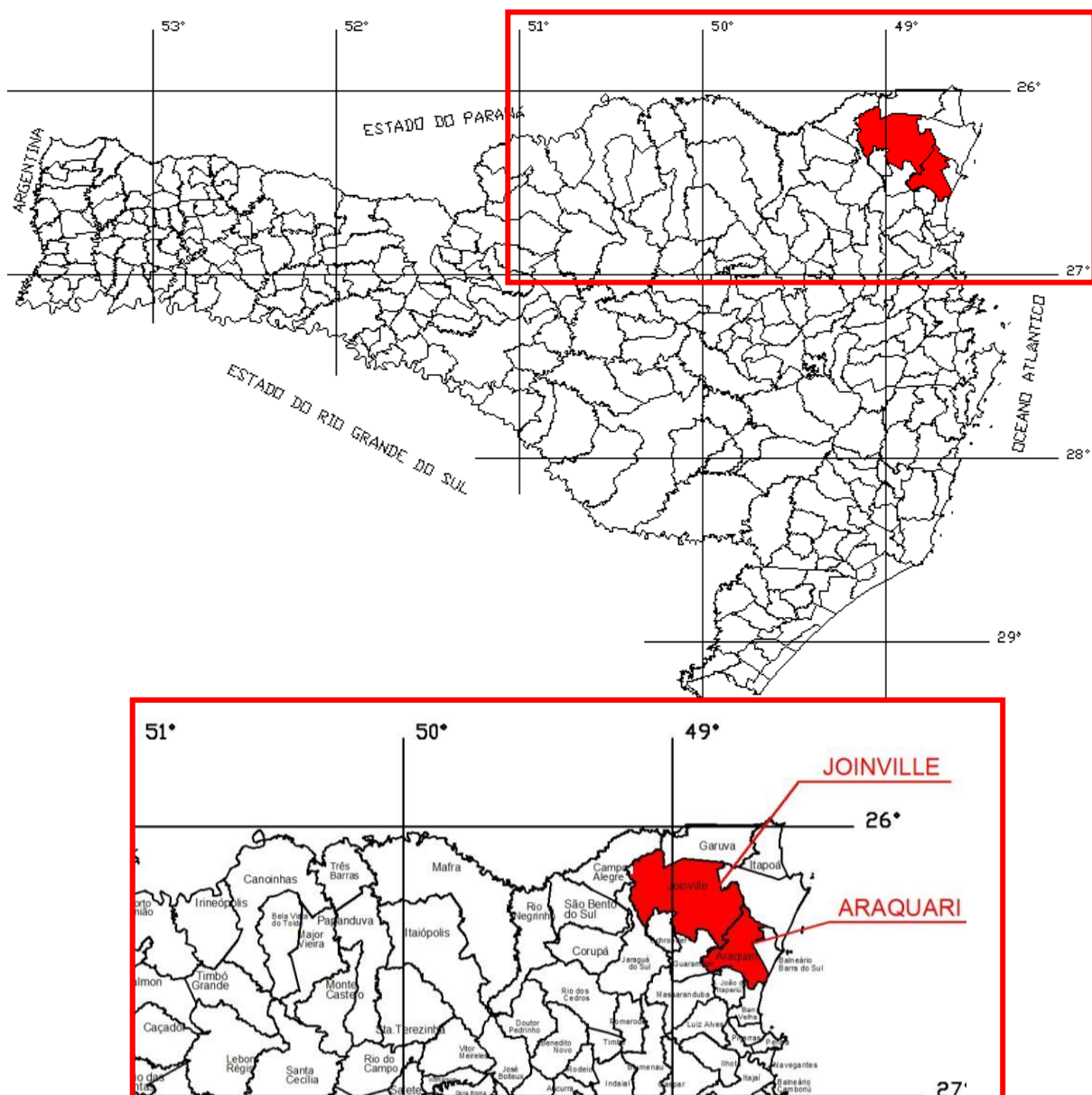


Fonte: A autora (2022).

O trecho está situado no norte do estado de Santa Catarina, entre as cidades de Joinville e Araquari, conforme a Figura 40 e a Figura 41. A Estrada Rio do Morro abrange parte da zona urbana e rural das cidades e seus projetos de execução podem ser obtidos através do setor de arquivo do Departamento Estadual de Infraestrutura - DEINFRA-SC, o que auxilia na obtenção de dados acerca das camadas do pavimento.

A Estrada Rio do Morro é uma rodovia municipal com 9,4 km de extensão com relevo plano e ondulado. Ao verificar a planta de localização da estrada (Figura 42), ela inicia na área urbana no sul da cidade de Joinville (bairro Paranaguamirim - trecho rosa da Figura 42), segue se desenvolvendo predominantemente rural (município de Araquari - trecho vermelho da Figura 42) e tem como ponto final o entroncamento com a BR-280, km 31.

Figura 40 - Estado de Santa Catarina - Cidades de Joinville e Araquari.



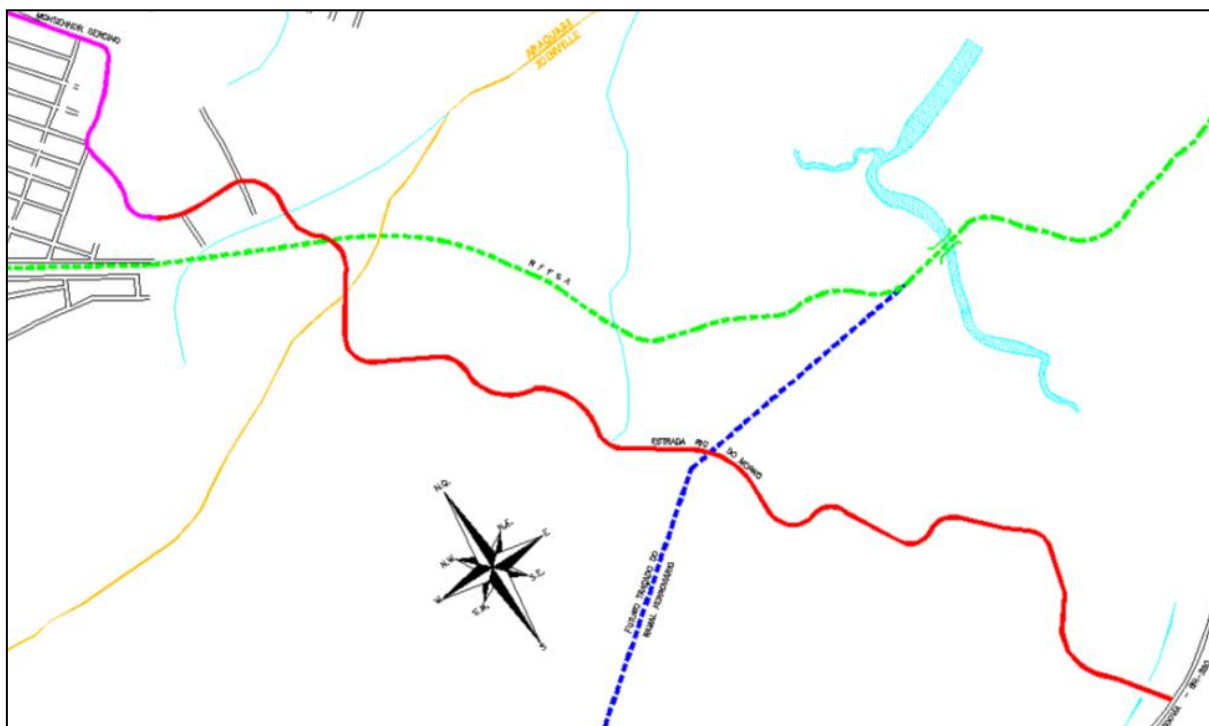
Fonte: Boettcher (2012).

Figura 41 - Rodovia Estrada Rio do Morro - Joinville/Araquari



Fonte: Google Earth (2021).

Figura 42 - Planta de localização da Estrada Rio do Morro.



Fonte: Boettcher (2012).

As obras de pavimentação da rodovia iniciaram em 2013 por uma empresa executora, houve uma pausa entre 2015 e 2018, quando foram retomadas por outra empresa e finalizadas até final de 2019. Os parâmetros da via foram levantados por Nery (2020) com base nos projetos disponibilizados pelo DEINFRA (2009), sendo os principais elencados na Tabela 18.

Tabela 18 - Parâmetros de projeto da rodovia.

Parâmetros	Valores
Velocidade diretriz	60 a 70 km/h
Rampa máxima	3% por 760 m
Pista de rolamento	7,50 m
Acostamento	1,50 m para cada lado da pista
Largura plataforma de terraplanagem	13,00 m
Superelevação	3 a 8%
Tráfego para o período de projeto	$N (USACE) = 2,3 \times 10^6$

Fonte: Adaptado de Nery (2020).

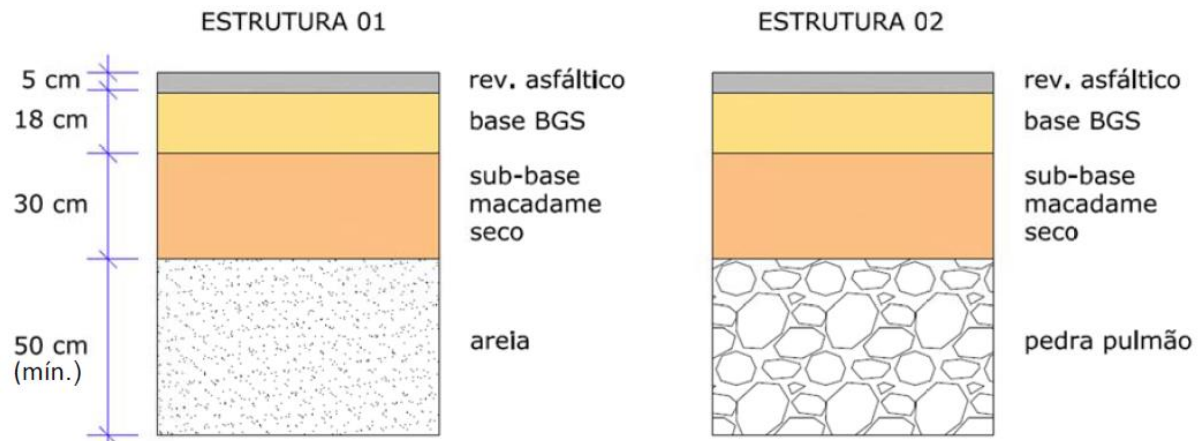
Ainda compilando as informações levantadas nos estudos de Nery (2020), a rodovia não apresenta degradações visíveis e possuiu dois tipos de estrutura de pavimentos, sendo a principal diferença apresentada na camada de reforço, executadas em areia e pedra pulmão. Na Tabela 19 é apresentada a composição das duas estruturas de pavimentos, denominadas estruturas 01 e 02, respectivamente. A representação das camadas do pavimento é ilustrada na Figura 43.

Tabela 19 - Estruturas do pavimento.

Camadas	Estrutura 01	Estrutura 02
Revestimento asfáltico - 5 cm	Mistura de agregados e cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70 convencional, conforme granulometria especificada pela faixa IV do DEINFRA-SC	Mistura de agregados e cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70 convencional, conforme granulometria especificada pela faixa IV do DEINFRA-SC
Base - 18 cm	Brita Graduada Simples	Brita Graduada Simples
Sub-base - 30 cm	Macadame seco	Macadame seco
Reforço - 50 cm	Areia	Pedra pulmão

Fonte: Adaptado de Nery (2020).

Figura 43 - Camadas do pavimento.



Fonte: Nery (2020).

Ao analisar a rodovia em estudo, percebe-se que ela pode ser dividida em seis trechos homogêneos, ou seja, segmentos com características estruturais similares. Nery (2020) utilizou essa estratégia para divisão e locação dos pontos de ensaio FWD e VB realizados em campo, conforme apresentado na Tabela 20 e representado na Figura 44. A divisão levou em consideração o ano de execução do pavimento, composição da camada de reforço e região urbana ou rural.

Tabela 20 - Características dos segmentos homogêneos e pontos de ensaio.

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

Fonte: Adaptado de Nery (2020).

Figura 44 - Segmentos da Estrada Rio do Morro.



Fonte: Nery (2020).

Para o desenvolvimento das etapas metodológicas desta pesquisa, dos seis segmentos ilustrados na Figura 44, serão utilizados somente os segmentos 02 e 04 (apresentados no ANEXO A).

O segmento 04 está em um trecho rural, foi pavimentado em 2019 e possui estrutura de reforço em areia. Como se trata de um pavimento recém-construído, as suas camadas não estavam totalmente consolidadas no momento do levantamento de campo (que aconteceu em 2019).

Já o segmento 02 também está localizado em um trecho rural e possui reforço em areia, porém foi pavimentado em 2014, apresentando as camadas já consolidadas no momento do levantamento de campo.

A pesquisa utiliza 10 pontos de cada um dos trechos para aplicar as etapas da metodologia (Figura 38), sendo que a escolha ocorreu de forma aleatória e sem a consideração dos pontos analisados como *outliers* por Nery (2020) e que poderiam distorcer os resultados. Os *outliers* foram encontrados por Nery (2020) através de tratamentos estatísticos descritivos dos dados de deflexão.

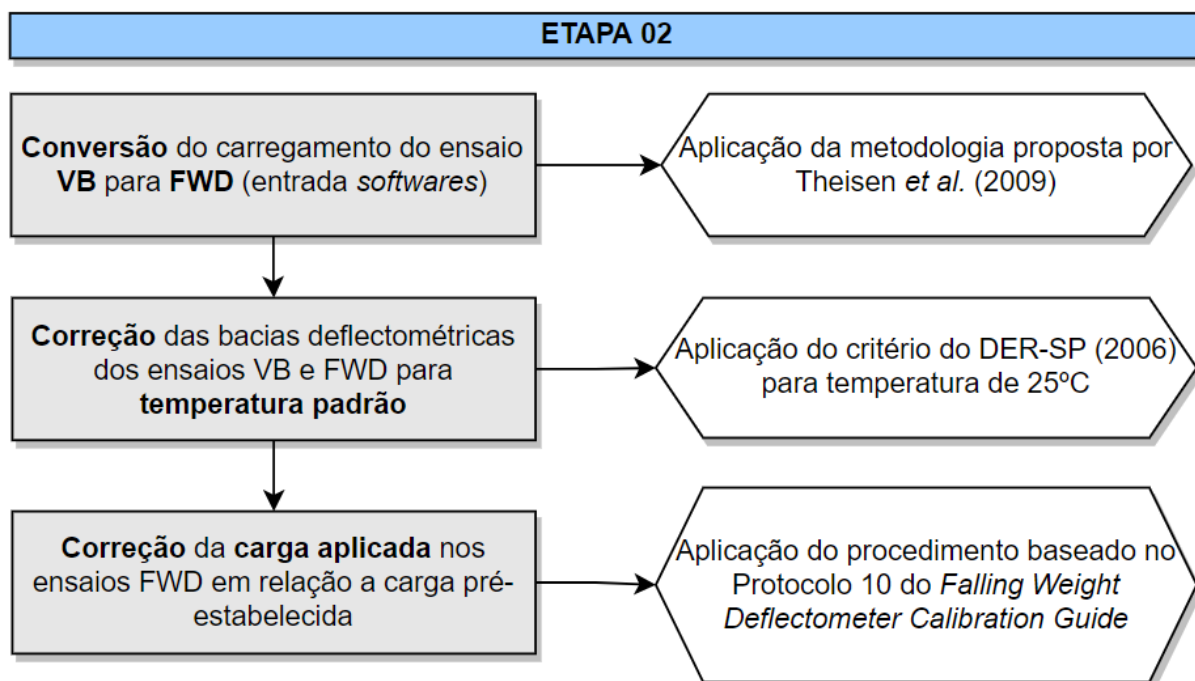
O ANEXO B exibe os dados de campo dos segmentos analisados através da Tabela 44 até a Tabela 48. A Tabela 44 contém os pontos de ensaio e suas localizações geográficas, a Tabela 45 e a Tabela 47 apresentam os resultados dos ensaios FWD e VB para o segmento 02, a Tabela 46 e a Tabela 48, os resultados dos ensaios FWD e VB para o segmento 04. Os ensaios VB e FWD ocorreram nos mesmos pontos, localizados em uma via sem degradações visíveis.

No dia do ensaio FWD (06/06/2019), houve chuva no período da manhã e à tarde estava nublado, precipitação de 2,3 mm, temperatura mínima de 15,08°C e máxima de 22,94°C. Já para os ensaios VB, executados no dia 06/12/2019 a manhã estava nublada e a tarde de sol, 0,5 mm de precipitação, temperatura mínima de 18,89°C e máxima de 26,44°C (NERY, 2020).

3.1.2 Etapa 02 - Ajustes nos dados das bacias de deflexão

Esta etapa apresenta considerações quanto à conversão do carregamento obtido em um ensaio VB para um carregamento FWD, correção para uma temperatura padrão das bacias deflectométricas medidas no ensaio VB e FWD e ajuste no valor da carga aplicada em relação a carga pré-definida. Um resumo das etapas é apresentado na Figura 45.

Figura 45 - Fluxograma - Etapa 02 da pesquisa.



Fonte: A autora (2022).

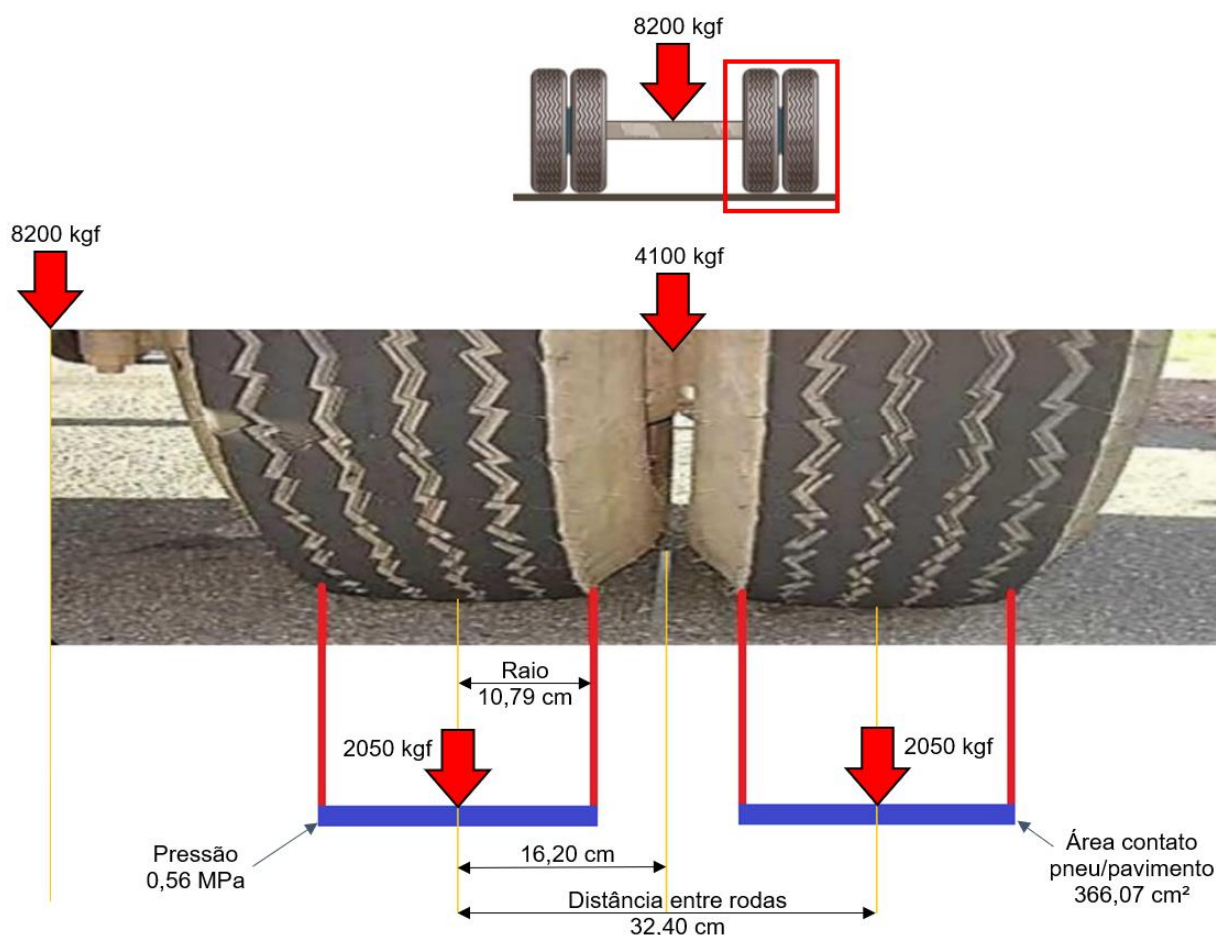
3.1.2.1 Conversão do carregamento do ensaio VB para FWD

Conforme apresentado no capítulo de revisão, o método de adaptação dos carregamentos por áreas equivalentes demonstra ser a solução mais prática para conversão em uma única carga de aplicação. Porém, conforme o exposto, o método não é o mais adequado quando analisado sob a ótica do princípio da sobreposição de efeitos, além de gerar um acréscimo nos módulos de resiliência dos revestimentos.

Os *softwares* utilizados, BackMeDiNa e BAKFAA, foram formulados para entrada de dados de deflexão FWD, dessa forma, a presente pesquisa utiliza a metodologia C2 proposta por Theisein *et al.* (2009) para conversão dos dados da VB, considerando o carregamento efetuado por apenas uma das rodas do semieixo, as deflexões divididas por dois (efeito de apenas uma roda) e as distâncias entre as medidas de deflexão recalculadas conforme a Equação 13 e ilustrado na Figura 17.

O eixo padrão rodoviário adotado nesta pesquisa é ilustrado na Figura 46, com a aplicação da carga de eixo de 8200 kgf, que distribui 4100 kgf para cada par de rodas e 2050 kgf no centro de cada uma das rodas.

Figura 46 - Eixo padrão rodoviário considerado nesta pesquisa.



Fonte: A autora (2022).

A distância entre os centros geométricos das placas carregadas foi adotada igual a 32,4 cm (conforme eixo padrão). Para este último dado, Vieira (2020) utiliza a medida de 29,2 cm e Theisen *et al.* (2009) adota 30 cm. Os resultados para as novas distâncias das deflexões estão na Tabela 21.

Tabela 21 - Distâncias das deflexões VB recalculadas pela metodologia C2.

Posição da leitura VB em campo (cm)	0,00	20,00	30,00	45,00	60,00	90,00	120,00
Adaptação C2 Nova distância Xi (cm)	16,20	25,74	34,09	47,83	62,15	91,45	121,09

Fonte: A autora (2022).

As novas deflexões corrigidas dos segmentos 02 e 04 são apresentadas na Tabela 22 e na Tabela 23, respectivamente.

Tabela 22 - Deflexões VB do segmento 02 ajustadas pela metodologia C2.

Ponto	Deflexão (1 x 10 ⁻³ mm)							Temperatura		Constante
	VB D0	VB D1	VB D2	VB D3	VB D4	VB D5	VB D6	Ar	Pav.	2,056
	16,20 cm	25,74 cm	34,09 cm	47,83 cm	62,15 cm	91,45 cm	121,09 cm	°C	°C	Data
23	205,5	154	133,5	113	92,5	72	51,5	25	29,5	06/12/19
24	205,5	154	123,5	103	82	51,5	41	25	29,5	06/12/19
28	277,5	246,5	216	164,5	144	92,5	72	27,5	33	06/12/19
31	205,5	185	154	113	82	61,5	41	26	31	06/12/19
32	144	113	92,5	72	61,5	51,5	41	24	26	06/12/19
34	133,5	123,5	113	92,5	72	51,5	41	24	27	06/12/19
36	154	113	92,5	82	72	51,5	41	24	28	06/12/19
37	133,5	103	92,5	82	72	31	20,5	23,5	28	06/12/19
39	133,5	123,5	103	82	61,5	41	31	23	26	06/12/19
40	123,5	113	92,5	72	61,5	41	31	23	26	06/12/19
Média	171,6	142,8	121,3	97,6	80,1	54,5	41,1			

Fonte: A autora (2022).

Tabela 23 - Deflexões VB do segmento 04 ajustadas pela metodologia C2.

Ponto	Deflexão (1 x 10 ⁻³ mm)							Temperatura		Constante
	VB D0	VB D1	VB D2	VB D3	VB D4	VB D5	VB D6	Ar	Pav.	2,056
	16,20 cm	25,74 cm	34,09 cm	47,83 cm	62,15 cm	91,45 cm	121,09 cm	°C	°C	Data
50	185	164,5	144	103	61,5	41	31	27	37	06/12/19
51	144	133,5	123,5	92,5	72	41	31	27	37,5	06/12/19
52	164,5	133,5	103	82	61,5	51,5	31	27	38	06/12/19
54	144	133,5	103	82	51,5	31	20,5	27	38	06/12/19
55	164,5	144	103	72	61,5	51,5	31	28	38,5	06/12/19
56	123,5	113	92,5	61,5	41	31	20,5	28	37	06/12/19
57	144	123,5	103	82	61,5	41	31	29	38	06/12/19
59	154	133,5	113	82	61,5	41	41	29	38	06/12/19
62	195,5	175	133,5	113	92,5	61,5	41	26	35,5	06/12/19
70	103	92,5	72	61,5	41	31	20,5	27	37,5	06/12/19
Média	152,2	134,7	109,1	83,2	60,6	42,2	29,9			

Fonte: A autora (2022).

3.1.2.2 Correção das bacias deflectométricas para temperatura padrão

Os revestimentos asfálticos são sensíveis às variações de temperatura, o que pode levar a variações nos resultados encontrados para suas propriedades e desempenho.

Dessa forma, os resultados das bacias de deflexão medidas no trecho em estudo, tanto para os ensaios VB quanto FWD, devem ser corrigidos para uma temperatura padrão. Nesta pesquisa são utilizados os critérios adotados no Brasil, estabelecidos e comprovados pelo DER-SP (2006) e através da formulação proposta por Bueno (2016) na Equação 15.

As iterações realizadas nos *softwares* BackMeDiNa e BAFKAA não consideram cálculos para a correção das bacias de deflexão para uma temperatura padrão, são utilizados os dados de deflexão e carregamento imputados pelo usuário nos cenários de análise.

As etapas para as correções de temperatura seguem a proposta de Bueno *et al.* (2020) conforme os passos apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Correção de temperatura conforme Bueno *et al.* (2020).

Passo	Descrição
01	Utilizar os dados de temperatura de campo sem nenhum tipo de correção das bacias de deflexão e realizar o procedimento de retroanálise dos módulos
02	Registrar os valores dos módulos das camadas de base, sub-base e subleito, que não são materiais termossuscetíveis
03	Realizar a correção das bacias de deflexão para temperatura de 25°C nos pontos D0, D1 e D2, que são leituras representativas à compressão elástica do concreto asfáltico
04	Realizar o procedimento de retroanálise novamente considerando as correções nos pontos D0, D1 e D2 e fixando os demais valores de módulos das camadas granulares e subleito
05	Registrar os valores dos módulos da camada de concreto asfáltico (termossuscetível)

Fonte: A autora (2022).

Assim como realizado na pesquisa de Bueno *et al.* (2020), as correções são efetuadas apenas nas bacias com grandes variações de temperatura, no caso dos seus estudos, temperaturas entre 16°C e 21°C acima da temperatura referência de 25°C.

Na Tabela 25 (dados da VB) e na Tabela 26 (dados do FWD) são registrados os valores das deflexões, corrigidas pela Equação 15, medidas em D0, D1 e D2, que são leituras representativas à compressão elástica do concreto asfáltico, ou seja, sofrem algum tipo de influência das tensões verticais existentes na camada de revestimento asfáltico (passo 03 da Tabela 24).

Tabela 25 - Bacias deflectométricas medidas com a VB (divididas por 2 - método C2) corrigidas para temperatura 25°C nos segmentos 02 e 04.

Segmento 02				Segmento 04			
Deflexão (1×10^{-3} mm)				Deflexão (1×10^{-3} mm)			
Ponto	VB D0	VB D1	VB D2	Ponto	VB D0	VB D1	VB D2
	16,20 cm	25,74 cm	34,09 cm		16,20 cm	25,74 cm	34,09 cm
23	200,98	150,61	130,56	50	174,53	155,19	135,85
24	200,98	150,61	120,78	51	135,53	125,65	116,24
28	266,83	237,02	207,69	52	154,46	125,35	96,71
31	199,51	179,61	149,51	54	135,21	125,35	96,71
32	143,28	112,44	92,04	55	154,10	134,89	96,49
34	132,18	122,28	111,88	56	116,51	106,60	87,26
36	151,72	111,33	91,13	57	135,21	115,96	96,71
37	131,53	101,48	91,13	59	144,60	125,35	106,10
39	132,84	122,89	102,49	62	185,75	166,27	126,84
40	122,89	112,44	92,04	70	96,94	87,06	67,76
Média	168,27	140,07	118,93	Média	143,28	126,77	102,67

Fonte: A autora (2022).

Tabela 26 - Bacias deflectométricas medidas com o FWD corrigidas para temperatura 25°C nos segmentos 02 e 04.

Segmento 02				Segmento 04			
Deflexão (1×10^{-3} mm)				Deflexão (1×10^{-2} mm)			
Ponto	FWD D0	FWD D1	FWD D2	Ponto	FWD D0	FWD D1	FWD D2
	0 cm	20 cm	30 cm		0 cm	20 cm	30 cm
23	316,16	226,26	172,73	50	506,93	335,64	242,57
24	319,19	230,30	175,76	51	445,54	289,11	203,96
28	371,86	281,41	222,11	52	468,32	319,80	239,60
31	325,63	232,16	174,87	54	479,21	316,83	231,68
32	326,63	235,18	180,90	55	485,15	319,80	232,67
34	301,51	221,11	170,85	56	371,14	248,76	183,08
36	355,00	257,00	194,00	57	487,56	345,27	257,71
37	322,00	227,00	168,00	59	492,54	329,35	239,80
39	328,00	230,00	177,00	62	473,63	335,32	245,77
40	316,00	226,00	174,00	70	392,00	272,00	200,00
Média	328,20	236,64	181,02	Média	460,20	311,19	227,69

Fonte: A autora (2022).

A execução dos passos 01, 02, 04 e 05 da Tabela 24 são realizados nas etapas da retroanálise. Essas considerações foram aplicadas no BackMeDiNa e no BAKFAA.

3.1.2.3 Correção da carga FWD aplicada

Os dados de entrada dos *softwares* BackMeDiNa e BAKFAA já consideram o valor da carga aplicada nos cálculos iterativos de retroanálise.

O ajuste pela Equação 16 é necessário apenas para a análise das medidas deflectométricas das bacias nos comparativos dos modelos de elementos finitos, uma vez que, ao construir o modelo é preciso aplicar uma carga padrão (considerada 40kN nesta pesquisa). Dessa forma o ajuste entre a carga aplicada e a carga pré-estabelecida é necessário para uma análise mais assertiva.

O ajuste foi aplicado nas medidas das bacias deflectométricas dos ensaios FWD dos segmentos 02 e 04, que são os valores utilizados como referência para todos os comparativos realizados entre as bacias de campo e as obtidas pelos modelos. Na Tabela 27 (dados do ensaio FWD do segmento 02) e na Tabela 28 (dados do ensaio FWD do segmento 04) são contempladas as bacias corrigidas conforme a Equação 16.

Tabela 27 - Bacias deflectométricas FWD 02 corrigidas para carga 40 kN.

Ponto	Carga (kN)	Fator correção	Deflexão (1×10^{-3} mm)						
			FWD D0 0cm	FWD D1 20cm	FWD D2 30cm	FWD D3 45cm	FWD D4 60cm	FWD D5 90cm	FWD D6 120cm
23	42,18	0,948	296,8	212,4	162,2	114,7	89,1	57,8	44,6
24	41,66	0,960	303,4	218,9	167,1	119,1	92,2	58,6	45,1
28	41,54	0,963	356,3	269,6	212,8	150,2	115,6	73,2	55,8
31	40,34	0,992	321,3	229,1	172,5	112,0	82,3	51,6	39,7
32	42,09	0,950	308,9	222,4	171,1	120,7	93,1	61,8	46,6
34	40,49	0,988	296,4	217,3	167,9	119,5	91,9	59,3	44,5
36	42,21	0,948	336,4	243,5	183,8	125,1	84,3	55,0	38,9
37	40,76	0,981	316,0	222,8	164,9	112,9	85,4	54,0	40,2
39	41,94	0,954	312,8	219,4	168,8	118,3	90,6	59,1	44,8
40	41,69	0,959	303,2	216,8	166,9	117,1	92,1	59,5	46,1
Média			315,1	227,2	173,8	121,0	91,7	59,0	44,6

Fonte: A autora (2022).

Tabela 28 - Bacias deflectométricas FWD 04 corrigidas para carga 40 kN.

Ponto	Carga (kN)	Fator correção	Deflexão (1×10^{-3} mm)						
			FWD D0 0cm	FWD D1 20cm	FWD D2 30cm	FWD D3 45cm	FWD D4 60cm	FWD D5 90cm	FWD D6 120cm
50	41,04	0,975	499,0	330,4	238,8	154,0	113,1	71,2	54,6
51	40,63	0,984	443,0	287,5	202,8	131,9	98,4	64,0	49,2
52	40,26	0,994	469,9	320,9	240,4	156,0	118,2	76,5	60,6
54	40,44	0,989	478,7	316,5	231,5	154,3	111,8	71,2	53,4
55	41,38	0,967	473,7	312,2	227,2	151,8	112,1	71,5	55,1
56	41,28	0,969	361,4	242,2	178,3	115,3	82,4	52,3	38,8
57	41,28	0,969	474,8	336,2	251,0	171,5	129,8	88,2	66,9
59	41,78	0,957	473,9	316,9	230,7	152,2	114,9	75,6	59,4
62	40,37	0,991	471,6	333,9	244,7	163,5	125,8	86,2	66,4
70	40,68	0,983	385,4	267,5	196,7	132,7	98,3	64,9	49,2
Média			453,2	306,4	224,2	148,3	110,5	72,2	55,3

Fonte: A autora (2022).

3.1.3 Etapa 03 - Retroanálise através da TSCE e análise estatística descritiva dos módulos resilientes equivalentes

Inicialmente são realizados comparativos e análises estatísticas descritivas nas medidas de deflexão das bacias obtidas através da VB e do FWD com o intuito de observar as dispersões das medidas de campo, bem como, estabelecer um comparativo entre as bacias geradas por ambos os ensaios.

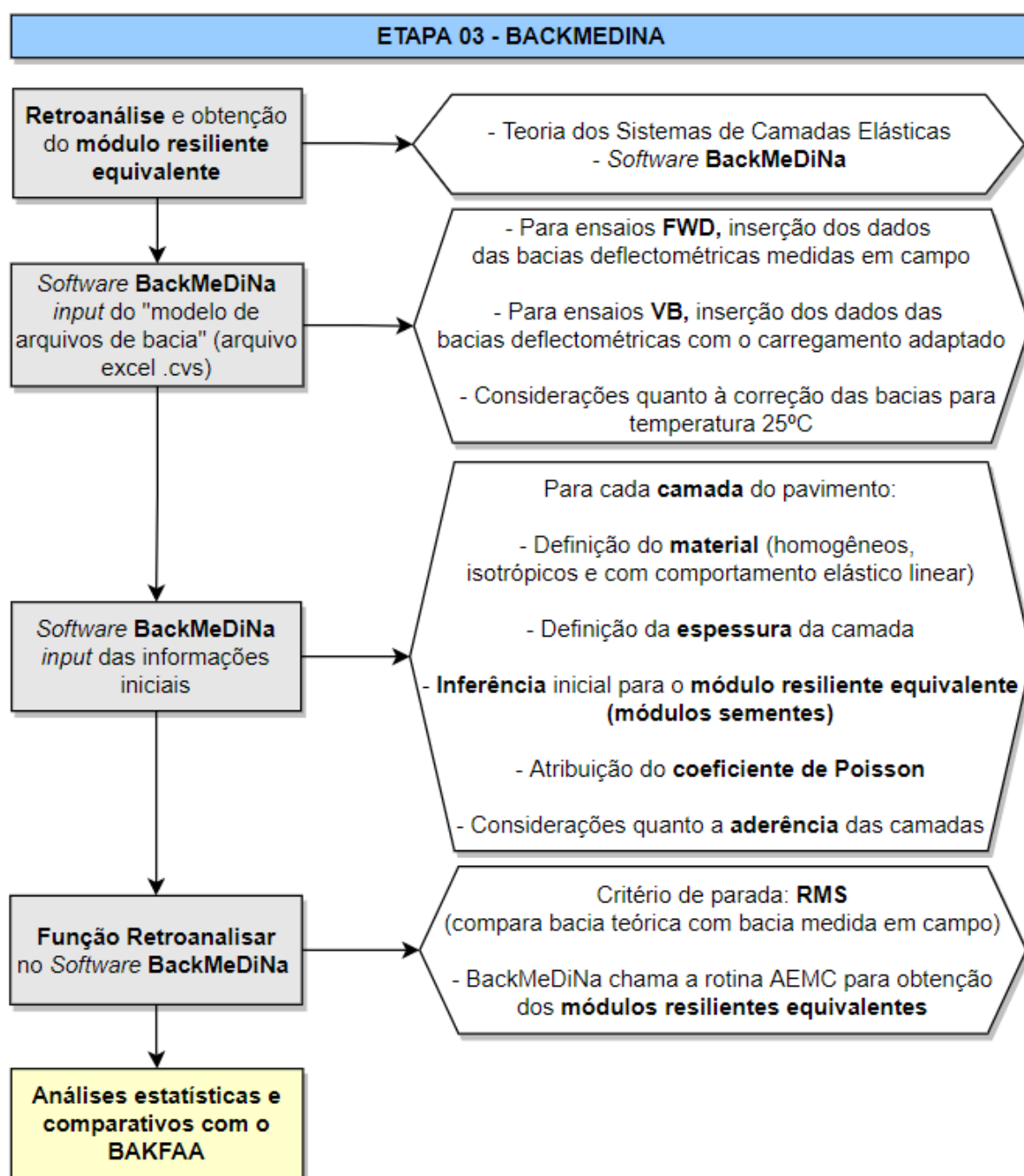
Também será avaliada a condição estrutural do pavimento através da análise dos parâmetros das bacias de deflexão medidas em campo, de forma a contribuir para a interpretação dos módulos resilientes equivalentes retroanalizados. Os parâmetros da bacia aplicados na análise da condição estrutural do pavimento são calculados conforme as Equações 6, 7, 8 e 9 e classificados conforme a Tabela 5, no que diz respeito ao Raio de Curvatura (R_c), Índice de Curvatura da Superfície (SCI), Índice de Danos a Base (BDI) e Índice da Curvatura da Base (BCI).

As retroanálises são realizadas com o *software* brasileiro BackMeDiNa e o *software* BAKFAA com o objetivo de confrontar com os módulos resilientes equivalentes obtidos em ambos os programas de retroanálises e verificar a convergência dos resultados.

3.1.3.1 Retroanálise com o software BackMeDiNa

Esta etapa consiste na retroanálise e obtenção dos módulos resilientes equivalentes através da TSCE com o uso do software BackMeDiNa. Aplicação para os dados dos ensaios VB e FWD, conforme fluxograma da Figura 47.

Figura 47 - Fluxograma - Etapa 03 da pesquisa - BackMeDiNa.



Fonte: A autora (2022).

As bacias deflectométricas medidas em campo através da VB e do FWD são retroanalizadas, de modo a se obter, para cada equipamento, o módulo resiliente equivalente para cada camada dos pavimentos dos dois trechos estudados.

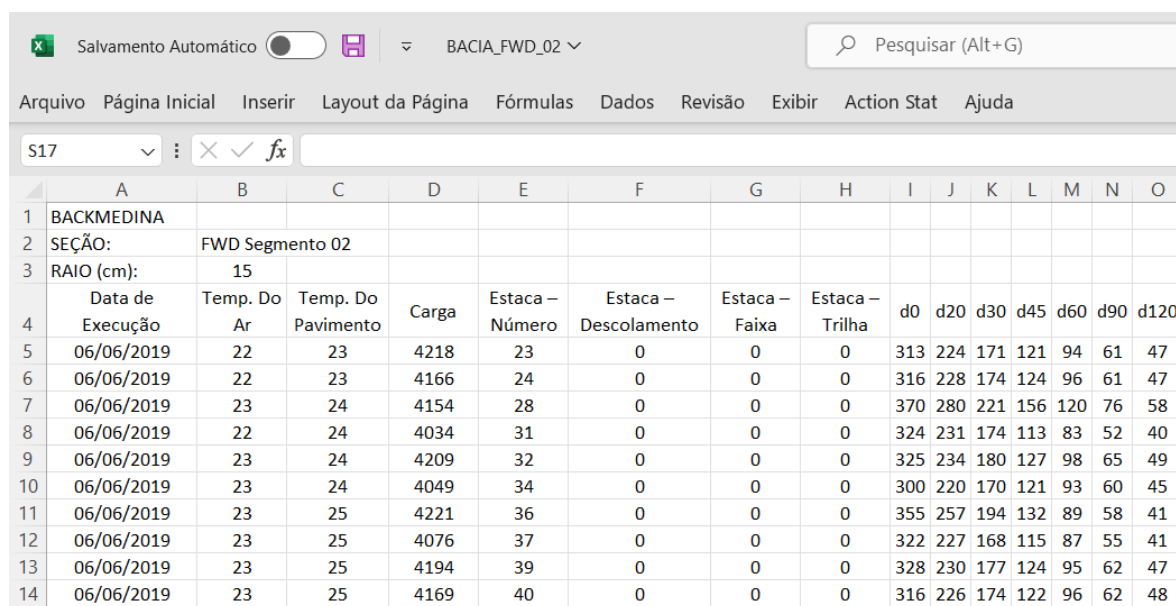
Foi realizado o *download* do *software* MeDiNa, disponível de forma gratuita no site do DNIT, sendo que o pacote instala as seguintes versões de cada programa:

- a) MeDiNa - versão v.1.1.5.0 de dezembro/2020;
- b) BackMeDiNa - versão v.1.2.0 de julho/2020;
- c) AEMC - versão v.2.4.2 de junho/2020.

Para iniciar as entradas no *software* é necessário preencher o arquivo disponível na aba “projetos/modelo arquivo de bacias” em formato Excel (.csv separado por vírgulas). O preenchimento deve ser realizado tanto para os resultados dos ensaios FWD, quanto para os resultados dos ensaios VB. Conforme já exposto, para o ensaio VB, os dados serão inseridos após a adaptação (conversão do carregamento do eixo padrão) realizada na etapa 02 para entrada em formato FWD.

Na Figura 48 (para FWD) e na Figura 49 (para VB) são apresentados os modelos dos arquivos que devem ser preenchidos com as seguintes informações: número do trecho, raio da placa de aplicação do ensaio FWD, data dos ensaios, temperatura do ar, temperatura do pavimento, carga em “kgf”, número da estaca, complementos e valores aferidos na deflexão em “ μm ”.

Figura 48 - Modelo da tabela para preenchimento do arquivo bacias FWD - BackMeDiNa.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	BACKMEDINA														
2	SEÇÃO:	FWD Segmento 02													
3	RAIO (cm):	15													
4	Data de Execução	Temp. Do Ar	Temp. Do Pavimento	Carga	Estaca - Número	Estaca - Descolamento	Estaca - Faixa	Estaca - Trilha	d0	d20	d30	d45	d60	d90	d120
5	06/06/2019	22	23	4218	23	0	0	0	313	224	171	121	94	61	47
6	06/06/2019	22	23	4166	24	0	0	0	316	228	174	124	96	61	47
7	06/06/2019	23	24	4154	28	0	0	0	370	280	221	156	120	76	58
8	06/06/2019	22	24	4034	31	0	0	0	324	231	174	113	83	52	40
9	06/06/2019	23	24	4209	32	0	0	0	325	234	180	127	98	65	49
10	06/06/2019	23	24	4049	34	0	0	0	300	220	170	121	93	60	45
11	06/06/2019	23	25	4221	36	0	0	0	355	257	194	132	89	58	41
12	06/06/2019	23	25	4076	37	0	0	0	322	227	168	115	87	55	41
13	06/06/2019	23	25	4194	39	0	0	0	328	230	177	124	95	62	47
14	06/06/2019	23	25	4169	40	0	0	0	316	226	174	122	96	62	48

Fonte: A autora (2022).

Figura 49 - Modelo da tabela para preenchimento do arquivo bacias VB - BackMeDiNa.

<div> <div> <div>Salvamento Automático</div> <div></div> </div> <div>BACIA_VB_02</div> <div>Pesquisar (Alt+G)</div> </div>															
<div> <div>Arquivo</div> <div>Página Inicial</div> <div>Inserir</div> <div>Layout da Página</div> <div>Fórmulas</div> <div>Dados</div> <div>Revisão</div> <div>Exibir</div> <div>Action Stat</div> <div>Ajuda</div> </div>															
<div> <div>T23</div> <div></div> <div></div> <div></div> </div>															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	BACKMEDINA														
2	SEÇÃO:	VB Segmento 02													
3	RAIO (cm):	10,79													
4	Data de Execução	Temp. Do Ar	Temp. Do Pavimento	Carga	Estaca – Número	Estaca – Descolamento	Estaca – Faixa	Estaca – Trilha	d16,2	d25,74	d34,09	d47,83	d62,15	d91,45	d121,09
5	06/12/2019	25	29,5	2050	23	0	0	0	205,5	154	133,5	113	92,5	72	51,5
6	06/12/2019	25	29,5	2050	24	0	0	0	205,5	154	123,5	103	82	51,5	41
7	06/12/2019	24,5	28	2050	25	0	0	0	164,5	133,5	92,5	72	61,5	51,5	41
8	06/12/2019	27,5	33	2050	28	0	0	0	277,5	246,5	216	164,5	144	92,5	72
9	06/12/2019	26,5	31,5	2050	30	0	0	0	277,5	226	185	133,5	82	51,5	41
10	06/12/2019	26	31	2050	31	0	0	0	205,5	185	154	113	82	61,5	41
11	06/12/2019	24	26	2050	32	0	0	0	144	113	92,5	72	61,5	51,5	41
12	06/12/2019	24	27	2050	34	0	0	0	133,5	123,5	113	92,5	72	51,5	41
13	06/12/2019	24	28	2050	36	0	0	0	154	113	92,5	82	72	51,5	41
14	06/12/2019	23,5	28	2050	37	0	0	0	133,5	103	92,5	82	72	31	20,5
15	06/12/2019	23,5	27	2050	38	0	0	0	154	113	92,5	72	51,5	41	31
16	06/12/2019	23	26	2050	39	0	0	0	133,5	123,5	103	82	61,5	41	31
17	06/12/2019	23	26	2050	40	0	0	0	123,5	113	92,5	72	61,5	41	31

Fonte: A autora (2022).

Após o preenchimento do arquivo de bacias, ele deve ser importado para o BackMeDiNa. O próximo passo é informar as camadas do pavimento, conforme camadas apresentadas na Figura 43 e na Tabela 29. Todos os materiais foram assumidos como homogêneos, isotrópicos e com comportamento elástico linear.

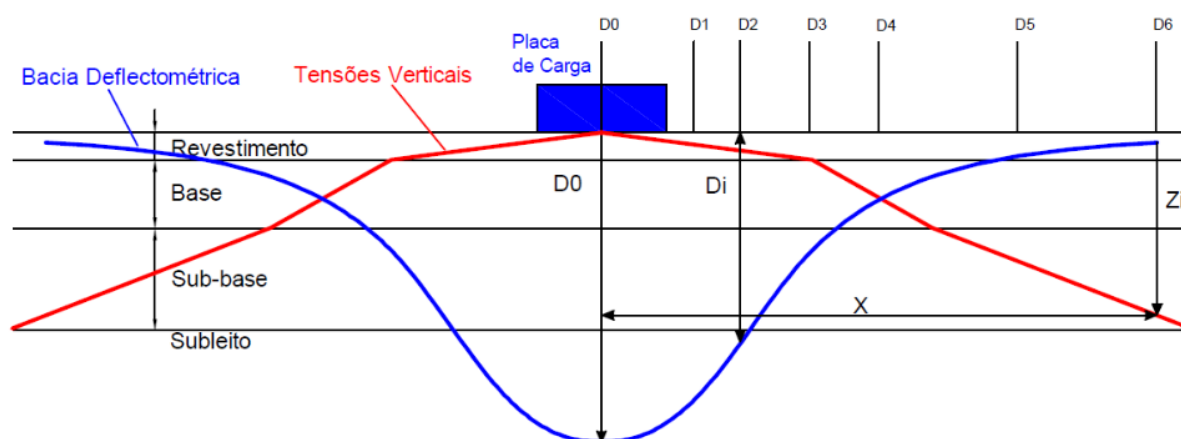
Tabela 29 - Espessura e camadas no BackMeDiNa.

Material	Espessura (cm)
Camada asfáltica	5,0 (entre 5 e 15)
Camada granular	18,0 (entre 10 e 40)
Camada granular	30,0 (entre 10 e 40)
Subleito	0,0

Fonte: A autora (2021).

Conforme realizado por Bueno (2016) e Nery (2020), a camada de reforço do subleito foi considerada como parte conjunta de um “sistema subleito”, que consiste em solo natural do terreno e seu reforço, atribuindo-se um único valor de módulo para todas as camadas abaixo da sub-base. Na Figura 50 é ilustrada a situação citada, em que as camadas além da profundidade z_i não contribuem na deflexão D_i , ou seja, apenas o ajuste dos módulos das camadas com profundidade menor que z_i influenciam em D_i .

Figura 50 - Distribuição de tensões e deformações que definem a unicidade dos conjuntos de módulos de resiliência retroanalizados.



Fonte: Rocha Filho (1996) *apud* Bueno (2016).

O programa já indica os coeficientes de Poisson para cada tipo de material informado, sendo que a análise será realizada com base nessa indicação já feita pelo *software* com base em seu banco de dados. Os valores arbitrados estão apresentados na Tabela 30, que também se relacionam com as Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 30 - Coeficientes de Poisson adotados no BackMeDiNa.

Material	Coeficiente de Poisson
Camada asfáltica	0,30
Base BGS	0,40
Sub-base Macadame seco	0,40
Subleito	0,45

Fonte: A autora (2021).

A próxima consideração a ser realizada no BackMeDiNa é quanto à inferência dos módulos de resiliência das camadas. O programa já arbitra módulos iniciais com base em seu banco de dados e, conforme exposto por Bueno (2016), é ideal estabelecer módulos relativamente baixos, de forma a evitar a compensação modular de uma camada por outra. Os módulos inferidos inicialmente no *software*, com base na bibliografia consultada, estão na Tabela 31. Importante ressaltar que esses valores de módulos são valores “sementes” para auxiliar o processo de retroanálise e não representam o resultado da análise.

Tabela 31 - Módulos de resiliência adotados no BackMeDiNa e módulos “sementes”.

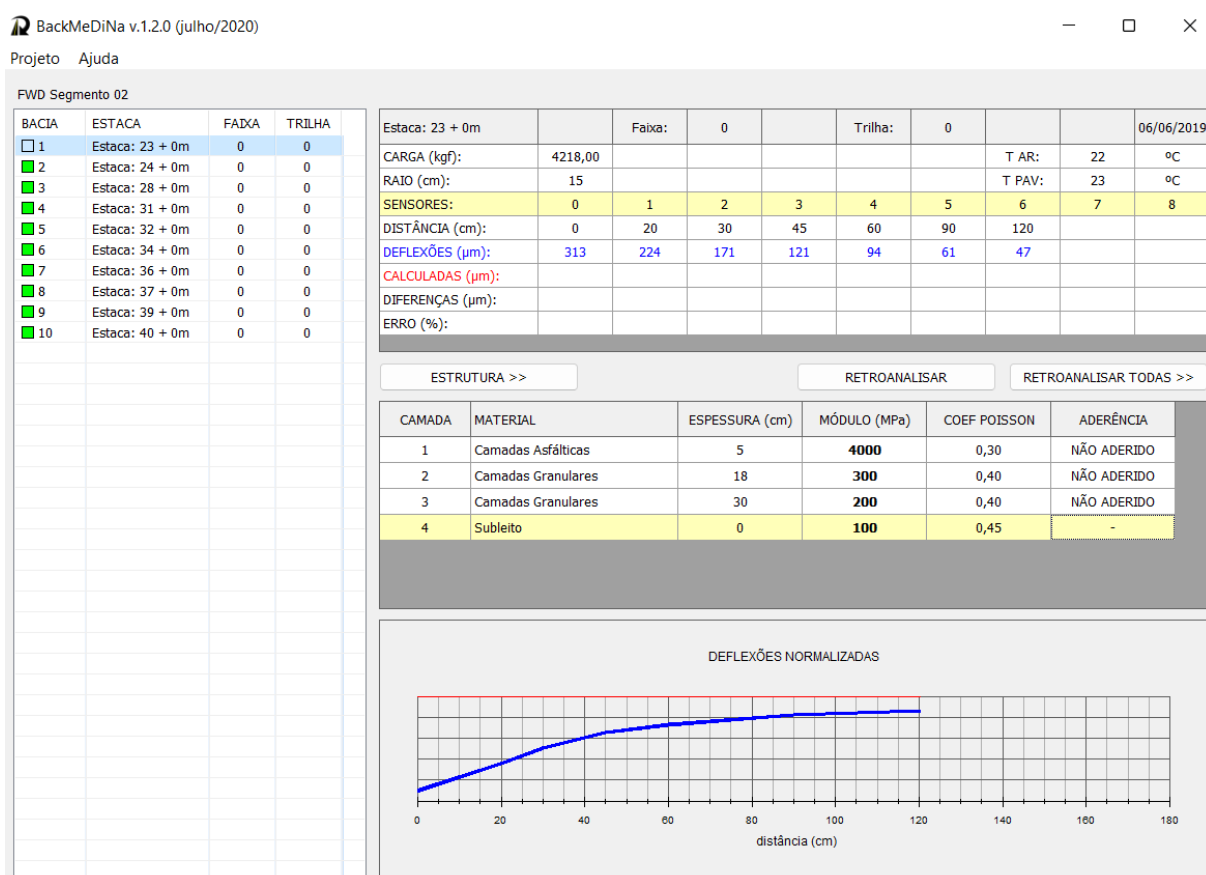
Material	Módulo (Mpa) BackMeDiNa	Módulo (Mpa) Inferido inicial
Camada asfáltica	5000	4000
Base BGS	400	300
Sub-base Macadame seco	400	200
Subleito	150	100

Fonte: A autora (2021).

Quanto às condições de aderência entre as camadas do pavimento, foi adotada a condição “não aderida”, sugerida inicialmente pelo próprio *software* e evidenciada como a melhor opção no capítulo revisão.

Na Figura 51 são ilustrados os parâmetros iniciais preenchidos no BackMeDiNa. Pode-se utilizar a função de aplicar à estrutura modelada as demais bacias inseridas para análise de forma a replicar a configuração inicial.

Figura 51 - Modelo da tela com os parâmetros iniciais imputados no BackMeDiNa.



Fonte: A autora (2022).



Na sequência, inicia-se o processo de retroanálise, onde aciona-se o botão “Retroanálise” e o programa chama a interface AEMC para cálculo com base na Análise Elástica de Múltiplas Camadas. Ao finalizar a etapa de cálculo, o *software* encontra o melhor resultado com base no critério de parada, ou seja, a obtenção de um erro RMS mais próximo de 5% que indica uma boa correlação entre as deflexões medidas em campo e retroanalizadas (Equação 19).

As bacias são sinalizadas na cor verde indicando que o resultando atende ao critério de parada estabelecido (Figura 52). Embora a nova versão do BackMeDiNa tenha sido atualizada para que o resultado apresentado já seja o com menor erro possível, cabe ao usuário avaliar se os módulos encontrados condizem com a realidade dos materiais em campo e com os dados da literatura.

Figura 52 - Bacias devem ser retroanalizadas até ficarem verde conforme critério de parada - BackMeDiNa.

 BackMeDiNa v.1.2.0 (julho/2020)

Projeto Ajuda

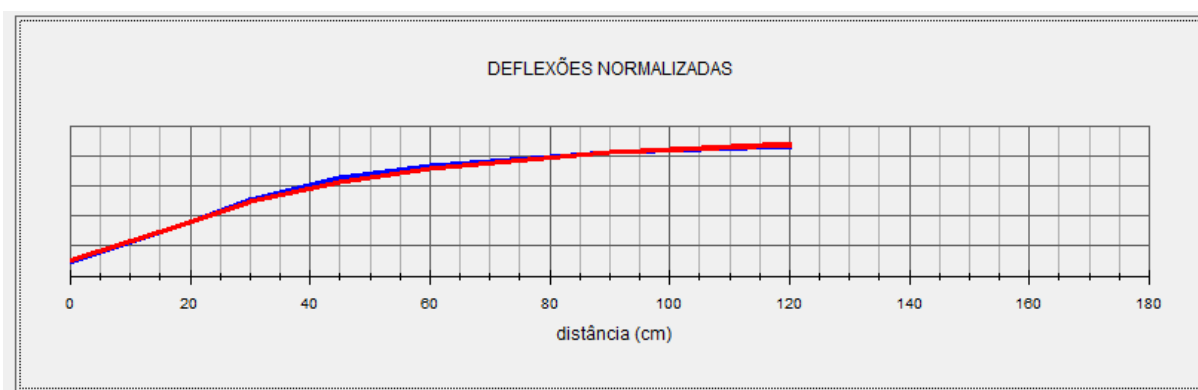
FWD Segmento 02			
BACIA	ESTACA	FAIXA	TRILHA
 1	Estaca: 23 + 0m	0	0
 2	Estaca: 24 + 0m	0	0
 3	Estaca: 28 + 0m	0	0
 4	Estaca: 31 + 0m	0	0
 5	Estaca: 32 + 0m	0	0
 6	Estaca: 34 + 0m	0	0
 7	Estaca: 36 + 0m	0	0
 8	Estaca: 37 + 0m	0	0
 9	Estaca: 39 + 0m	0	0
 10	Estaca: 40 + 0m	0	0

Fonte: A autora (2022).

Por fim, as bacias medidas e calculadas são plotadas na tela inicial para análise dos ajustes efetuados e possíveis erros, conforme Figura 53.

Figura 53 - Bacias deflectométricas medidas x calculadas - BackMeDiNa.

Estaca: 23 + 0m		Faixa:	0		Trilha:	0			06/06/2019
CARGA (kgf):	4218,00						T AR:	22	°C
RAIO (cm):	15						T PAV:	23	°C
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120		
DEFLEXÕES (µm):	313	224	171	121	94	61	47		
CALCULADAS (µm):	311	224	176	129	98	61	42		
DIFERENÇAS (µm):	2	0	-5	-8	-4	0	5		
ERRO (%):	5,1%								



Fonte: A autora (2022).

3.1.3.2 Retroanálise com o software BAKFAA

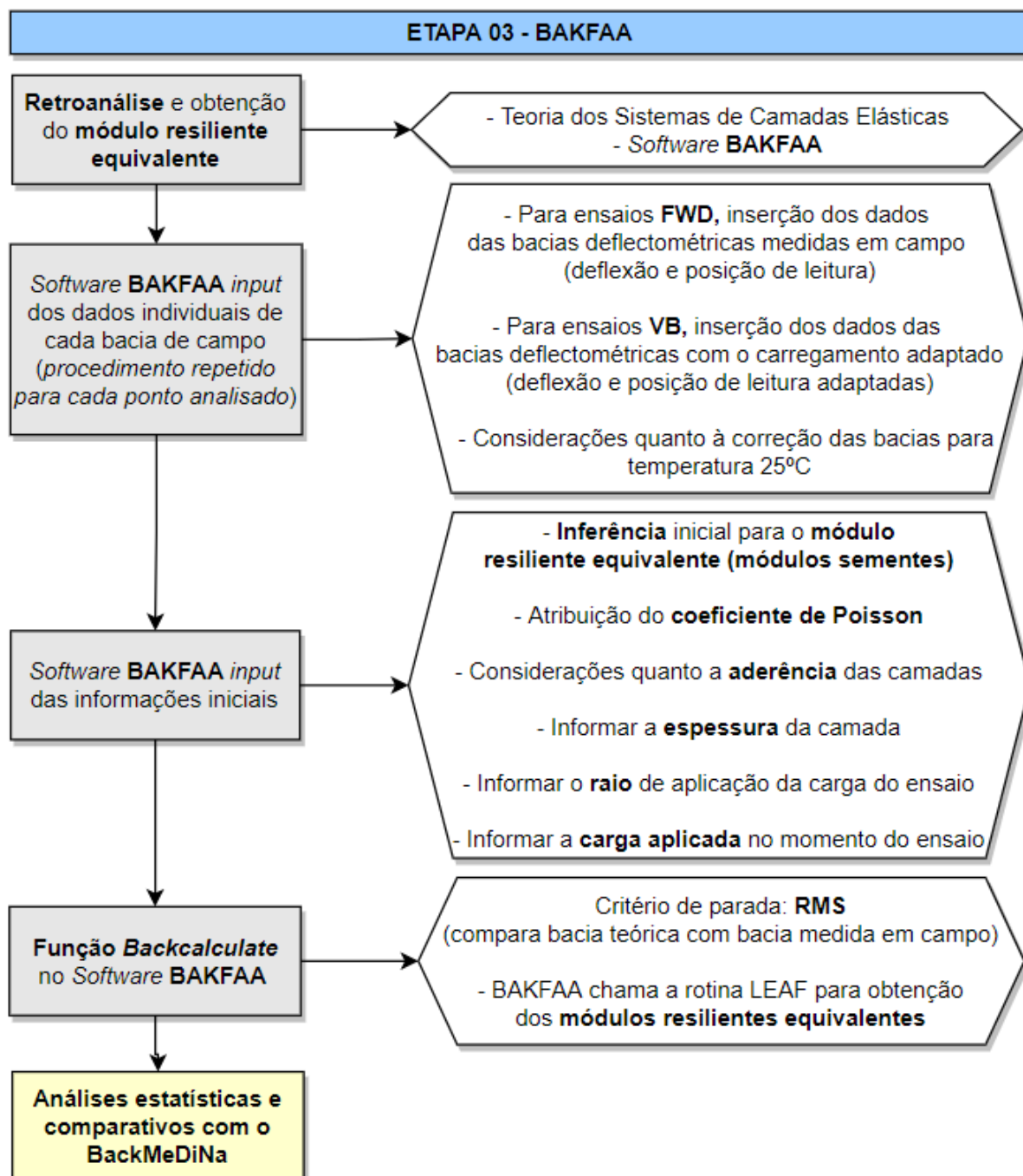
Esta etapa consiste na retroanálise e obtenção dos módulos resilientes equivalentes através da TSCE com o uso do *software* BAKFAA, com o intuito de confrontar os dados obtidos pelo *software* BackMeDiNa, conforme fluxograma da Figura 54.

Assim como no BackMeDiNa, no BAKFAA as bacias deflectométricas medidas em campo através da VB e do FWD são retroanalizadas, de modo a se obter o módulo resiliente equivalente para cada camada do pavimento dos dois trechos estudados.

Foi realizado o *download* do *software* BAKFAA, disponível de forma gratuita no site da *Federal Aviation Administration*, sendo a versão escolhida para instalação a 2.1.0.1 (2017) que chama a rotina do *software* LEAF 2003.6.11, também desenvolvido pela FAA.

Para cada bacia medida em campo, 20 bacias medidas com o FWD e 20 bacias medidas com a VB, foi repetido o mesmo procedimento detalhado a seguir para obtenção dos módulos.

Figura 54 - Fluxograma - Etapa 03 da pesquisa - BAKFAA.



Fonte: A autora (2022).

Na Figura 55 e na Figura 56 é apresentada a tela inicial do BAKFAA com os dados iniciais preenchidos para bacia medida pelo FWD e pela VB, respectivamente.

São informados os módulos sementes em “MPa”, o coeficiente de Poisson, a condição de aderência 0,00 (para representar a consideração não aderida, conforme já considerado no BackMeDiNa), a espessura das camadas em “mm”, a distância dos

sensores (*offset*) em “mm”, a deflexão das bacias em “ μm ”, raio de aplicação da carga em “mm” e magnitude da carga em “kN”.

Os dados da Tabela 29, da Tabela 30 e da Tabela 31 considerados para o BackMeDiNa são os mesmos aplicados no BAKFAA.

Figura 55 - BAKFAA com os dados FWD preenchidos para iniciar a retroanálise.

BAKFAA - FAA Backcalculation (2.1.0.1) with LEAF (2003.6.11)

Layer Nbr	Young's Modulus, MPa	Poisson's Ratio	Interface Parameter (0 to 1.0)	Thickness, mm	Layer Changeable
1	4000	0,30	0,00	50	<input checked="" type="checkbox"/>
2	300	0,40	0,00	180	<input checked="" type="checkbox"/>
3	200	0,40	0,00	300	<input checked="" type="checkbox"/>
4	100	0,45	0,00	0	<input checked="" type="checkbox"/>
5	0,00	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
6	0,00	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
7	0,00	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
8	0,00	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
9	0,00	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
10	0,00	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, mm	0	200	300	450	600	900	1200
Defln, mc	313	224	171	121	94	61	47
Calc, mc							

— Measured — Calculated

Loaded Deflection: Unloaded Deflection: Calculated J.T.E, %:

Units: ☐ English ☒ Metric

☒ Delete negative offset sensors

Iteration Tolerance: Evaluation Depth, mm:

Plate Radius, Plate Load, KN:

Function RMS, mc: Iteration Number:

Fonte: A autora (2022).

Figura 56 - BAKFAA com os dados VB preenchidos para iniciar a retroanálise.

BAKFAA - FAA Backcalculation (2.1.0.1) with LEAF (2003.6.11)

Layer Nbr	Young's Modulus, MPa	Poisson's Ratio	Interface Parameter (0 to 1.0)	Thickness, mm	Layer Changeable
1	4000	0.30	0.00	50	<input checked="" type="checkbox"/>
2	300	0.40	0.00	180	<input checked="" type="checkbox"/>
3	200	0.40	0.00	300	<input checked="" type="checkbox"/>
4	100	0.45	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
5	0.00	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
6	0.00	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
7	0.00	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
8	0.00	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
9	0.00	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
10	0.00	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, mm	162,0	257,4	340,9	478,3	621,5	914,5	1210,9
Defln, mc	227,5	246,5	216	164,5	144	92,5	72
Calc, mc							

— Measured — Calculated

Loaded Deflector: Unloaded Deflect: Calculated J.T.E, %:

Approach: Depart:

Batch Graph:

Units: ☐ English ☒ Metric

FWD File Type: ☐ No ☐ Distance ☐ Load

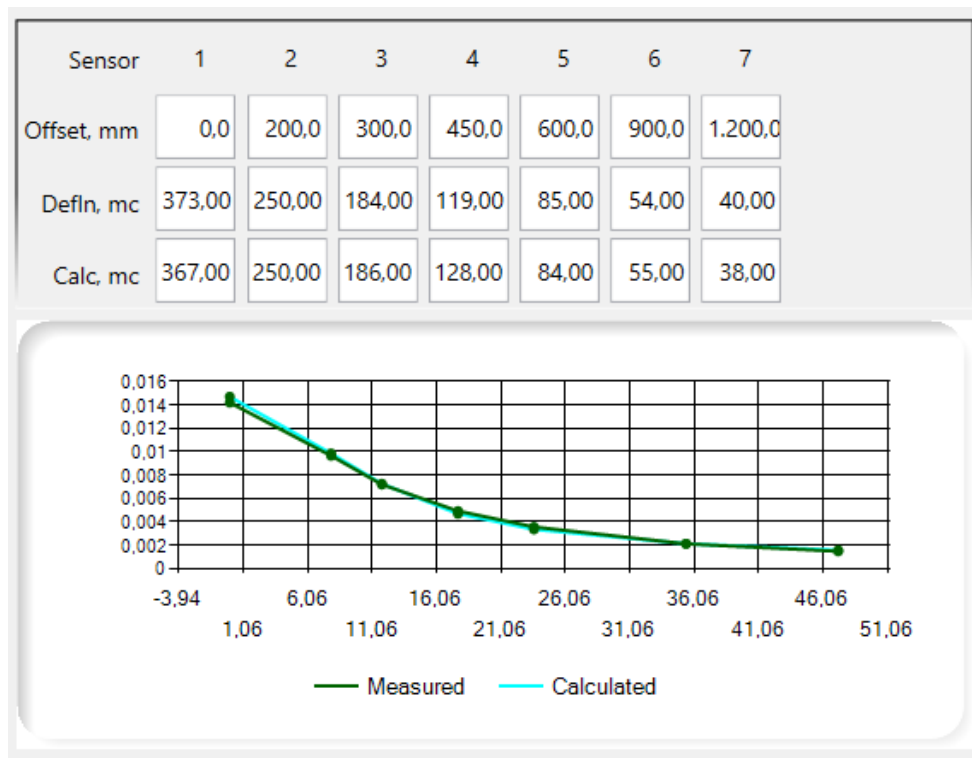
Buttons: Load FWD File, Convert to PDDX, Load Structure, Save Structure, Backcalculate, Stop Backcalculate, Show Output, Delete negative offset sensors, Iteration Tolerance: 0.0001, Evaluation Depth, mm: 1000, Plate Radius: 107,9, Plate Load, KN: 20,5, Function RMS, mc: , Iteration Number: , Select All, Clear All, Select Load and Run LEAF, Help, Exit

Fonte: A autora (2022).

Deve-se então, acionar o botão “*Backcalculate*” até que o erro RMS pare de reduzir e chegue no limite de ajuste das medidas das bacias. Após concluída a retroanálise, as bacias medidas e calculadas são plotadas na tela inicial para avaliação do ajuste efetuado (Figura 57) e os módulos resilientes equivalentes são extraídos.

Com todos os módulos resilientes equivalentes calculados para os segmentos 02 e 04, com os dados dos ensaios VB e FWD nos *softwares* BackMeDiNa e BAKFAA, são realizadas análises estatísticas descritivas para comparação e discussão dos resultados.

Figura 57 - Bacias deflectométricas medidas x calculadas - BAKFAA.



Fonte: A autora (2022).

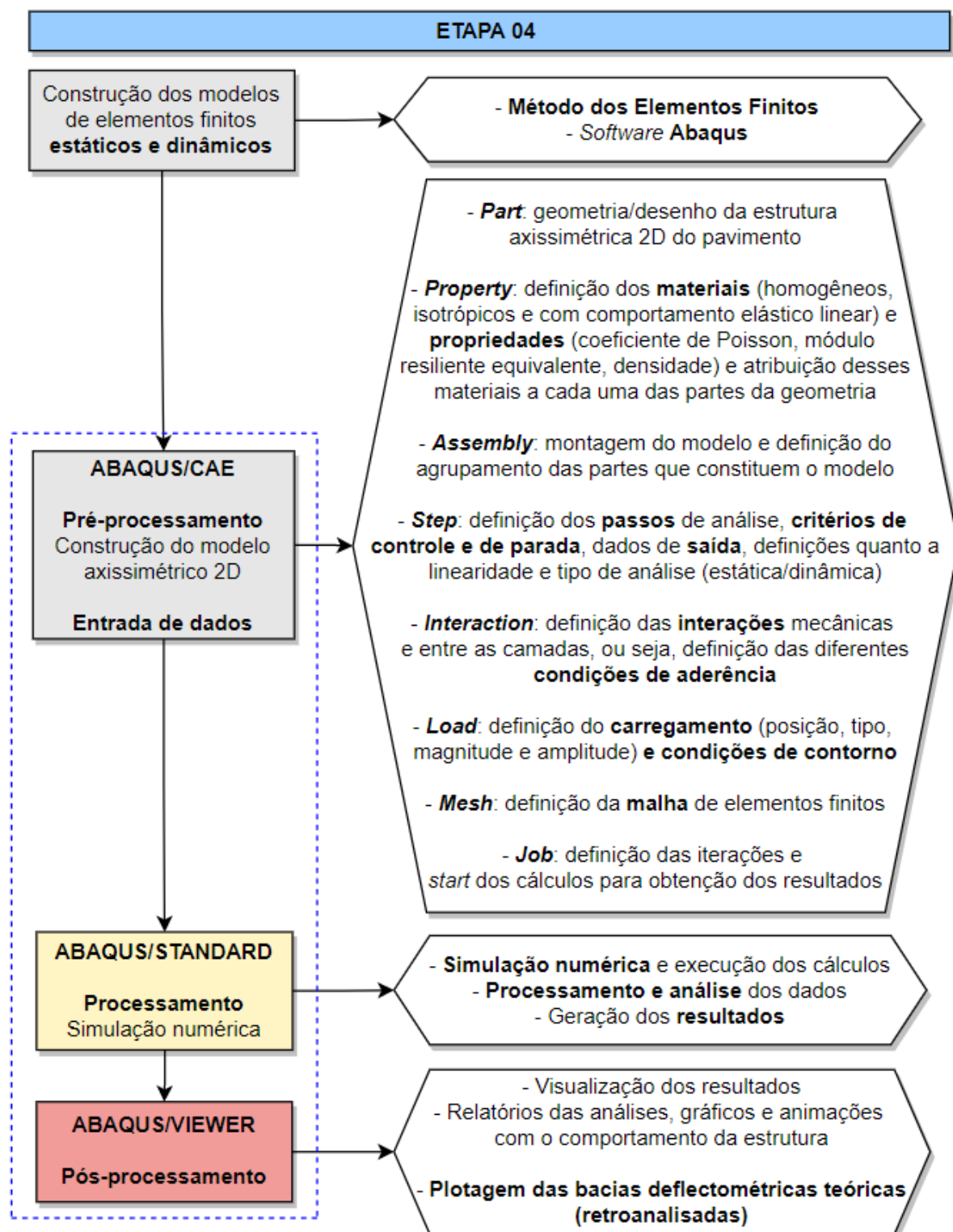
3.1.4 Etapa 04 - Construção dos modelos de elementos finitos e simulações numéricas das bacias deflectométricas sob ação de um ensaio FWD

A construção dos modelos de elementos finitos utiliza o *software* Abaqus para simulação das condições estáticas e dinâmicas. Os passos de análises dentro do Abaqus são divididos em pré-processamento (Abaqus/CAE), processamento (Abaqus/Standard) e pós-processamento (Abaqus/Viewer).

Os modelos axissimétricos 2D implementados no *software* Abaqus podem ser utilizados como uma aproximação da representação 3D. Essa representação pode ser adotada, pois existe simetria em torno de um eixo em revolução e a possibilidade de representar o efeito da carga distribuída do ensaio FWD (impulso sobre placa circular).

O passo a passo das considerações adotadas na construção dos modelos é apresentado na Figura 58 e, na sequência, a metodologia traz mais detalhes de cada etapa.

Figura 58 - Fluxograma - Etapa 04 da pesquisa - Construção do modelo no Abaqus.



Fonte: A autora (2022).

O primeiro passo é desenhar as partes que compõe o modelo (*"part"*). Ao abrir a tela de desenho, há a possibilidade de utilizar as ferramentas de pontos, linhas,

arcos, entre outros. O sistema de unidades utilizado é o SI (mm), exposto na Tabela 32.

Tabela 32 - Sistema de unidades adotado no Abaqus.

Variável	SI (mm)
Comprimento	mm
Força	N
Massa	ton (10^3 kg)
Tempo	s
Tensão	MPa (N/mm ²)
Energia	mJ (10^{-3} J)
Densidade	ton/mm ³

Fonte: Adaptado de Abaqus (2017).

Para a geometria do modelo, conforme supracitado, a pesquisa utiliza a geometria axissimétrica 2D de Tarefder e Ahmed (2014) e também utilizada por Hamim *et al.* (2018) na análise de bacias de deflexão, ou seja, 33,33 vezes o raio de carregamento na horizontal e vertical (aproximadamente 5000 mm), sendo o raio de carregamento 150 mm (simulando a placa do ensaio FWD).

Os comprimentos vertical e horizontal do modelo foram selecionados de tal maneira que a influência da área de carga torna-se insignificante nas regiões mais distantes. Ou seja, conforme a maioria das pesquisas relacionadas na Tabela 15, a consideração dos comprimentos pelo menos de quatro a dez vezes a largura da área de carga já garante que o efeito da carga seja insignificante nas bordas do modelo.

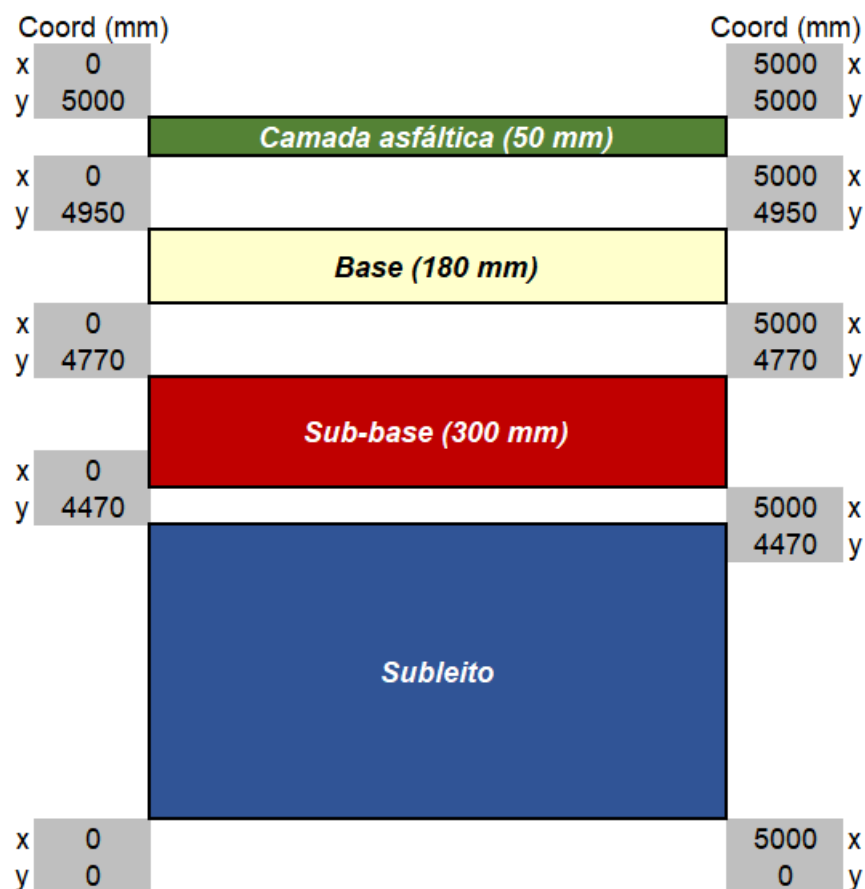
A geometria final do modelo a ser utilizado nesta pesquisa é um retângulo em revolução dimensionado com 5000 mm na horizontal (eixo x) e 5000 mm na vertical (eixo y). As dimensões adotadas para cada camada estão na Tabela 33 e na Figura 59 com as coordenadas do modelo.

Tabela 33 - Dimensões de cada camada no Abaqus.

Material	Largura (mm) Dimensão horizontal (x)	Espessura (mm) Dimensão vertical (y)
Camada asfáltica	5000	50
Base	5000	180
Sub-base	5000	300
Subleito	5000	4470

Fonte: A autora (2022).

Figura 59 - Coordenadas do desenho do modelo no Abaqus.



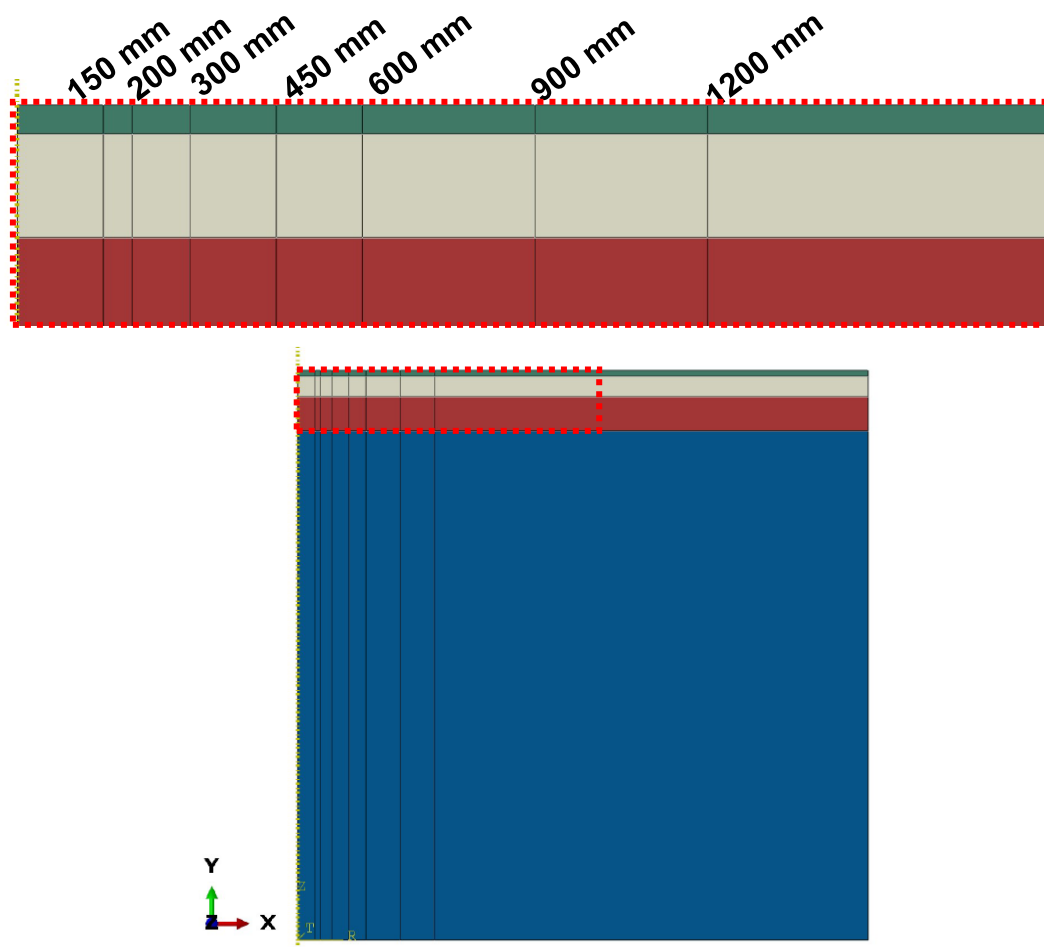
Fonte: A autora (2022).

Para criação do modelo, cada uma das partes deve ser desenhada separadamente para que seja possível a atribuição das condições de aderência entre cada uma delas. Dessa forma, ele é composto por quatro partes, as quais correspondem as camadas do pavimento: asfalto (verde), base (cinza), sub-base (marrom) e subleito (azul), conforme representadas na Figura 60.

Nesse passo, a estrutura já deve ser particionada nas regiões de interesse das análises, ou seja, a região de aplicação da carga FWD e o posicionamento dos geofones do ensaio FWD, distâncias apresentadas também na Figura 60.

Na sequência, para cada uma das partes devem ser atribuídas as propriedades mecânicas dos materiais que compõe cada uma delas (*property*). Os materiais no Abaqus são definidos como homogêneos, isotrópicos e elástico lineares.

Figura 60 - Construção das diferentes partes do modelo.



Fonte: A autora (2022).

O coeficiente de Poisson adotado é o mesmo simulado nos *softwares* de análise elástica, BackMeDiNa e BAKFAA, tanto na simulação estática quanto na dinâmica (Tabela 30). A massa específica utilizada, apenas no modelo dinâmico, é adotada conforme análise dos valores padrões da literatura e resumidos na Tabela 34, devido à falta de ensaios de campo para obtenção desse dado.

Tabela 34 - Definição da massa específica em kg/m³ para simulação dinâmica.

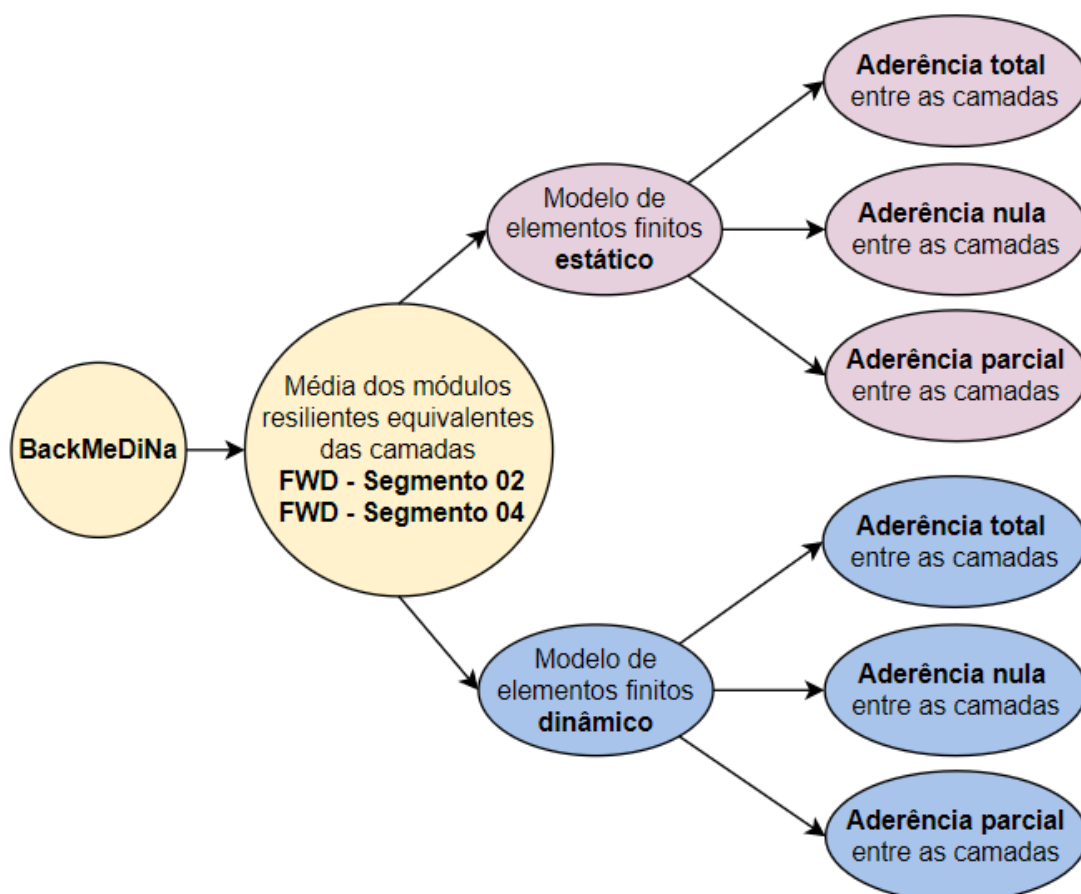
Material	Tarefder, Ahmed, (2014)	Fu <i>et al.</i> (2020)	BackMeDiNa (2020)	Berkenbrock (2022)	Jiang <i>et al.</i> (2022)	Adotada kg/m ³
Asfalto	2322,68	2400	2400	-	2400	2400
Base	2162,5	2200	1800	2211 - 2270	2193	2240,5
Sub-base	-	1900	1600	1998 - 2380	2200	2189
Subleito	1762,03	1600	1600	1683 - 1875	1800	1779

Fonte: A autora (2022).

O modelo exige que sejam inseridos os valores dos módulos resilientes de cada camada do pavimento. Como o modelo de elementos finitos visa simular as bacias deflectométricas sob a ação de uma carga FWD, nesta etapa devem ser considerados os valores dos módulos resilientes equivalentes médios retroanalizados a partir dos dados dos ensaios FWD. A escolha desses módulos estará compreendida entre os resultados das retroanálises do BackMeDiNa e do BAKFAA, ou seja, aqueles módulos que apresentarem os menores erros e dispersões nos resultados.

Os cenários de análises estáticas e dinâmicas (com aderência, sem aderência e aderência parcial), para obtenção das bacias deflectométricas teóricas e avaliação de qual dos modelos ilustra melhor os resultados das bacias deflectométricas aferidas em campo, são apresentados na Figura 61.

Figura 61 - 12 modelos com os dados FWD BackMeDiNa dos segmentos 02 e 04.



Fonte: A autora (2022).

Com a geometria definida e as propriedades dos materiais atribuídas a cada parte do modelo, no módulo “*assembly*”, deve-se unir as diferentes partes do modelo que irão compor o conjunto de análise.

O próximo passo consiste na criação dos “*steps*” de análise, ou seja, a quantidade de diferentes passos e movimentos que o modelo irá simular. No caso da pesquisa, basta a criação de um único passo para a aplicação da carga, e é nesse momento em que os modelos divergem. O modelo estático utiliza a configuração “*static general*” e o modelo dinâmico é configurado como “*dynamic implicit*”, ambos sem a consideração de efeitos não lineares nos materiais.

Deve-se então, definir a interação entre as camadas no módulo “*interaction*”, comumente utilizado para simular diferentes condições de contato entre corpos. Neste recurso, as superfícies de contato precisam ser criadas e classificadas como “*slave*” ou “*master*”, sendo adotada como “*slave*”, conforme Santos *et al.* (2019), a face com a malha mais refinada, e nos casos em que a densidade da malha é igual, a face associada ao material menos rígido. De forma geral, a superfície “*slave*” pode acompanhar, penetrar ou se separar da superfície “*master*”, situações que são percebidas ao alterar-se as condições de aderência e interação entre as camadas.

Para a representação da total aderência entre as camadas é aplicada a condição de contato “*tie constraint*”, onde ela simula que não há movimento relativo entre os nós com a restrição dos graus de liberdade de translação e rotação do elemento.

Já para representação das condições sem aderência ou com aderência parcial entre as camadas, é utilizado o modelo de Coulomb (Equação 20) através do modo de interação “*simple friction*”, que relaciona a tensão de cisalhamento máxima permitida na interface com a pressão de contato entre as camadas.

$$\tau_{crit} = \mu * p \quad (20)$$

Onde:

τ_{crit} = tensão crítica de cisalhamento;

μ = coeficiente de atrito;

p = pressão de contato entre as superfícies.

O valor do coeficiente de atrito deve ser 0,00 para representar a condição de livre deslizamento, igual a 1,00 para representar total aderência entre as camadas e igual a 0,50 para representar a condição de aderência parcial.

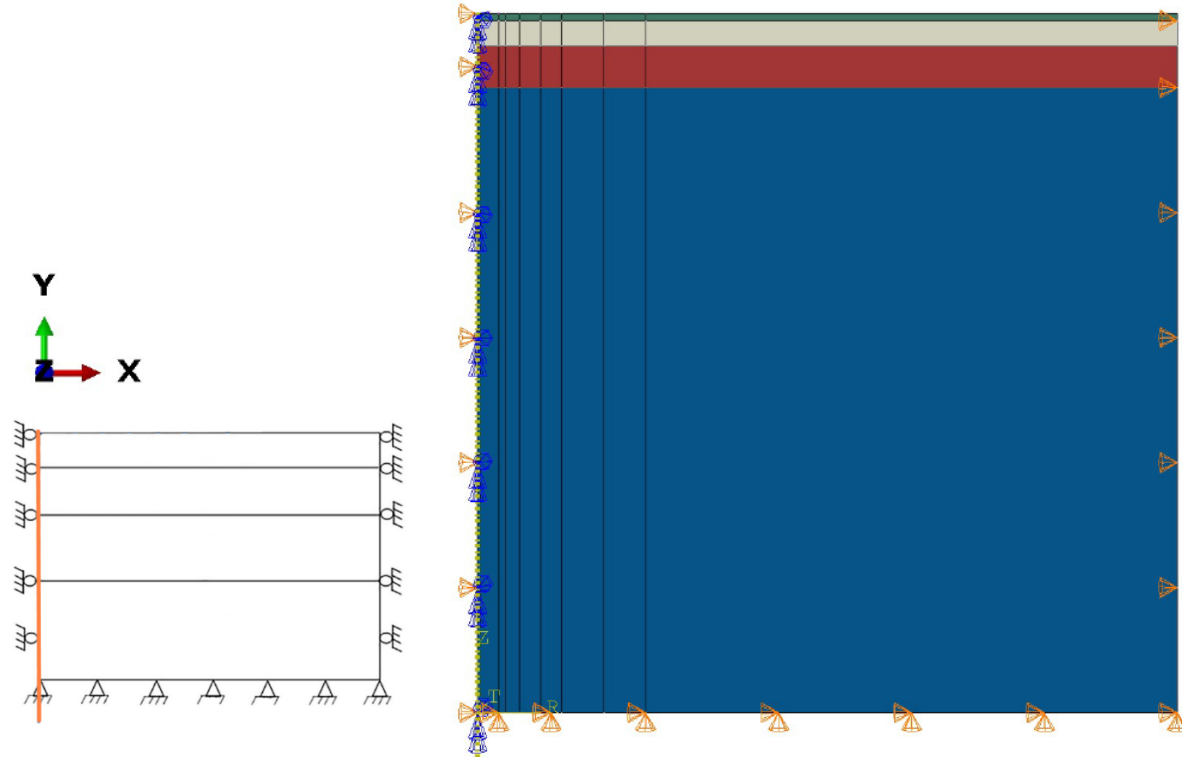
Seguindo para o módulo “load”, é preciso estabelecer condições de contorno e relação que cada uma das partes/seção terá entre si e que o modelo terá com o meio. Conforme Ghadimi *et al.* (2013), Tarefder e Ahmed (2014), Hamim *et al.* (2018), foi adotada a condição de movimentação vertical no eixo y, porém foi estabelecida a proibição de deslocamentos horizontais no eixo x. Para o fundo do subleito foi considerada a condição engastada, ou seja, o movimento rotacional é impedido em todas as direções, conforme mostra a Tabela 35 e a Figura 62. A ferramenta que auxilia nessas delimitações é a “boundary conditions”.

Tabela 35 - Definições das condições de contorno no Abaqus.

Local	Condição de contorno adotada
Eixo	<i>Symmetry / Antisymmetry / Encastre</i> XSYUMM (U1 = UR2 = UR3 = 0)
Lateral direita	<i>Displacement / Rotation</i> → U1 = U2 =0
Fundo	<i>Displacement / Rotation</i> → U1 =0

Fonte: A autora (2022).

Figura 62 - Definições das condições de contorno no Abaqus.

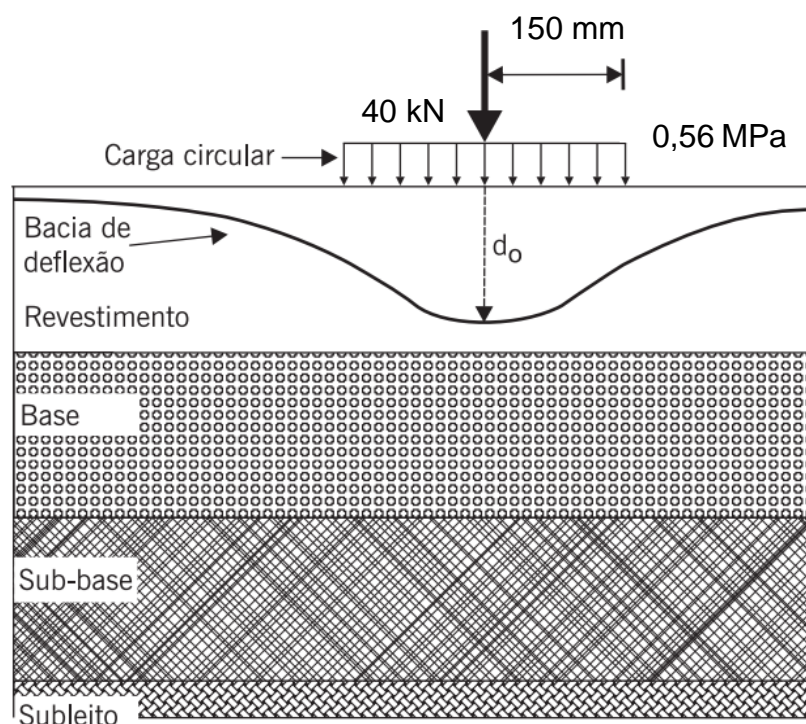


Fonte: A autora (2022).

Ainda no módulo “load”, é preciso modelar a aplicação da carga FWD.

No modelo estático, basta dimensionar a carga FWD como uma pressão uniformemente distribuída e constante com o tempo, ou seja, somente o pico do histórico de tempo de carregamento é utilizado. A magnitude da carga é assumida como 40 kN e desenvolve uma pressão de 0,56 MPa em uma placa de raio 150 mm (Figura 63).

Figura 63 - Forma de aplicação da carga do ensaio FWD simulado no Abaqus.



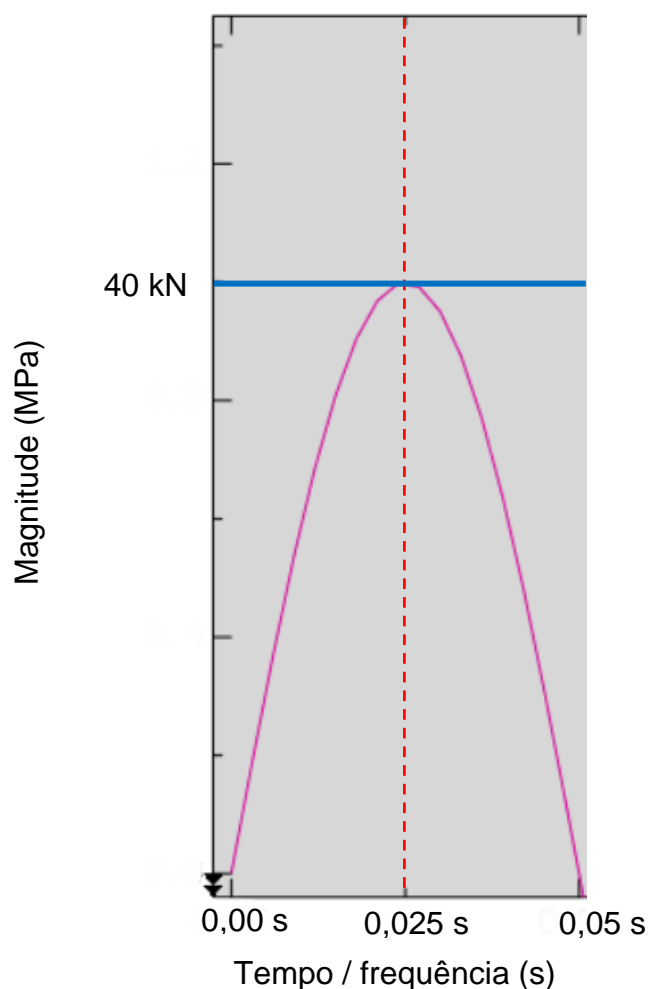
Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2008).

Já na análise dinâmica, a carga precisa ser dimensionada conforme a amplitude real para simular a aplicação do impulso. Devido a este motivo, foi utilizado o padrão de carregamento do ensaio FWD realizado com o equipamento KUAB, com o tempo de duração do pulso de 0,05 s, conforme apresentado Tabela 6. Este modelo é analisado com a aplicação de um impulso de 40 kN, padrão de carregamento dependente do tempo e uma pressão de 0,56 MPa que é integrada a uma variação de amplitude, atingindo o pico da carga em 0,025 s.

Na Figura 64 é ilustrado o padrão de aplicação das cargas nos dois modelos analisados. A linha contínua azul, representa a carga aplicada no modelo estático. A

amplitude dimensionada como uma frequência circular na forma de um meio seno em rosa, representa a carga simulada no modelo dinâmico.

Figura 64 - Padrão das cargas aplicadas nas simulações dinâmicas e estáticas.

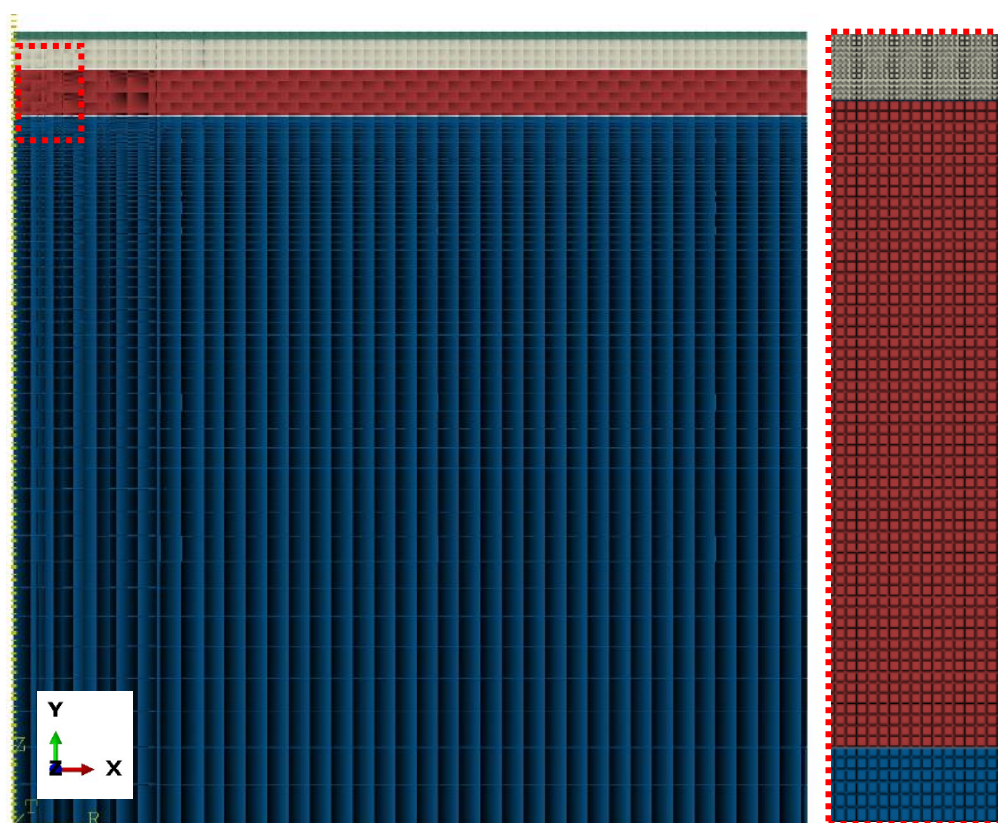


Fonte: A autora (2022).

O próximo passo consiste na criação da malha (módulo “*mesh*”) com a distribuição dos pontos por cada borda do modelo. É importante o entendimento de que a precisão da tensão calculada está relacionada à malha na vertical (eixo y) e a deflexão está relacionada na malha de direção horizontal (eixo x).

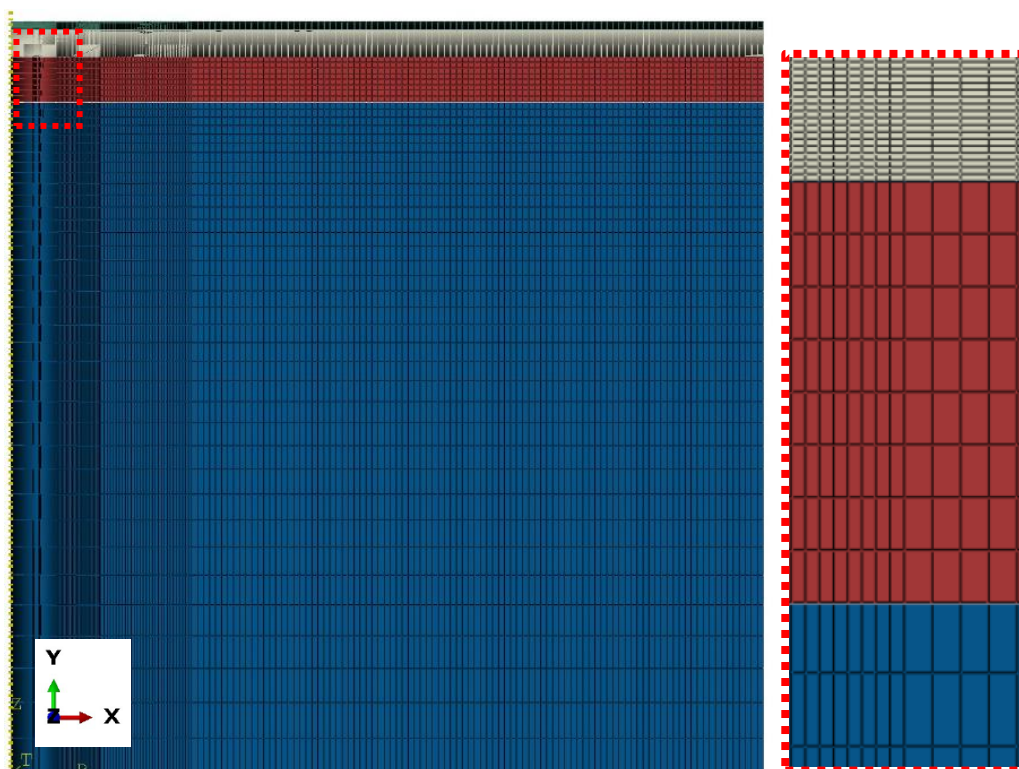
Os modelos estáticos (Figura 65) e dinâmicos (Figura 66) são dimensionados com distribuições diferentes de malha. Um dos motivos é o esforço computacional maior exigido pela análise dinâmica, como também, erros apresentados pelo modelo estático em algumas simulações de aderência quando utiliza a malha semelhante ao modelo dinâmico.

Figura 65 - Distribuição da malha no modelo estático.



Fonte: A autora (2022).

Figura 66 - Distribuição da malha no modelo dinâmico.



Fonte: A autora (2022).

A divisão da malha foi criada com o tipo de elemento padrão do programa que é o CAX4R (*four-node bilinear axisymmetric quadrilateral*) e distribuição dos nós é apresentada na Tabela 36.

Tabela 36 - Definições das malhas de cada modelo no Abaqus.

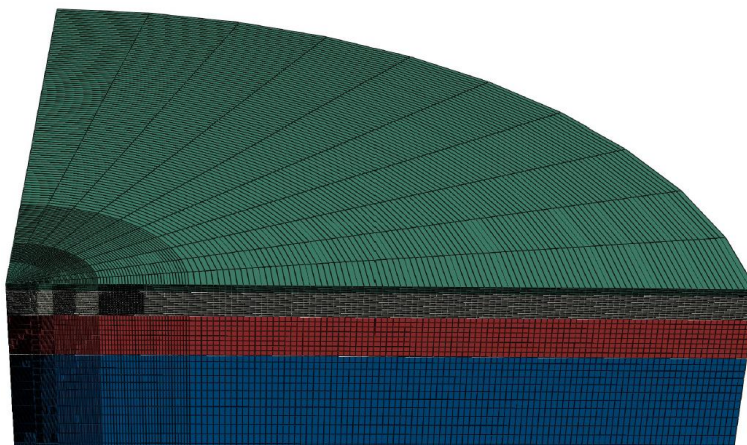
Modelo	Estático	Dinâmico
Asfalto	40.000 elementos	2.150 elementos
	V e H: Malha com 2,5 mm de tamanho do elemento	H: Malha com 5,0 mm até 300 mm; 10 mm de 300 a 600 mm; 20 mm de 600 a 1200 mm e 40 mm de 1200 a 5000 mm V: Malha com 5,0 mm de tamanho de elemento
Base	144.000 elementos	7.740 elementos
	V e H: Malha com 2,5 mm de tamanho do elemento	H: Malha com 5,0 mm até 300 mm; 10 mm de 300 a 600 mm; 20 mm de 600 a 1200 mm e 40 mm de 1200 a 5000 mm V: Malha com 5,0 mm de tamanho de elemento
Sub-base	60.000 elementos	1.720 elementos
	V e H: Malha com 5,0 mm de tamanho do elemento	H: Malha com 5,0 mm até 300 mm; 10 mm de 300 a 600 mm; 20 mm de 600 a 1200 mm e 40 mm de 1200 a 5000 mm V: Malha com 10,0 mm de tamanho de elemento
Subleito	70.000 elementos	7.740 elementos
	H: Malha com 5,0 mm de tamanho do elemento V: Malha diminuindo a densidade de 5,0 a 250,0 mm	H: Malha com 5,0 mm até 300 mm; 10 mm de 300 a 600 mm; 20 mm de 600 a 1200 mm e 40 mm de 1200 a 5000 mm V: Malha diminuindo a densidade de 50,0 a 250,0 mm
Total de elementos	314.000	19.350
Total de nós	320.266	20.304

Fonte: A autora (2022).

De maneira geral, a densidade da malha é reduzida à medida que se distancia da aplicação da carga circular, como estratégia necessária para redução do tempo computacional de processamento. Esse procedimento é mais evidente na malha do modelo dinâmico, que precisa ser menos densa.

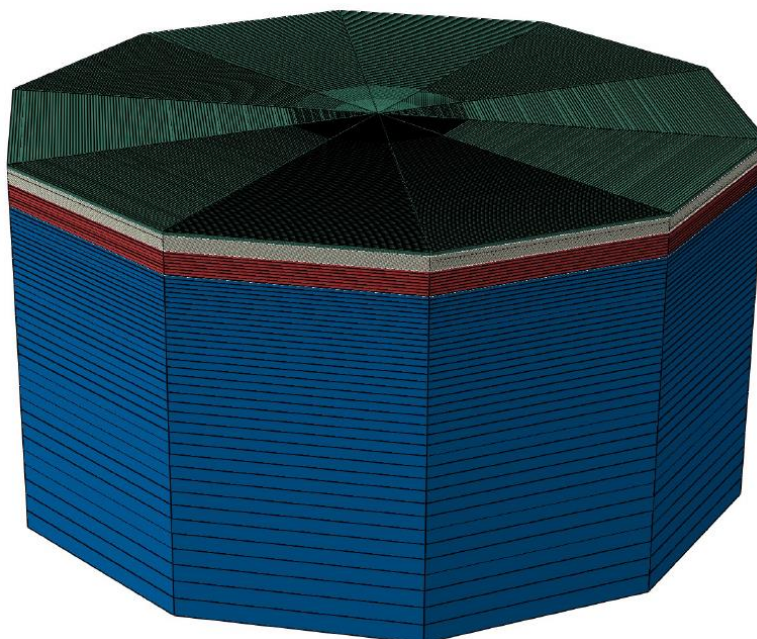
Na Figura 67 e na Figura 68 são apresentadas a vista aproximada de um quarto do cilindro modelado e o cilindro em revolução do modelo axissimétrico, respectivamente. Ambas as figuras são referentes ao modelo dinâmico, mas que se assemelham ao estático, diferenciando apenas na densidade da malha.

Figura 67 - Modelo dinâmico axissimétrico com um quarto do cilindro.



Fonte: A autora (2022).

Figura 68 - Modelo dinâmico axissimétrico em revolução 360°.



Fonte: A autora (2022).

Com a definição e construção dos modelos finalizada, inicia-se o processamento e análise dos resultados do pós-processamento.

Os resultados das bacias de deflexão, obtidos em cada modelo, são comparados através das análises dos erros relativos admissíveis e erros RMS (raiz quadrática média), para compreensão do modelo que melhor representa as medidas das bacias deflectométricas obtidas por um ensaio FWD em campo.

3.1.5 Etapa 05 - Validação do MEF na retroanálise dos módulos resilientes equivalentes

O melhor modelo, encontrado na Etapa 04, é aplicado na retroanálise e obtenção dos módulos resilientes equivalentes das camadas do pavimento através do MEF.

São utilizadas variações de valores de módulos resilientes sugeridos na literatura, como módulos sementes do processo de retroanálise. Os valores mínimos dos módulos sementes são os mesmos inseridos para início das retroanálises no BackMeDiNa e BAKFAA, já os valores intermediários e máximos, são sugeridos com base na Tabela 1 e na Tabela 2 e conhecimento dos valores usuais dos módulos.

As três variações de valores de módulos, mínimos, intermediários e máximos, são apresentados na Tabela 37. Estes valores são um ponto de partida para as retroanálises e, conforme os valores dos erros relativos admissíveis e erros RMS encontrados, devem ser simuladas novas variações de módulos para obter a bacia calculada mais próxima do valor medido em campo.

Tabela 37 - Intervalo dos módulos sementes utilizados nas retroanálises MEF.

Material	Mínimo (MPa)	Intermediário (MPa)	Máximo (MPa)
Asfalto	4000	7000	10000
Base	300	525	750
Sub-base	200	350	500
Subleito	100	175	250

Fonte: A autora (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

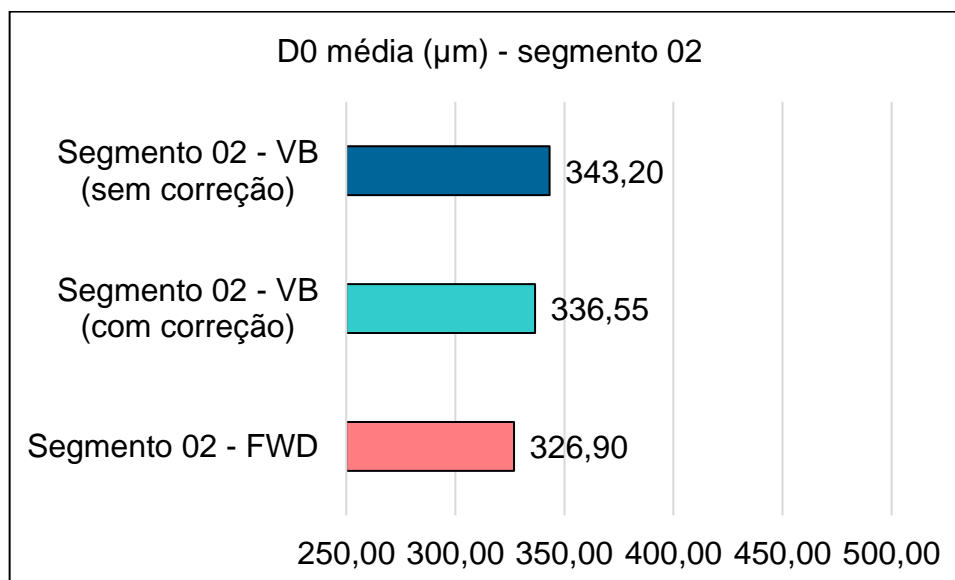
4.1 ANÁLISES DAS BACIAS DE DEFLEXÃO MEDIDAS EM CAMPO

4.1.1 Análises estatísticas descritivas dos dados das bacias de deflexão medidas em campo

Com o intuito de avaliar inicialmente as deflexões medidas nas bacias deflectométricas dos segmentos, na Figura 69 até a Figura 72 são ilustradas as deflexões médias dos trechos 02 e 04, para os ensaios FWD e VB.

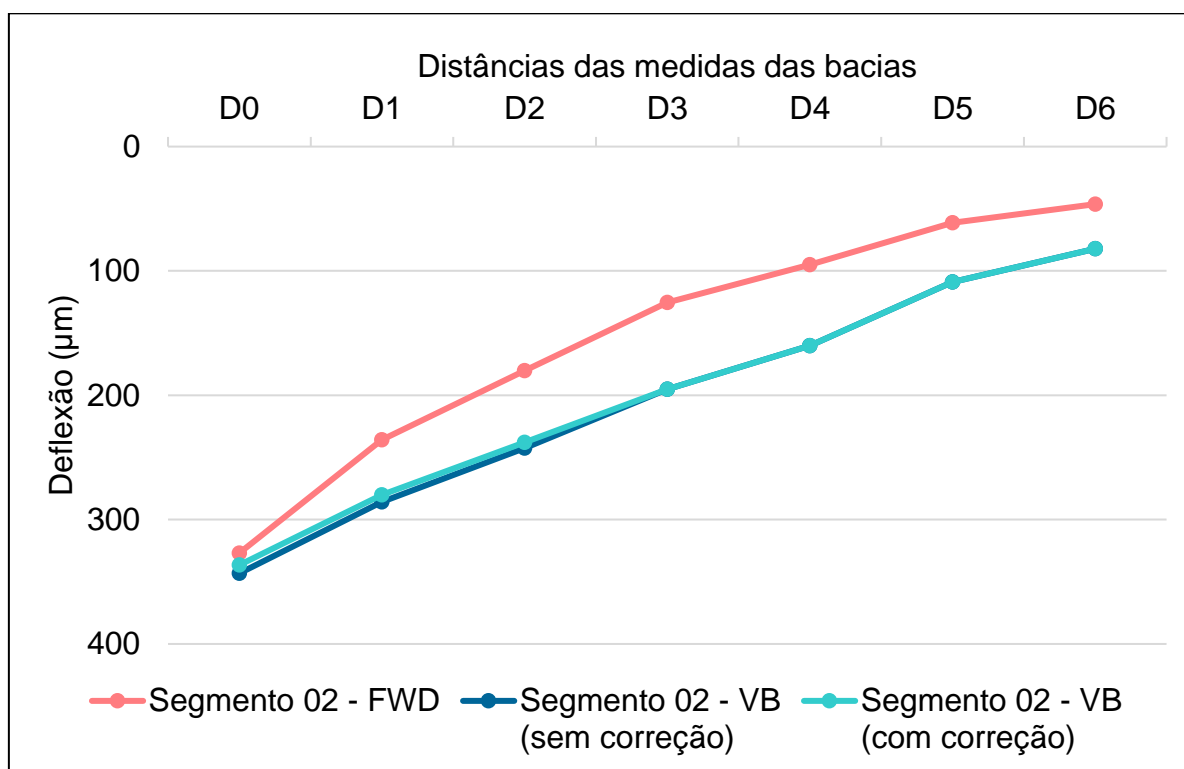
Percebem-se valores diferentes entre as leituras VB e FWD nos dois trechos. No segmento 02 (Figura 69 e Figura 70), as deflexões médias medidas pelo FWD são menores que as obtidas pela VB (aproximadamente 16,3 μm ao analisar D0), o que não acontece no segmento 04 (Figura 71 e Figura 72), onde os dados medidos pela VB são menores que os obtidos pelo FWD aproximadamente 176,9 μm em D0.

Figura 69 - Deflexão média D0 no segmento 02 para os ensaios FWD e VB.



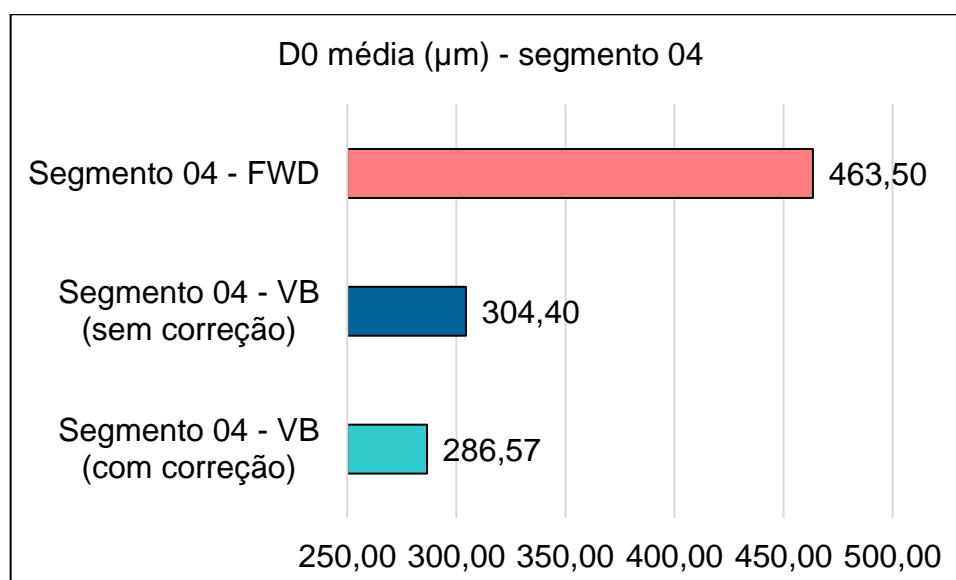
Fonte: A autora (2022).

Figura 70 - Plotagem da deflexão média D0 a D6 no segmento 02 para os ensaios FWD e VB.



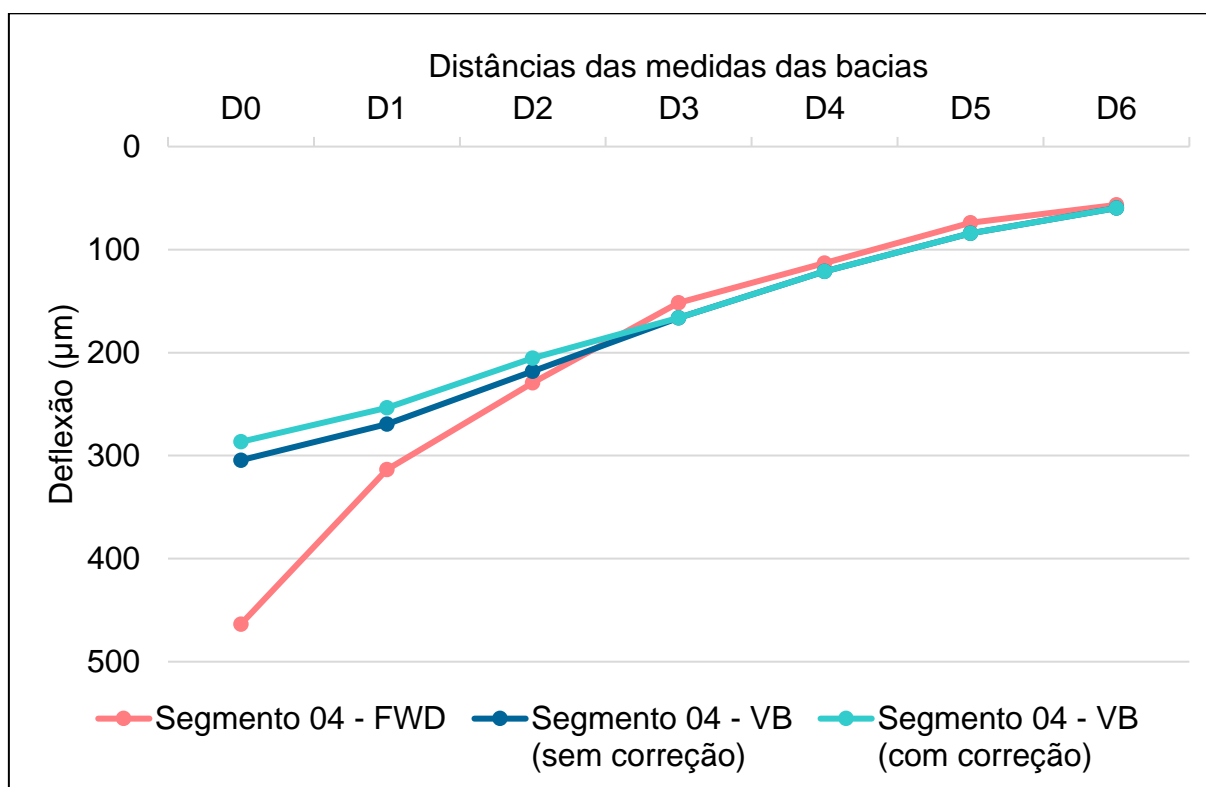
Fonte: A autora (2022).

Figura 71 - Deflexão média D0 no segmento 04 para os ensaios FWD e VB.



Fonte: A autora (2022).

Figura 72 - Plotagem da deflexão média D0 a D6 no segmento 04 para os ensaios FWD e VB.

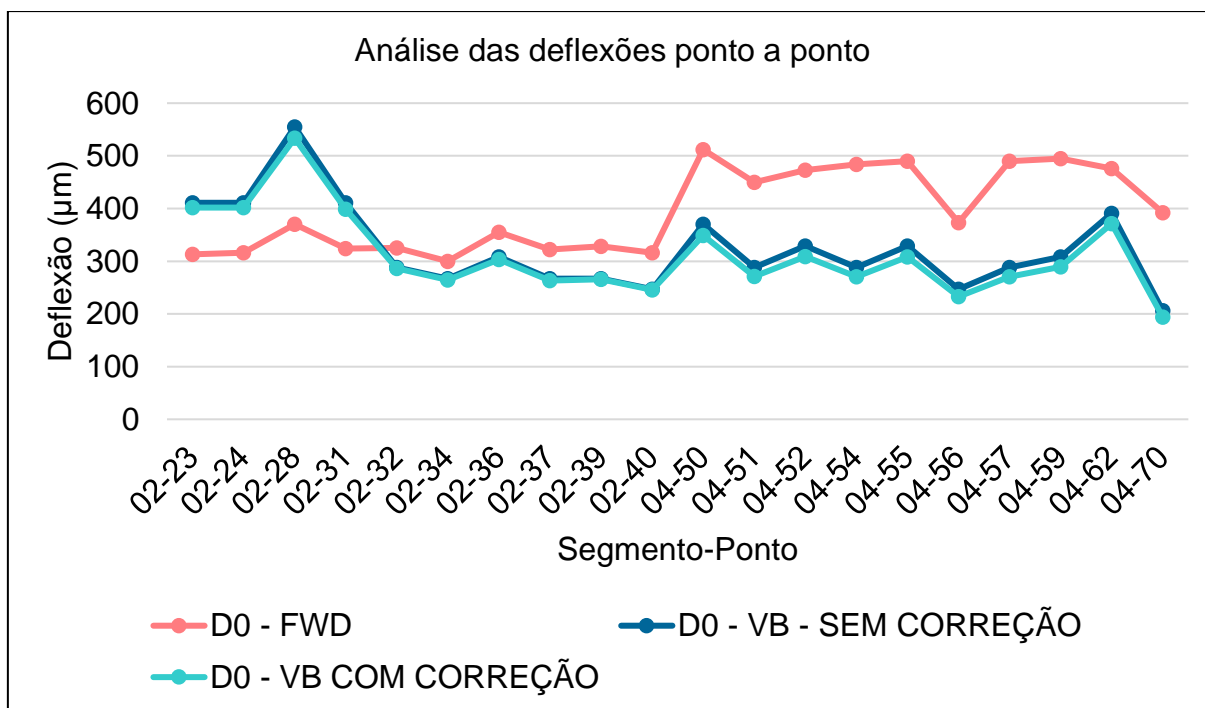


Fonte: A autora (2022).

Uma análise das deflexões nos pontos ensaiados é apresentada na Figura 73, onde percebe-se que as primeiras medidas do segmento 02 (pontos 23, 24, 28 e 31) são as únicas que apresentam as deflexões VB maiores que a FWD, e por serem bem discrepantes das demais, acabam influenciando no valor da deflexão média apresentada na Figura 69 e na Figura 70. De forma geral, com as deflexões VB menores que as medidas com o FWD, esperam-se resultados de módulos retroanalizados maiores quando utilizados os dados da VB.

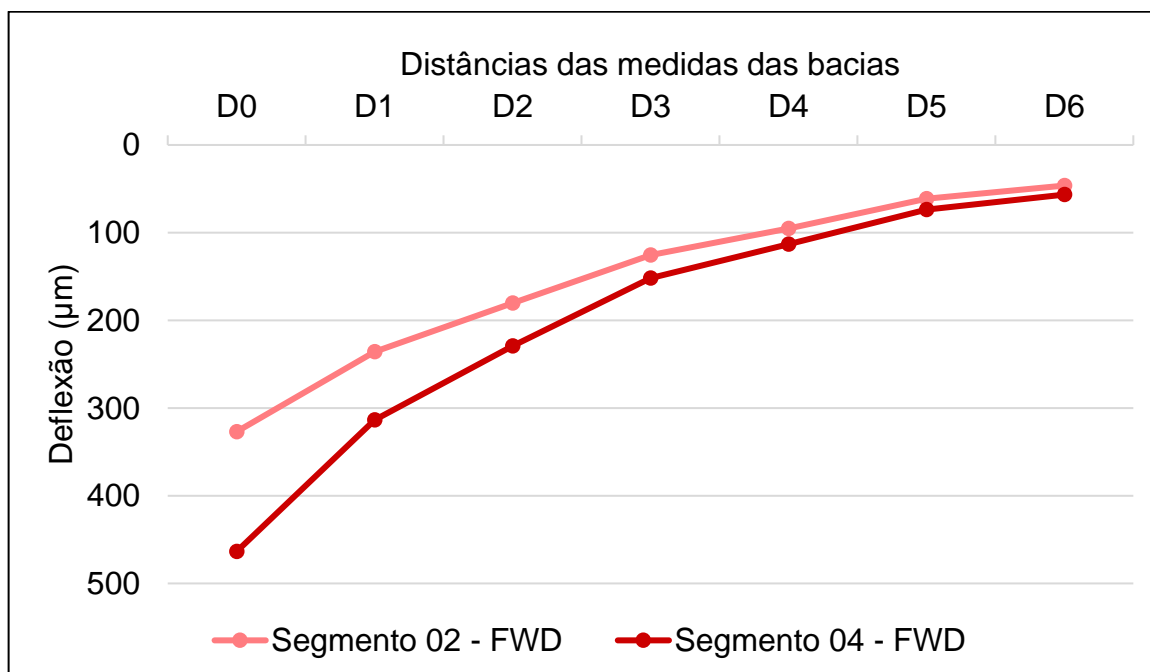
Ao analisar das bacias deflectométricas médias do equipamento FWD (Figura 74), o segmento 02 apresenta menores deflexões médias ao ser comparado com o segmento 04, justificativa atribuída ao fato de o pavimento neste trecho já estar consolidado (5 anos no momento dos ensaios).

Figura 73 - Comparação das deflexões D0 de VB e FWD ponto a ponto.



Fonte: A autora (2022).

Figura 74 - Bacias deflectométricas médias - ensaios FWD.

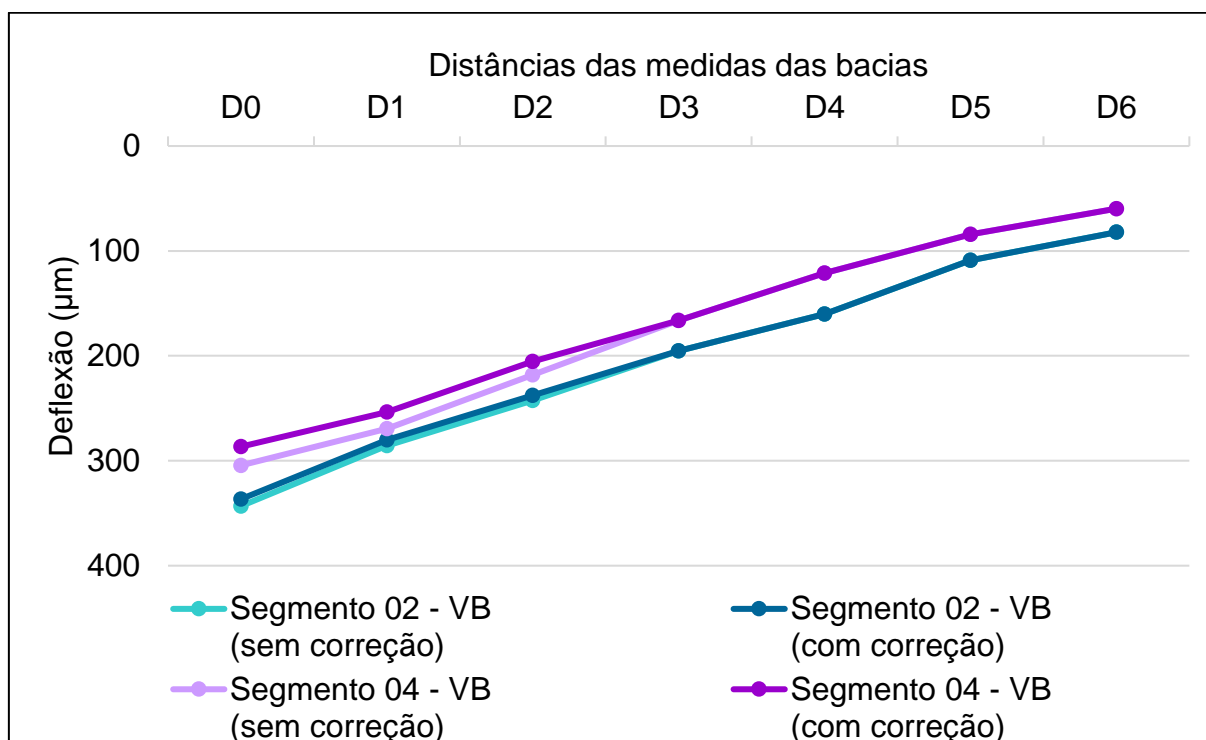


Fonte: A autora (2022).

Porém, esse comportamento diverge quando analisado os dados da VB, justificativa que pode ser atribuída a maior variação nas leituras em campo e maiores

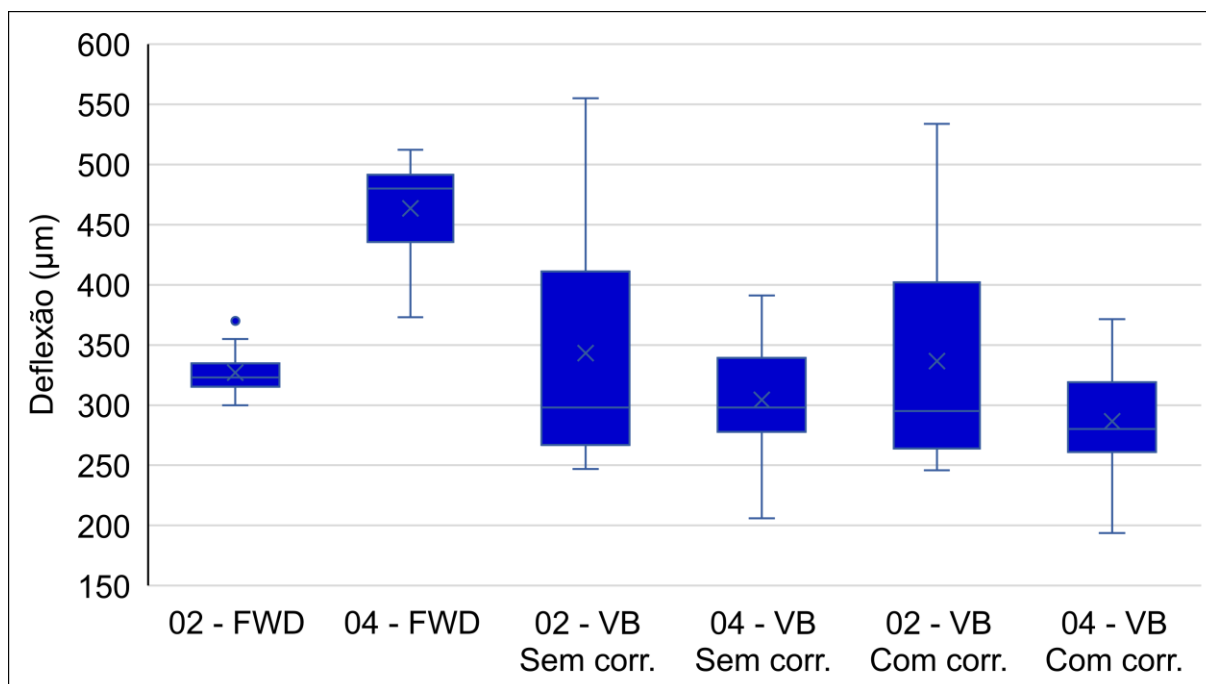
desvios padrões. Nesta comparação, o segmento 02 apresenta maiores deflexões médias ao ser comparado com o segmento 04, conforme ilustra a Figura 75.

Figura 75 - Bacias deflectométricas médias - ensaios VB.



Fonte: A autora (2022).

Com isso, foram plotadas as deflexões D0 dos ensaios VB e FWD em um gráfico *boxplot*, de forma a observar melhor o que ocorre nas medidas de deflexão D0. De acordo com a Figura 76, pode-se verificar que os dados do FWD atendem o esperado, com as deflexões do segmento 02 (2014) menores em relação ao 04 (2019), já ao avaliar os dados VB, com ou sem correção em relação à temperatura, observa-se a grande variação que ocorre nas medidas VB (quanto maior o tamanho da caixa no gráfico, maior a variação nos resultados), bem como valores médios maiores do segmento 02 em relação ao 04.

Figura 76 - *Boxplot* das medidas de deflexão.

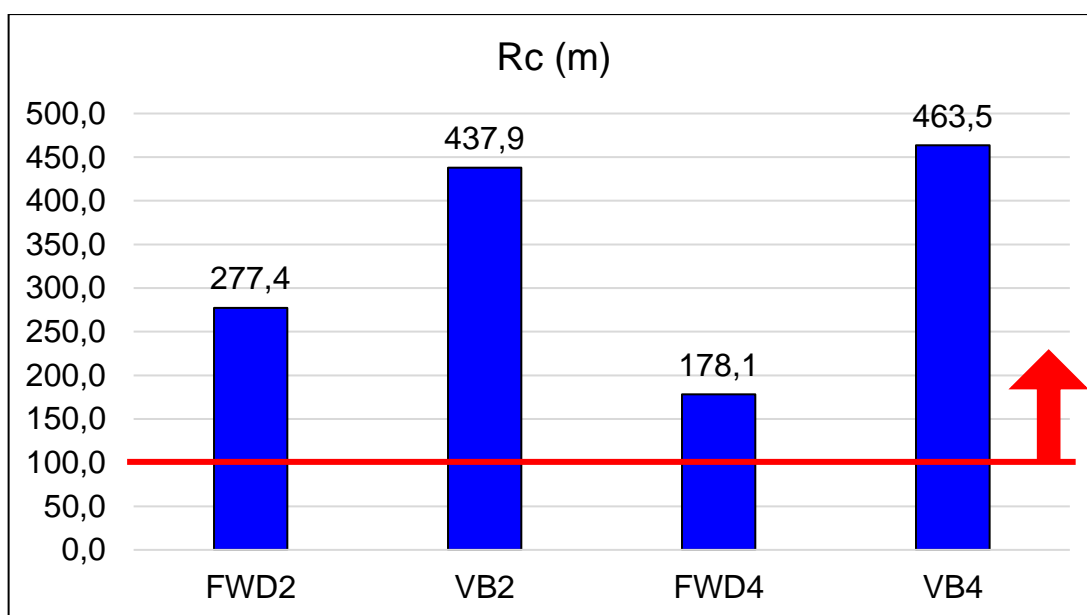
Fonte: A autora (2022).

4.1.2 Avaliação da condição estrutural do pavimento através dos parâmetros das bacias de deflexão medidas em campo

Como o foco das análises estruturais da pesquisa se detém nas medidas das bacias de deflexão, a avaliação das condições estruturais do pavimento através dos parâmetros das bacias é uma importante inferência inicial quanto a capacidade estrutural das camadas.

Ao aplicar a Equação 6 para obtenção do Raio de Curvatura (R_c) das bacias, utilizando os dados das bacias VB e FWD de campo medidas nos segmentos 02 e 04 foram obtidos os resultados apresentados na Figura 77. O valor de referência da literatura, como indicativo de boa qualidade estrutural do pavimento (Tabela 5, classificado como seguro), é o valor de R_c ser maior do que 100 metros. Em todas as análises o valor de R_c foi superior a 100 metros e, avaliando pontualmente os resultados do FWD, entendido ao longo da pesquisa como os valores de deflexão medidos mais confiáveis, o segmento 02 apresenta melhores resultados.

Figura 77 - Valores do parâmetro de bacia Rc.



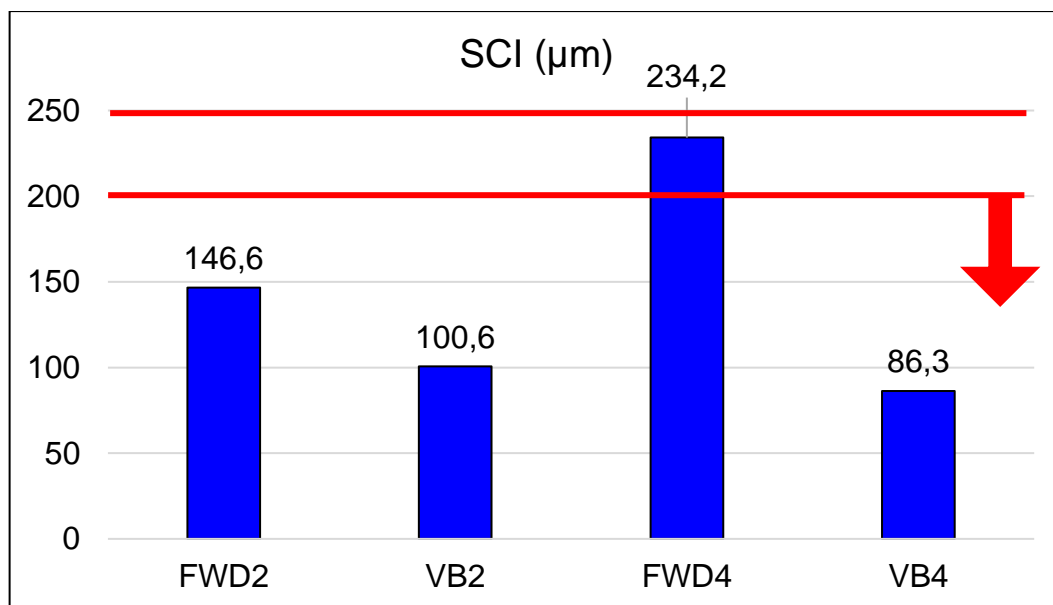
Fonte: A autora (2022).

Calculado através da Equação 7, os valores do Índice de Curvatura da Superfície (SCI), para os segmentos 02 e 04, com os dados VB e FWD de campo são apresentados na Figura 78. Os valores indicados na Tabela 5 como limite para esse índice no indicativo de um pavimento seguro são valores abaixo de 200 μm , porém há outras literaturas como Andrade, Vasconcelos e Bernucci (2016), Souza Júnior (2018) e Rocha (2020) *apud* Nery (2020) que apontam limite abaixo de 250 μm como bom indicador de qualidade.

Os valores obtidos para os segmentos 02 e 04 estão abaixo de 250 μm , porém o resultado do FWD 04 chegou em 234,2 μm que ao comparar com o indicador da Tabela 5 fica classificado como “em alarme”. Valores abaixo do limite estabelecido podem indicar que a camada de revestimento asfáltico é pouco resistente ou de pequena espessura, pois é muito deformável. Esse resultado é coerente, uma vez que, o segmento está em fase de consolidação das deflexões em razão do tráfego e tende a melhorar quando realizada uma nova medição no trecho.

Na análise do SCI, o segmento 02 apresentou melhores resultados.

Figura 78 - Valores do parâmetro de bacia SCI.

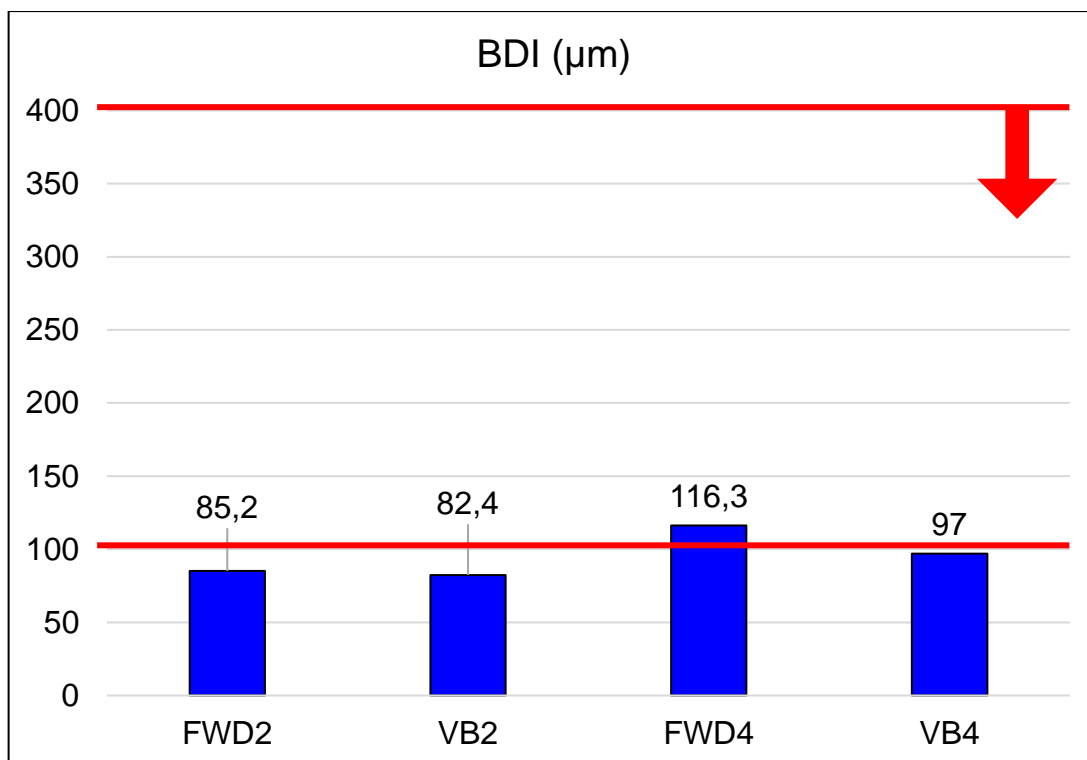


Fonte: A autora (2022).

Ao aplicar a Equação 8 encontram-se os valores do Índice de Danos a Base (BDI) que são ilustrados na Figura 79. O valor referência, conforme a Tabela 5, indicativo de segurança é um BDI menor do que 100 μm, porém é um valor bastante conservador, sendo mais coerente a análise com base nos valores propostos por Andrade, Vasconcelos e Bernucci (2016), Souza Júnior (2018) e Rocha (2020) *apud* Nery (2020) que apontam limite acima de 400 μm como bom indicador de qualidade e segurança. Partindo da referência de 400 μm todos os dois segmentos apresentam resultados satisfatórios e novamente o segmento 02 se sobrepõe ao 04.

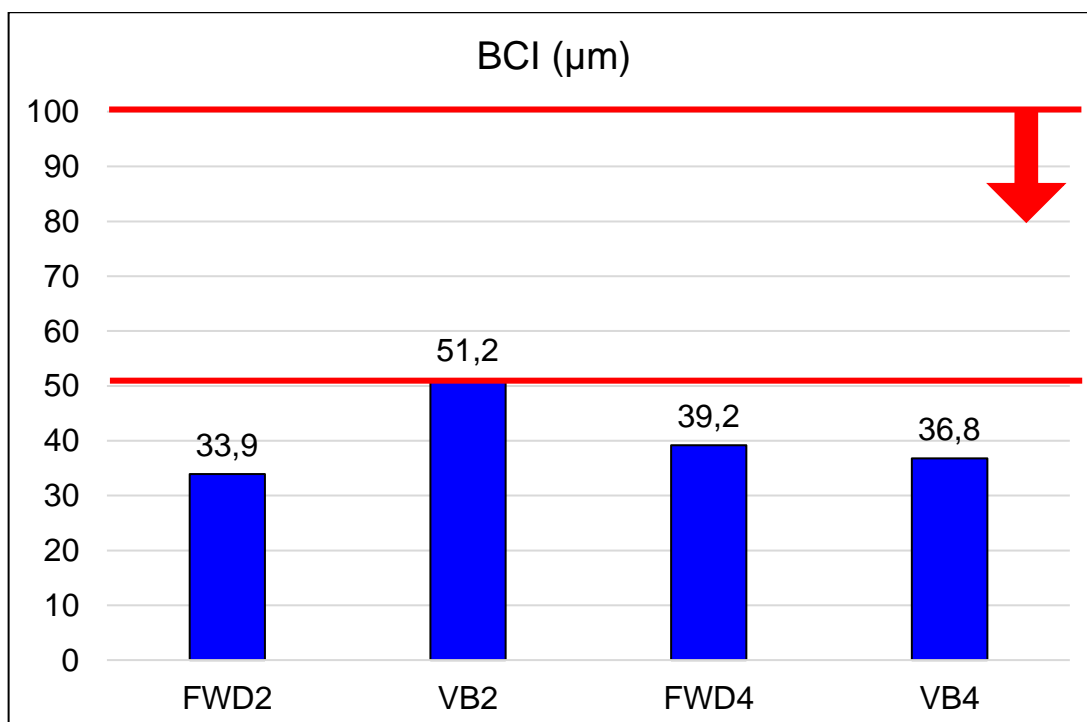
O próximo cálculo foi com base na Equação 9 que encontra o Índice de Curvatura da Base (BCI), conforme Figura 80. O valor de referência para esse índice de acordo com a Tabela 5 é apresentar um valor menor que 50 μm, porém dados menos conservadores dos autores supracitados indicam 100 μm como um bom indicador de qualidade e segurança do pavimento. Todos os resultados ficaram abaixo de 100 μm e apenas a medição VB do segmento 02 apresentou o valor de 51,2 μm, ficando muito próxima do limite mais conservador. O segmento 02 apresentou melhores indicadores de BCI ao comparar com o segmento 04.

Figura 79 - Valores do parâmetro de bacia BDI.



Fonte: A autora (2022).

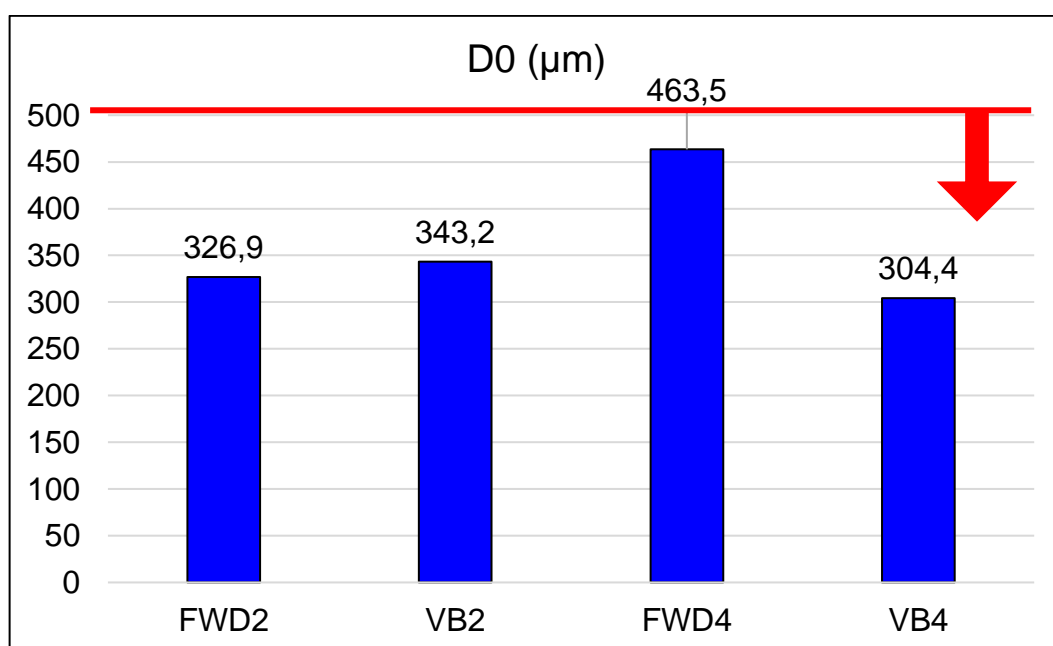
Figura 80 - Valores do parâmetro de bacia BCI.



Fonte: A autora (2022).

Por fim, foi realizada a análise nos dados da deflexão D0, que de acordo com os valores base da Tabela 5 devem ser menores que 500 μm para indicar um pavimento em boas condições estruturais, sendo que valores acima deste já são classificados em situações de alarme e severas. Os valores médios dessa análise estão na Figura 81, e apontam todas as medições abaixo de 500 μm , porém vale ressaltar que as medidas do ponto 28 na medição VB e 50 na medição FWD ficaram acima de 500 μm .

Figura 81 - Valores do parâmetro de bacia D0.



Fonte: A autora (2022).

De modo geral, os valores para o segmento 02 apresentaram melhores resultados quando comparados ao segmento 04, pois o segmento 04 estava em fase de consolidação das camadas no momento do ensaio de campo. Espera-se, portanto, comportamento semelhante na análise dos módulos resilientes equivalentes.

4.2 RETROANÁLISE ATRAVÉS DA TSCE - BACKMEDINA E BAKFAA

4.2.1 Retroanálise com o BackMeDiNa

Os resultados da retroanálise de todas as bacias, 20 do segmento 02 e 20 do segmento 04 (para VB e FWD), foram comparados com os valores da literatura e valores usuais da engenharia rodoviária para cada tipo de material.

Para a camada de revestimento asfáltico, também se tomou como base o ensaio realizado pelo LAPAV em 2019 (Laboratório de Pavimentação da Escola de Engenharia da UFRGS) e disponível no banco de dados da obra Estrada Rio do Morro, que apresenta para o segmento 04 os valores médios dos módulos de resiliência de três amostras, sendo eles 7338, 11111 e 7158 MPa.

O *software* repete a rotina de cálculo de retroanálise até obter o menor erro possível, porém em muitos casos encontrou-se valores irreais para os módulos das camadas (ao comparar com a literatura), embora as deflexões ficassem praticamente com 0 μm de diferença. Dessa forma, foi necessário realizar um processo mais interativo com o BackMeDiNa, em que foi decidido o momento da finalização da retroanálise para obtenção de valores adequados de módulos de cada material, respeitando o limite de 5% a 10% para o erro admissível sugerido pelo *software* (ficando sempre próximo a esse valor) e buscando ficar mais perto de 5 μm de diferença entre as medidas das bacias nos sensores mais próximos à aplicação da carga (D0, D1 e D2).

Foram admitidos erros acima de 5%, principalmente, devido a menor precisão das medidas de deflexão aferidas pelo equipamento VB.

O processo de retroanálise no BackMeDiNa foi mais lento para os dados da VB, pois os resultados das bacias (campo x calculadas) demoravam mais para convergir. De forma geral, os erros foram maiores do que 5%, pois havia um momento em que o *software* atingia um limite de erro e conforme fazia mais iterações, aumentavam os valores dos módulos de forma inconsistente, sem reduzir o erro de cálculo. Ao perceber essa tendência de valor do erro, a retroanálise foi refeita e interrompida assim que o *software* se aproximou do referido valor. Os valores de módulos com erros acima de 5% e abaixo de 10% indicam uma correlação razoável entre as bacias de campo e a retroanalizada.

O segmento 04 apresentou menores valores de módulo resiliente equivalente em comparação com o segmento 02. Isso ocorreu devido ao fato de o pavimento ser recente (implantação em 2019, sendo a medida das deflexões efetuada em menos de um ano após sua implantação) e os materiais ainda estarem em fase de consolidação das deflexões. Já o segmento 02 estava finalizado há cinco anos no momento dos ensaios.

Entre os valores encontrados para VB e FWD, em geral, os valores dos módulos resilientes equivalentes são maiores nos resultados da VB, isso deve-se ao fato de que há maior variabilidade nas deflexões aferidas com a VB.

Com isso, o passo 01 da Tabela 24 foi concluído. Foram registrados os resultados dos módulos resilientes equivalentes obtidos nessa primeira análise, que conforme o passo 02, serão utilizados como valores de referência para a base, sub-base e subleito, que não são materiais termossuscetíveis.

No APÊNDICE A são exibidos os módulos retroanalisados, sendo que na Tabela 49 são apresentados os módulos resilientes equivalentes do ensaio FWD, e na Tabela 50 os módulos resilientes equivalentes do ensaio VB, ambas para o segmento 02. Os módulos resilientes equivalentes do segmento 04, para o ensaio FWD e VB, são apresentados na Tabela 51 e na Tabela 52, respectivamente.

Com os registros dos módulos resilientes equivalentes sem nenhuma correção das deflexões em função da temperatura (Tabela 49 a Tabela 52 do APÊNDICE A), iniciou-se o passo 04 da Tabela 24.

Dessa forma, no APÊNDICE B são apresentadas as novas medidas das bacias de deflexão D0, D1 e D2, corrigidas pela Equação 15 para 25°C. Na Tabela 53 são contempladas as deflexões corrigidas do segmento 02 para os ensaios FWD e VB, e a Tabela 54 contém as mesmas informações, porém para o segmento 04. Os ensaios FWD foram realizados em temperaturas de campo entre 23°C e 27°C e geram variações nas medidas de deflexão (campo x corrigidas) entre 0,0% e 1,0% para os segmentos 02 e 04. Já os ensaios da VB foram efetivados em temperaturas de campo maiores, entre 26°C e 38,5°C, gerando variações nas medidas de deflexão (campo x corrigidas) entre 0,5% e 6,3% nos segmentos 02 e 04.

De acordo com Bueno *et al.* (2020), as correções foram realizadas apenas nas bacias com variações extremas de temperatura, ou seja, para esta pesquisa, apenas os resultados das deflexões medidas com a VB, que foram realizadas em dia com as temperaturas variando até 13,5°C em relação a referência de 25°C da Equação 15.

Para os segmentos 02 e 04 medidos pela VB, foram registrados os valores dos módulos resilientes equivalentes dos materiais granulares (base, sub-base e subleito) com os valores determinados pela retroanálise sem nenhuma correção das medidas de campo (Tabela 50 e Tabela 52 do APÊNDICE A). Com as bacias defletoométricas das distâncias D0, D1 e D2 corrigidas para temperatura de 25°C (Tabela 25), foi refeita a retroanálise no BackMeDiNa, com os mesmos módulos sementes e mantendo os erros próximos aos encontrados na etapa anterior, de forma a buscar considerar apenas a correção na rigidez da camada termossuscetível. A aplicação da correção das distâncias de Theisen *et al.* (2009) para os dados da VB também foi considerada.

Os novos valores dos módulos resilientes equivalentes para a camada de revestimento, nos ensaios VB são apresentados no APÊNDICE C. Na Tabela 55 e na Tabela 56 são registrados os módulos resilientes equivalentes gerados a partir das bacias defletoométricas com a temperatura corrigida em D0, D1 e D2 para o segmento 02 e 04, respectivamente.

Na Tabela 55, verifica-se que para o segmento 02, que tem temperaturas mais próximas à 25°C nos ensaios de campo, as variações nos módulos resilientes equivalentes do revestimento foram menores quando comparadas com o segmento 04 (Tabela 56), que chega a ter 13,5°C de variação em relação à referência de 25°C.

Ainda na Tabela 55, para o segmento 02, as variações no módulo final foram entre 1% e 12%, sendo 1% no ajuste do ponto 32 medido na temperatura de 26°C e 12% no ajuste do ponto 28 medido na temperatura de 33°C. Já na Tabela 56, para o segmento 04, observam-se variações foram maiores, entre 8% e 26%, sendo o valor médio dos resultados de 19% de ajuste nos valores dos módulos resilientes equivalentes.

Os valores de todos os módulos resilientes equivalentes dos pavimentos aumentaram, pois, quanto maior a temperatura, maiores as deflexões medidas e menor o valor do módulo. Então, quando realizado o ajuste para uma temperatura menor (25°C), as deflexões são corrigidas para valores menores e, consequentemente, o valor do módulo deve ser maior.

Dessa forma, os módulos finais das bacias defletoométricas retroanalizadas, apresentados na Tabela 38 e na Tabela 39, para o segmento 02 e 04, respectivamente, são os módulos resilientes equivalentes das bases, sub-bases e subleito obtidos pelas retroanálises sem nenhum ajuste de temperatura. Para o módulo dos revestimentos dos trechos medidos pelo FWD, será adotado os valores

sem ajustes de temperatura, devido a pequena variação entre o valor de campo e a referência de 25°C. Já para o módulo dos revestimentos medidos pela VB, será adotado o valor calculado com o ajuste das deflexões dos pontos D0, D1 e D2.

Tabela 38 - Valores finais dos módulos resilientes equivalentes do segmento 02 - BackMeDiNa.

Módulo resiliente equivalente (MPa) - segmento 02					
Ponto	Ensaio	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
23	FWD	13045	1041	695	224
24	FWD	12061	949	634	221
28	FWD	11214	861	575	175
31	FWD	10549	801	548	242
32	FWD	12664	985	666	213
34	FWD	13297	996	699	218
36	FWD	10295	772	485	233
37	FWD	10940	830	545	239
39	FWD	12061	938	635	229
40	FWD	13131	1033	699	218
23	VB	12839	925	616	105
24	VB	8976	642	443	127
28	VB	9424	642	443	71
31	VB	10262	734	426	114
32	VB	17054	1309	875	151
34	VB	14498	1085	725	138
36	VB	17470	1309	875	140
37	VB	13705	1028	510	196
39	VB	12513	949	634	163
40	VB	17925	1345	931	165

Fonte: A autora (2022).

Tabela 39 - Valores finais dos módulos resilientes equivalentes do segmento 04 - BackMeDiNa.

Módulo resiliente equivalente (MPa) - segmento 04					
Ponto	Ensaio	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
50	FWD	5100	492	362	177
51	FWD	5184	506	473	201
52	FWD	7245	544	380	169
54	FWD	6900	518	362	179
55	FWD	5916	517	419	177
56	FWD	9000	683	473	236
57	FWD	7658	597	402	152
59	FWD	6641	544	362	173
62	FWD	7658	589	402	156
70	FWD	7717	657	548	198

Módulo resiliente equivalente (MPa) - segmento 04					
Ponto	Ensaio	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
50	VB	11314	810	238	154
51	VB	14660	971	587	149
52	VB	12061	799	532	155
54	VB	10940	744	337	204
55	VB	11487	725	483	161
56	VB	12061	820	548	222
57	VB	13962	904	604	161
59	VB	13210	833	555	153
62	VB	12544	781	538	113
70	VB	15070	1223	816	244

Fonte: A autora (2022).

4.2.2 Retroanálise com o BAKFAA

Assim como para o BackMeDiNa, os dados das bacias deflectométricas medidas em campo com o equipamento FWD foram inseridos no *software* sem nenhum ajuste, com os dados de deflexão, carga e diâmetro do prato de aplicação da carga da Tabela 45 (segmento 02) e da Tabela 46 (segmento 04) do ANEXO B. Os dados das bacias deflectométricas medidos com a VB foram inseridos com os ajustes de carregamento da Tabela 22 (segmento 02) e da Tabela 23 (segmento 04), e demais dados de magnitude da carga e diâmetro do prato de aplicação da carga.

Foi realizada a retroanálise com o acionamento do botão “*backcalculate*” até que o erro parasse de diminuir, momento em que os módulos resilientes equivalentes foram extraídos. Caso o botão continuasse sendo acionado, o erro ia aumentando e os módulos eram levados à valores inconsistentes. Os erros calculados dentro do BAKFAA são referentes ao RMS de valor absoluto.

Os valores dos módulos resilientes equivalentes para o passo 01 da Tabela 24, foram registrados e são utilizados como referência para a base, sub-base e subleito, que não são materiais termossuscetíveis. No APÊNDICE D são apresentados os valores retroanalizados para os módulos dos segmentos 02 e 04. Para o segmento 02, na Tabela 57 e na Tabela 58 são registrados os módulos resilientes equivalentes retroanalizados através dos dados dos ensaios FWD e VB, respectivamente. Já na Tabela 59 e na Tabela 60 são contemplados os resultados dos módulos resilientes equivalentes do segmento 04, para os ensaios FWD e VB, respectivamente.

Um ponto relevante é a forma de ajuste das bacias, pois ela ocorre uniformemente para todas as camadas, seguindo um padrão de variabilidade dos

dados de deflexão, que pode ser observado através do coeficiente de variação (CV), calculado na Tabela 57, Tabela 58, Tabela 59 e Tabela 60 do APÊNDICE D, em relação aos valores dos módulos. Os valores de CV são de 6,24% e 22,96%, para os módulos de todas as camadas do segmento 02, nas retroanálises com o FWD e VB, respectivamente. O segmento 04, retroanalísado com os dados FWD, possui um CV de 11,36%, enquanto, os módulos retroanalísados com os dados VB resultam em um CV de 19,12% para todas as camadas.

Seguindo a estratégia adotada na análise do BackMeDiNa, ao iniciar o passo 04 da Tabela 24, as correções de temperatura foram aplicadas apenas nos dados de deflexão D0, D1 e D2 da VB, pois apresentam maiores variações quando comparados a temperatura padrão de 25°C da Equação 15. Para iniciar a nova retroanálise no BAKFAA, foram considerados os mesmos dados de entrada anteriores, apenas com a consideração dos valores das deflexões ajustados para temperatura padrão, de forma a obter o valor do módulo corrigido para a camada de revestimento.

No APÊNDICE E são apresentados os resultados dos módulos resilientes equivalentes para a camada de revestimento, com base nos valores das medidas de deflexão da VB corrigidos para temperatura padrão. Na Tabela 61 são exibidos os módulos retroanalísados referentes ao segmento 02, e na Tabela 62, os módulos do segmento 04.

Ao comparar os módulos retroanalísados para a camada de revestimento, com e sem ajuste da temperatura nas medidas de deflexão, na Tabela 61, que apresenta os resultados dos módulos do segmento 02, pode-se verificar que as variações no módulo final foram entre 0% e 4%, sendo 0% nos pontos 32 e 40 (medidos na temperatura de 26°C) e 4% no ponto 34 (medido na temperatura de 27°C). Por sua vez, na Tabela 62, observam-se variações foram entre 4% e 6%, sendo 4% nos pontos 50, 51 e 62 (medidos nas temperaturas 37°C, 37,5°C e 35,5°C, respectivamente), e 6% nos pontos 52 e 55 (medidos nas maiores temperaturas de 38°C e 38,5°C, respectivamente).

Observando os resultados supracitados, no segmento 02, que tem temperaturas mais próximas à 25°C, as variações nos módulos resilientes equivalentes do revestimento foram menores em relação ao segmento 04.

De forma geral, pode-se identificar que os erros RMS admitidos no BAKFAA, dispostos nos APÊNDICE D e E, são maiores do que os encontrados pelo

BackMeDiNa, dispostos nos APÊNDICE A e C. A magnitude dessas diferenças será discutida mais adiante.

Ainda observando os resultados apresentados nos APÊNDICES A, C, D e E, assim como no BackMeDiNa, os maiores erros foram encontrados nas retroanálises do BAKFAA com os dados VB, que se justifica pela menor precisão das medidas de deflexão do equipamento.

No BackMeDiNa o segmento 04 apresentou menores valores de módulo resiliente equivalente devido as deflexões terem sido medidas quando o pavimento estava em fase de consolidação. No BAKFAA, quando a análise é feita com os dados FWD, encontra-se o mesmo comportamento, porém ao analisar os módulos gerados pelos dados VB, os valores para o segmento 04, ao contrário do esperado, ficam ligeiramente maiores.

Entre os valores encontrados para VB e FWD no BAKFAA, no segmento 04, os valores dos módulos resilientes equivalentes são maiores nos resultados da VB. Já no segmento 02, os valores dos módulos FWD são maiores devido ao comportamento inesperado da retroanálise dos dados da VB, pois almejava-se que, assim como no BackMeDiNa, os valores de VB fossem maiores devido a maior variabilidade nas deflexões aferidas com a VB em campo.

Sendo assim, os valores finais dos módulos para as bacias deflectométricas retroanalizadas são apresentados na Tabela 40 (segmento 02) e na Tabela 41 (segmento 04). Para o FWD, os módulos resilientes equivalentes do revestimento, base, sub-base e subleito são os obtidos pelas retroanálises sem nenhum ajuste de temperatura. Para os dados VB, os módulos resilientes equivalentes da base, sub-base e subsolo são os obtidos pelas retroanálises sem nenhum ajuste de temperatura, enquanto o do revestimento será adotado o valor calculado com o ajuste das deflexões dos pontos D0, D1 e D2.

Tabela 40 - Configuração final dos módulos resilientes equivalentes do segmento 02
- BAKFAA.

Módulo resiliente equivalente (MPa) - segmento 02					
Ponto	Ensaio	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
23	FWD	10712,06	803,37	535,62	267,74
24	FWD	10294,08	772,02	514,72	257,29
28	FWD	8520,84	639,05	426,03	212,96
31	FWD	9991,34	749,33	499,57	249,73

Módulo resiliente equivalente (MPa) - segmento 02					
Ponto	Ensaio	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
32	FWD	10091,25	756,82	504,57	252,23
34	FWD	10397,02	779,74	519,87	259,86
36	FWD	9412,31	705,90	470,62	235,25
37	FWD	10192,16	764,38	509,62	254,75
39	FWD	10192,16	764,38	509,62	254,75
40	FWD	10397,02	779,74	519,87	259,86
23	VB	6075,13	446,66	297,79	148,88
24	VB	6259,21	464,80	309,88	154,92
28	VB	4162,42	309,09	206,06	103,03
31	VB	5780,28	424,98	283,33	141,66
32	VB	8520,84	639,05	426,03	212,96
34	VB	8027,01	578,52	385,69	192,81
36	VB	8188,36	608,03	405,36	202,64
37	VB	9135,49	664,99	443,33	221,61
39	VB	8436,47	626,45	417,63	208,76
40	VB	9135,49	685,14	456,77	228,33

Fonte: A autora (2022).

Tabela 41 - Configuração final dos módulos resilientes equivalentes do segmento 04
- BAKFAA.

Módulo resiliente equivalente (MPa) - segmento 04					
Ponto	Ensaio	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
50	FWD	6710,71	503,30	335,55	167,74
51	FWD	7713,79	578,52	385,69	192,81
52	FWD	6983,19	523,73	349,17	174,55
54	FWD	6983,19	523,73	349,17	174,55
55	FWD	7053,02	528,97	352,66	176,29
56	FWD	9226,85	691,99	461,34	230,61
57	FWD	6777,82	508,33	338,90	169,42
59	FWD	6983,19	523,73	349,17	174,55
62	FWD	6845,60	513,41	342,29	171,11
70	FWD	8436,47	632,72	421,81	210,85
50	VB	6644,27	478,88	319,27	159,61
51	VB	7947,53	572,79	381,87	190,90
52	VB	7947,53	561,51	374,35	187,14
54	VB	8520,84	608,03	405,36	202,64
55	VB	7868,84	555,95	370,65	185,28
56	VB	9991,34	712,96	475,33	237,60
57	VB	8606,05	614,11	409,41	204,66
59	VB	8027,01	572,79	381,87	190,90
62	VB	6135,88	442,24	294,94	147,41
70	VB	11832,76	844,35	562,95	281,40

Fonte: A autora (2022).

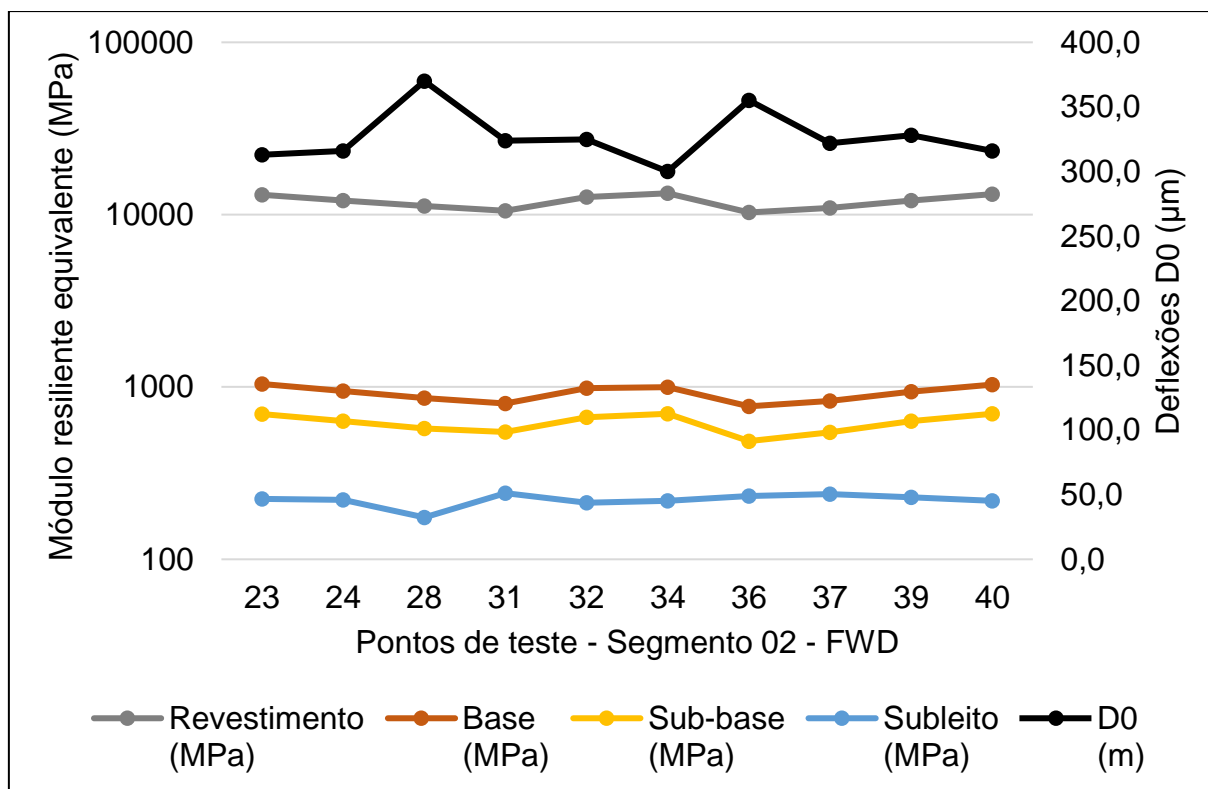
4.2.3 Análises estatísticas descritivas dos módulos retroanalizados e discussão dos resultados

4.2.3.1 Módulos resilientes equivalentes retroanalizados no BackMeDiNa

Os módulos resilientes equivalentes para as quatro camadas (revestimento, base, sub-base e subleito) foram plotados na Figura 82 até a Figura 85, juntamente com a representação da deflexão D0 dos pontos dos segmentos 02 e 04 para os resultados do BackMeDiNa. Na Figura 82 são representados os módulos resilientes equivalentes do segmento 02 retroanalizados com base nos dados de deflexão FWD, e na Figura 83, os módulos resilientes equivalentes, ainda para o segmento 02, mas com base nos dados de deflexão VB. Já na Figura 84 e na Figura 85, são plotados os resultados dos módulos resilientes equivalentes do segmento 04, obtidos na retroanálise dos dados de deflexão FWD e VB, respectivamente.

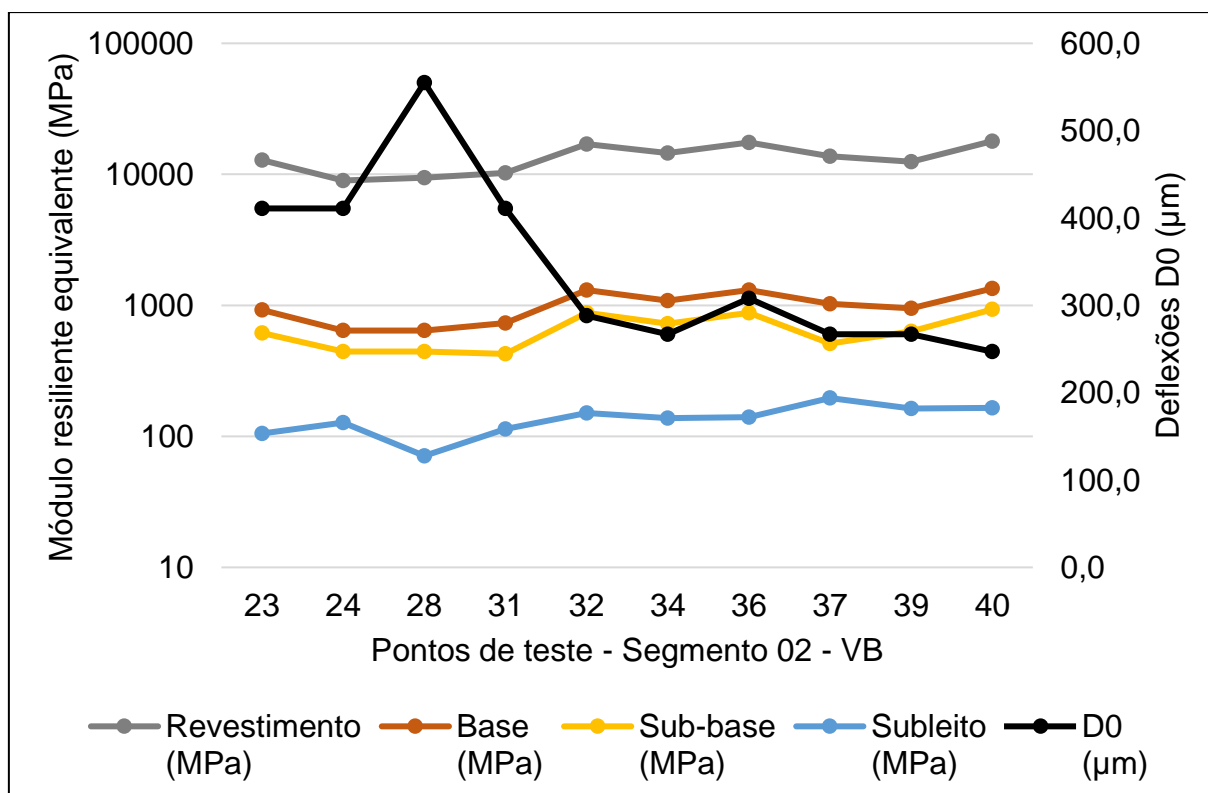
Ao analisar os valores dos módulos plotados na Figura 82 à Figura 85, juntamente com a curva da deflexão D0, confirma-se que para menores valores de deflexão, encontram-se maiores valores de módulo de resiliência, como é o caso dos pontos 34 (Figura 82), 40 (Figura 83), 56 (Figura 84) e 70 (Figura 85). A situação contrária também se confirma, podendo ser observada nos pontos 28 (Figura 82), 28 (Figura 83), 50 (Figura 84) e 62 (Figura 85) onde maiores deflexões geram rigidezes menores. O mesmo comportamento também foi obtido na pesquisa de Bueno (2016) e Vieira (2020). Nery (2020) que trabalhou com os mesmos dados de deflexão, também obteve resultados semelhantes.

Figura 82 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 02 - FWD - BackMeDiNa.



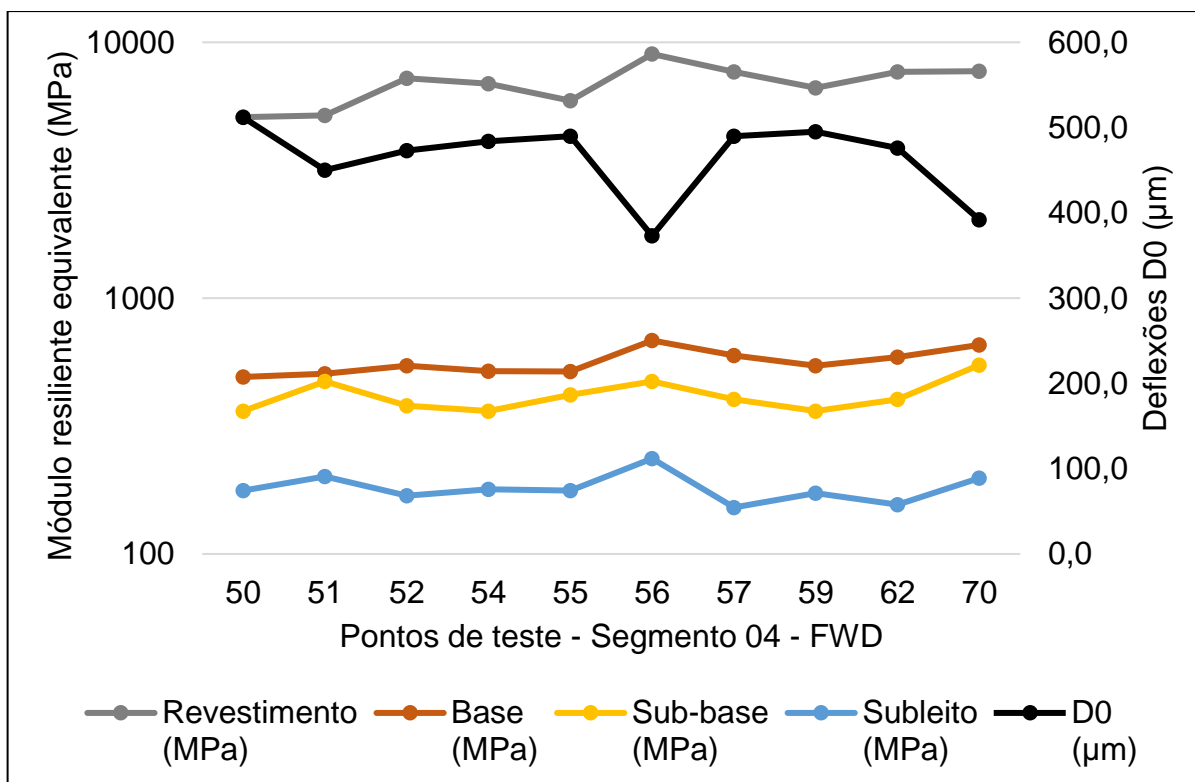
Fonte: A autora (2022).

Figura 83 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 02 - VB - BackMeDiNa.



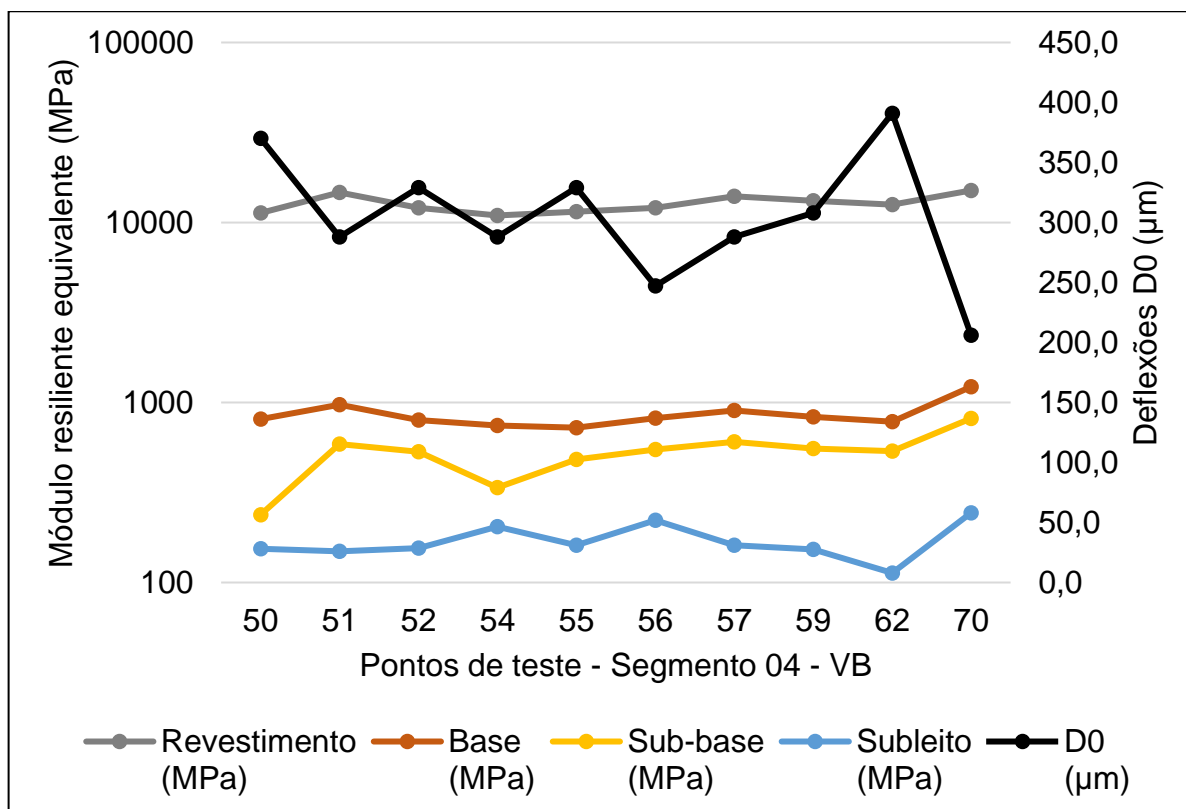
Fonte: A autora (2022).

Figura 84 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 04 - FWD - BackMeDiNa.



Fonte: A autora (2022).

Figura 85 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 04 - VB - BackMeDiNa.



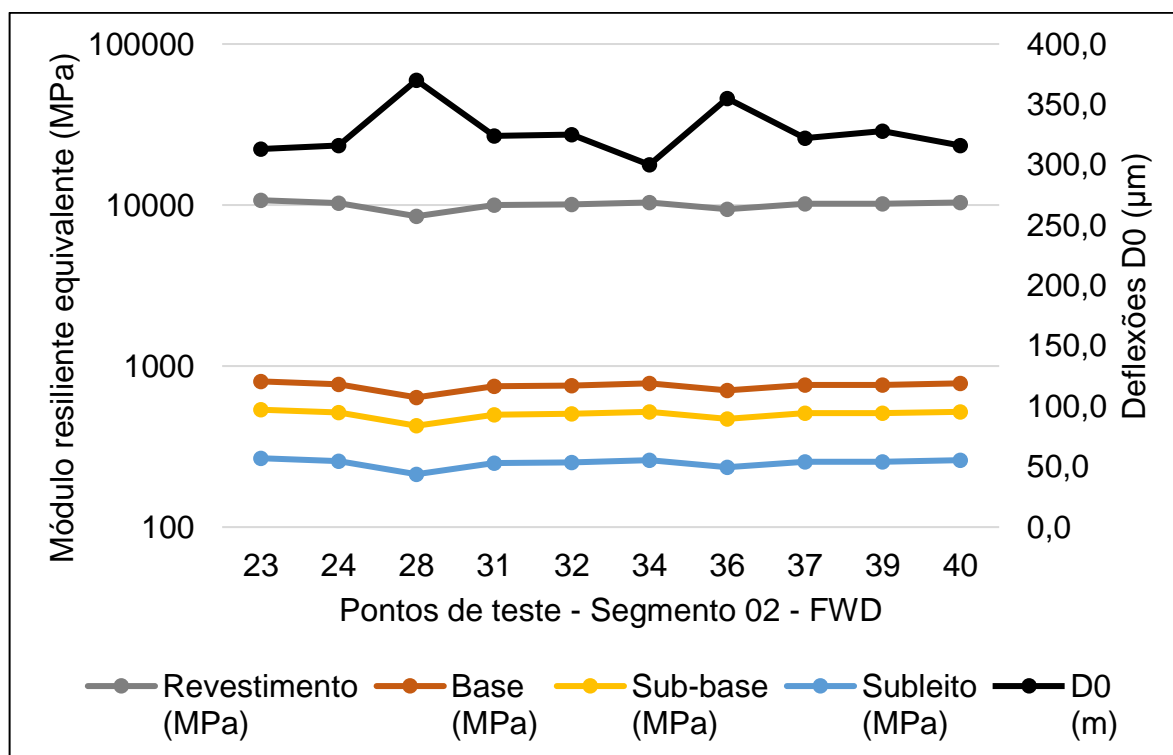
Fonte: A autora (2022).

4.2.3.2 Módulos resilientes equivalentes retroanalizados no BAKFAA

Na sequência, na Figura 86 até a Figura 89, são apresentados os módulos resilientes equivalentes retroanalizados através do *software* BAKFAA, juntamente com a representação da deflexão D0. Na Figura 86 e na Figura 87 são ilustrados os módulos resilientes equivalente para o segmento 02, retroanalizados com os dados de deflexão dos ensaios FWD e VB, respectivamente. Na Figura 88 e na Figura 89 são plotados os valores dos módulos resilientes equivalentes do segmento 04, obtidos na retroanálise com os dados dos ensaios FWD e VB, respectivamente.

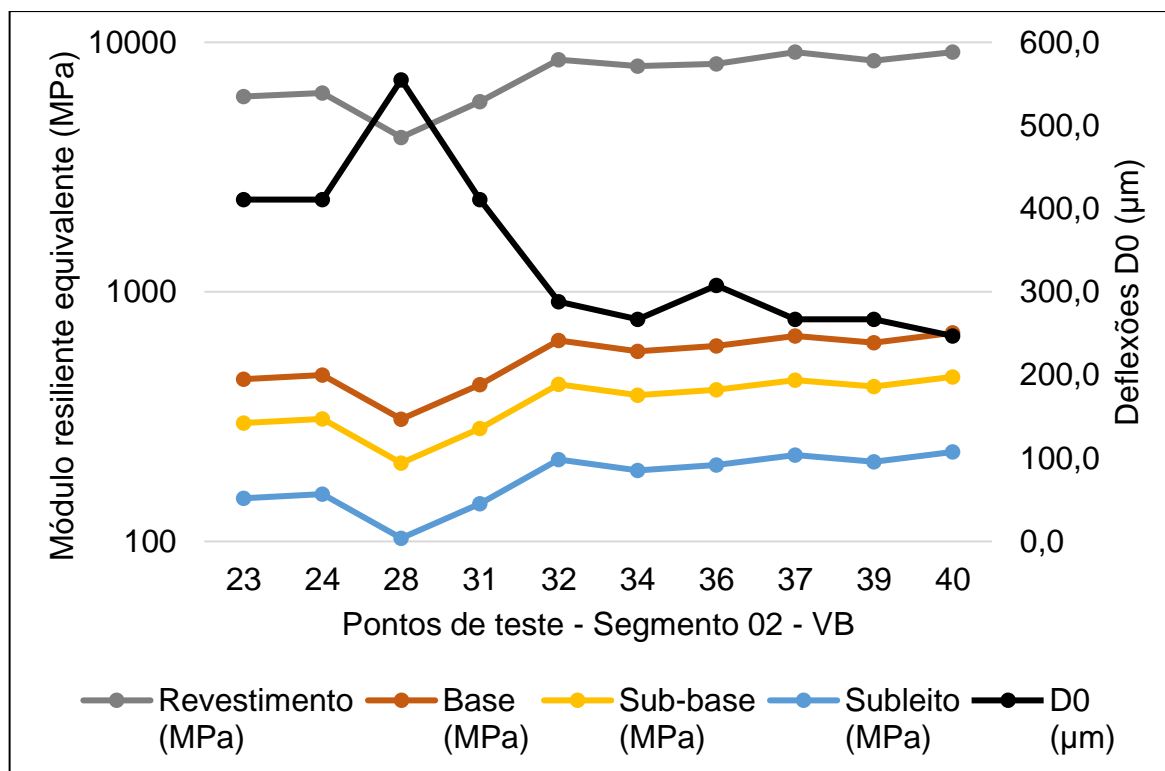
Os valores dos módulos obtidos para as camadas de revestimento, base, sub-base e subleito no BAKFAA, nos pontos de ensaio, quando plotados na Figura 86 à Figura 89, apresentam os gráficos dos módulos com a mesma tendência e delineamento. Isso acontece, pois o BAKFAA gera coeficientes de variação (CV) iguais para todas as camadas, ao inferir os módulos sementes e as deflexões teóricas, o *software* inicia a retroanálise de modo que a bacia plotada permaneça sempre constante.

Figura 86 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 02 - FWD - BAKFAA.



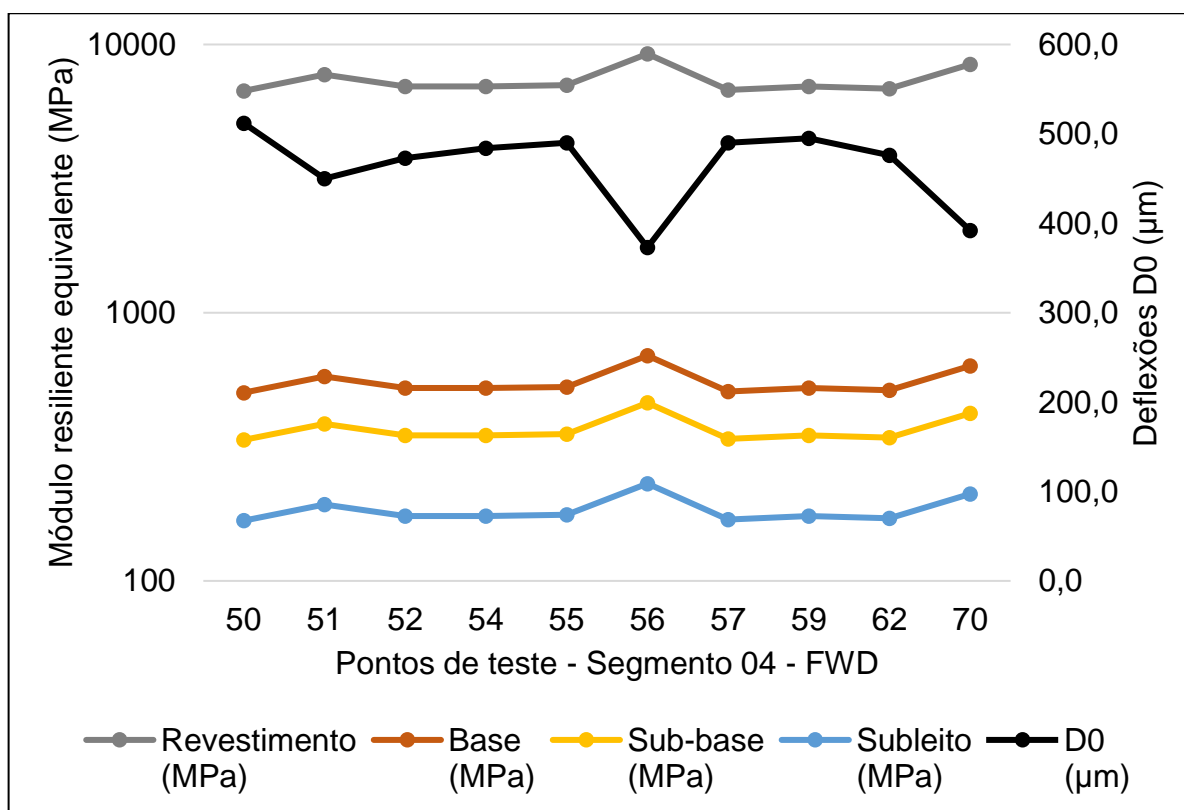
Fonte: A autora (2022).

Figura 87 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 02 - VB - BAKFAA.



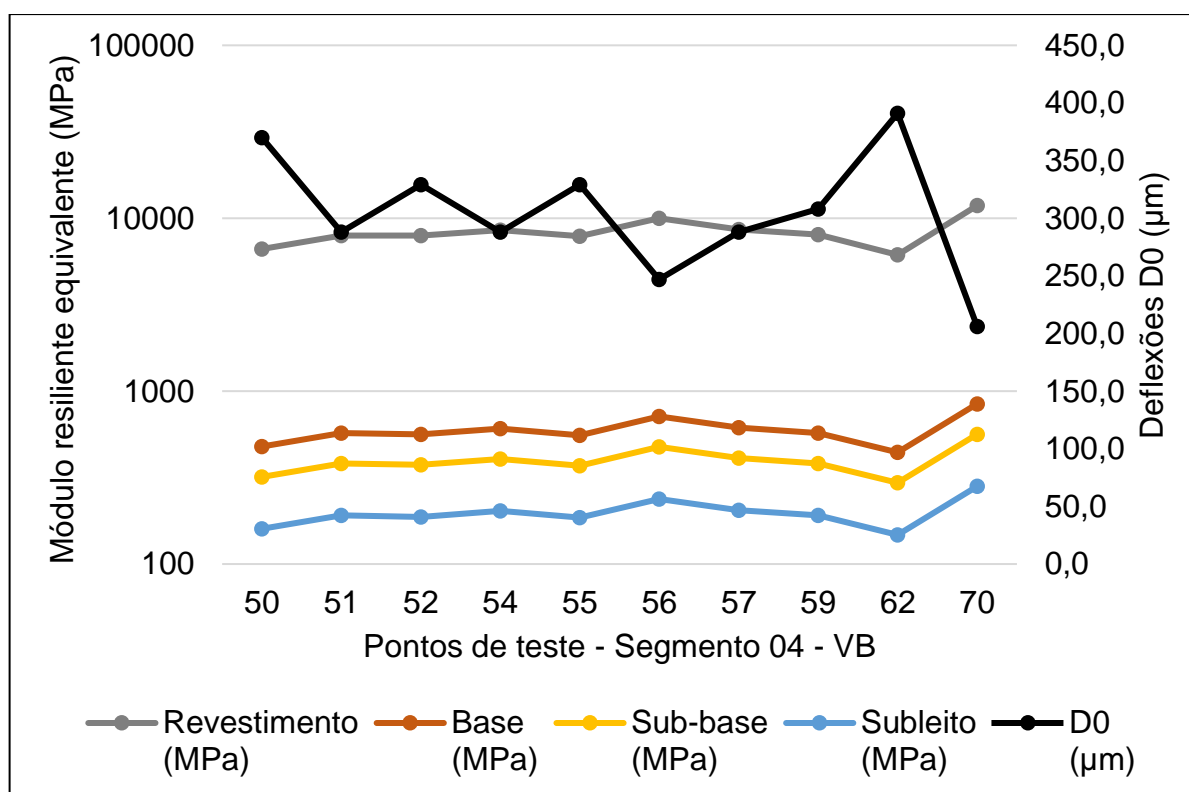
Fonte: A autora (2022).

Figura 88 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 04 - FWD - BAKFAA.



Fonte: A autora (2022).

Figura 89 - Módulos resilientes equivalentes - Segmento 04 - VB - BAKFAA.

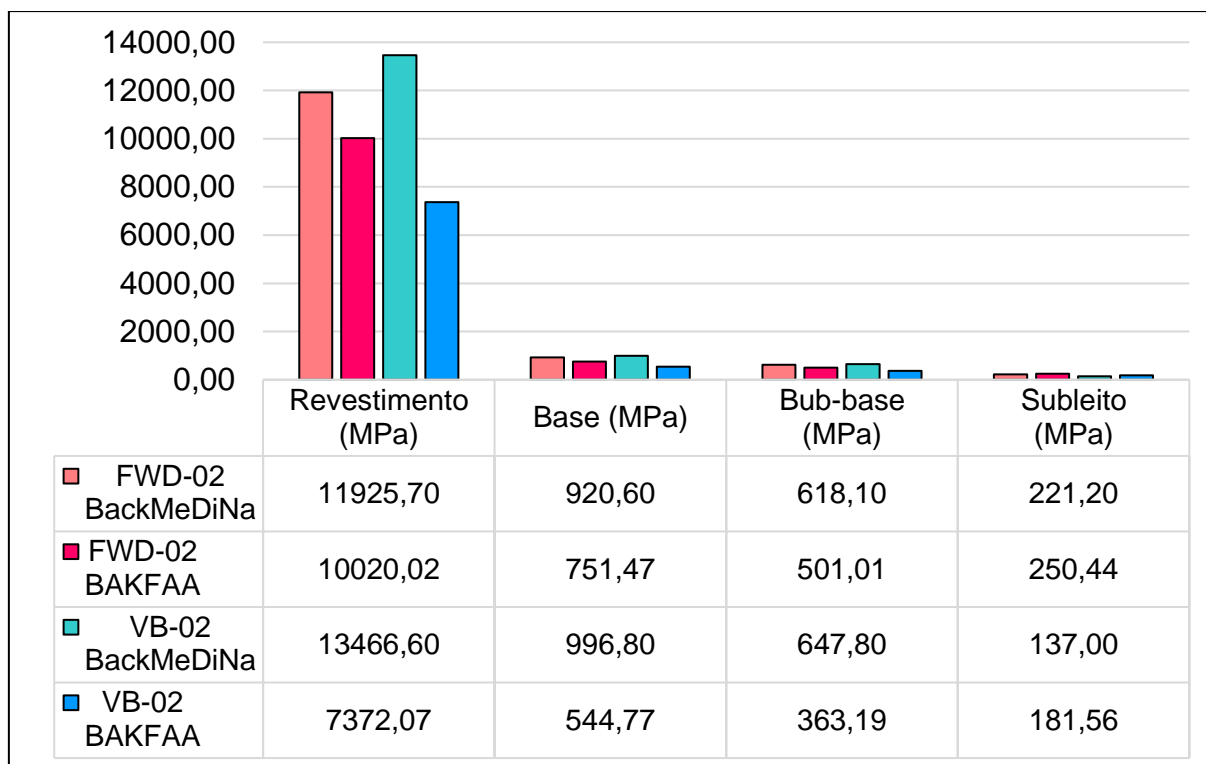


Fonte: A autora (2022).

4.2.3.3 Módulos resilientes equivalentes retroanalizados no BackMeDiNa versus BAKFAA - Segmento 02

Na Figura 90 é ilustrada a média dos módulos resilientes equivalentes do segmento 02 para cada camada nos ensaios VB e FWD, nos dois *softwares*. Os valores dos módulos do BackMeDiNa são, em média, 22% maiores que os módulos do BAKFAA para os dados FWD nas camadas de revestimento, base e sub-base. Já ao analisar os dados VB, encontra-se o principal ponto de diferença entre os resultados, onde os módulos do BackMeDiNa chegam a ser, em média, 81% maiores do que o BAKFAA. Apenas a camada de subleito apresentou módulo maior no BAKFAA.

Figura 90 - Módulos resilientes equivalentes médios - Segmento 02.



Fonte: A autora (2022).

Ao verificar a Tabela 49, a Tabela 50 e a Tabela 55, já apresentadas nos APÊNDICES A e C, com os resultados dos módulos resilientes equivalentes retroanalizados no BackMeDiNa, observa-se para o segmento 02, que os erros RMS são, em média, 4,27 μm na retroanálise com os dados do FWD e 7,93 μm com dados da VB.

Já na retroanálise dos módulos resilientes equivalentes com o BAKFAA, disposta na Tabela 57, na Tabela 58 e na Tabela 61, já apresentadas nos APÊNDICES D e E, a média é de 11,36 μm na retroanálise com os dados do FWD e 17,07 μm com os dados da VB. Porém, apesar de maiores erros RMS, os desvios padrões e coeficientes de variação do BAKFAA são menores quando comparados ao BackMeDiNa (exceto para as medidas da VB no subleito). Em ambos os *softwares*, os resultados com base nos dados da VB são os com maiores erros e variabilidade nos resultados.

No APÊNDICE F estão representados os gráficos *boxplot* dos módulos do revestimento (Figura 112), base (Figura 113), sub-base (Figura 114) e subleito (Figura 115), para o segmentos 02, e ilustram de forma mais evidente as conclusões apresentadas anteriormente:

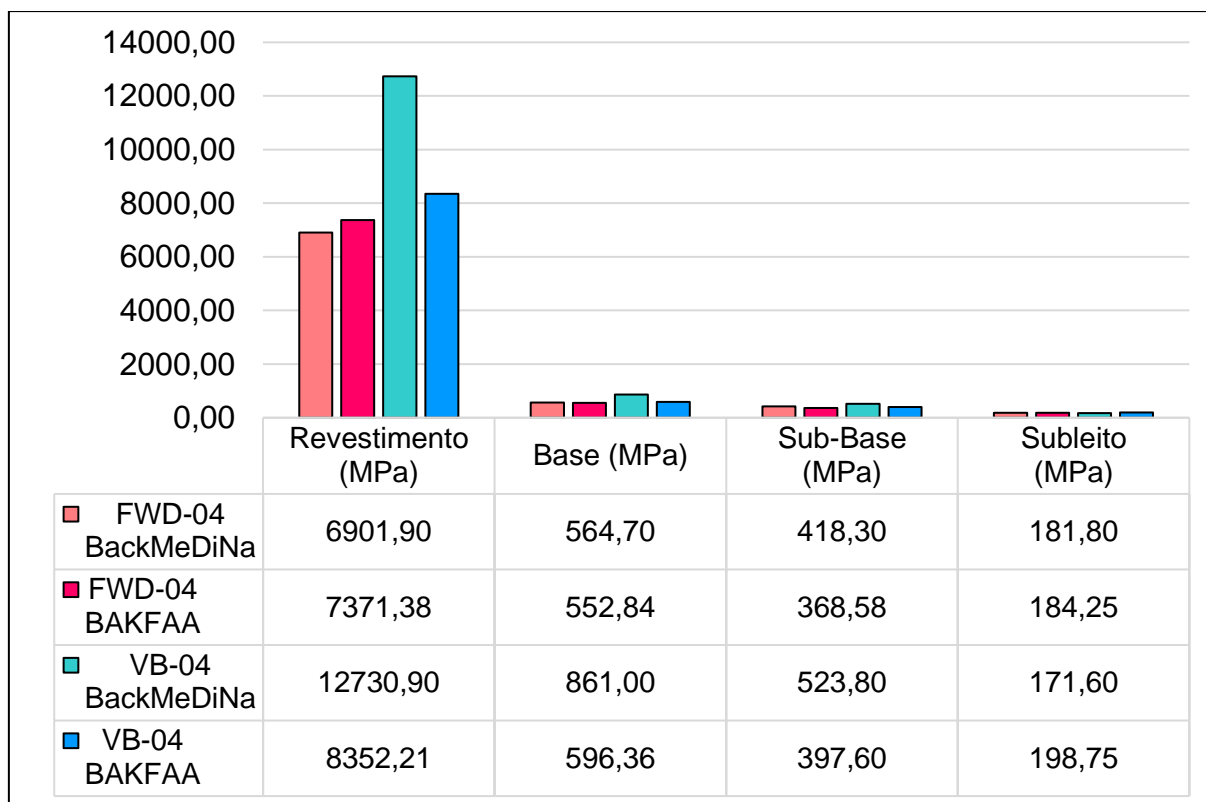
- a) Os módulos retroanalizados através do BackMeDiNa são maiores em relação aos retroanalizados pelo BAKFAA, exceto para o subleito;
- b) Os módulos resilientes equivalentes obtidos através da retroanálise com as medidas de deflexão da VB são os que apresentam maiores dispersões e erros nos resultados, em ambos os softwares;
- c) Os módulos retroanalizados no BackMeDiNa, a partir das medidas de deflexão da VB, são maiores em relação ao obtidos da retroanálise com o FWD (devido às menores deflexões), exceto para o subleito;
- d) Os módulos gerados pelo BAKFAA a partir de dados deflexão da VB foram divergentes do esperado, conforme supracitado, apresentando módulos menores, em relação ao FWD, e maior discrepância dos demais resultados.

Os gráficos *boxplot* do APÊNDICE F também apresentam alguns *outliers*, ou seja, valores distantes do resultado encontrado, sendo o ponto 28 na análise do revestimento, base, sub-base e subleito com os dados FWD na análise BAKFAA e, novamente, o ponto 28 na análise do subleito com os dados FWD no BackMeDiNa.

4.2.3.4 Módulos resilientes equivalentes retroanalizados no BackMeDiNa versus BAKFAA - Segmento 04

Na Figura 91 é apresentada a média dos módulos resilientes equivalentes do segmento 04 para cada camada nos ensaios VB e FWD, nos dois *softwares*. O BackMeDiNa apresenta módulos maiores, em média, 8% para a base e sub-base em relação ao BAKFAA e, módulos menores, em torno de 4%, para o revestimento e subleito nos dados FWD. Já para análise com os dados VB, o BackMeDiNa apresenta módulos, em média, 43% maiores para o revestimento, base e sub-base, e módulos, em torno de 14%, menores para o subleito, ao comparar com o BAKFAA.

Figura 91 - Módulos resilientes equivalentes médios - Segmento 04.



Fonte: A autora (2022).

Ao analisar a Tabela 51, a Tabela 52 e a Tabela 56, nos APÊNDICES A e C, com os resultados dos módulos resilientes equivalentes gerados pelo BackMeDiNa, para o segmento 04, os erros RMS dos módulos são, em média, 5,78 μm na retroanálise com os dados do FWD e 7,94 μm com os dados da VB.

Por sua vez, na retroanálise com o BAKFAA, disposta na Tabela 59, na Tabela 60 e na Tabela 62, nos APÊNDICES D e E, a média é de 8,12 μm na retroanálise com os dados do FWD e 12,17 μm com os dados da VB. Porém, de forma geral, conforme ocorre no segmento 02, apesar de maiores erros RMS, os desvios padrões e coeficientes de variação do BAKFAA são menores quando comparados ao BackMeDiNa (exceto para o revestimento nos dados VB). Em ambos os *softwares* e em ambos os segmentos, os dados da VB são os com maiores erros e dispersão nos resultados.

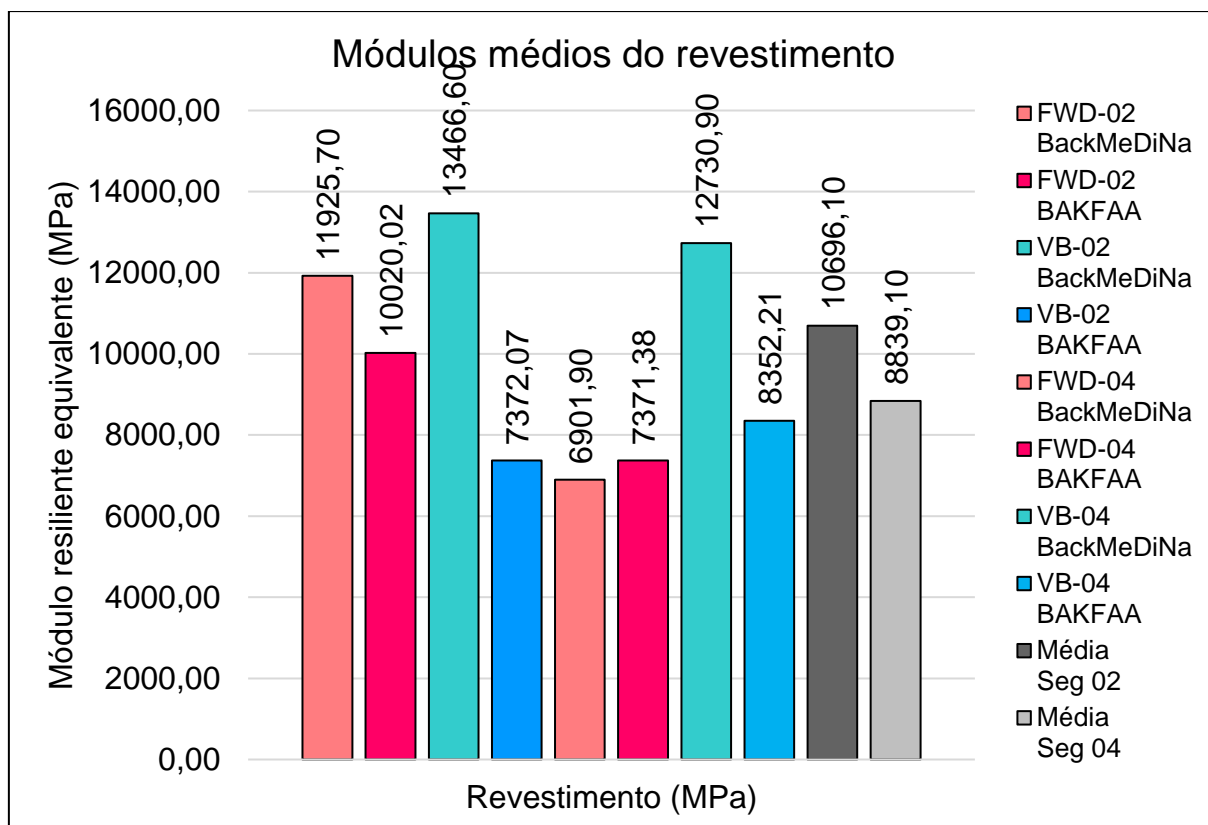
No APÊNDICE G estão representados os gráficos *boxplot* dos módulos do revestimento (Figura 116), base (Figura 117), sub-base (Figura 118) e subleito (Figura 119), para o segmento 04, e podem ser observados:

- a) Assim como no segmento 02, os módulos gerados a partir do BackMeDiNa foram maiores, não em todos os pontos, mas na maioria deles;
- b) Os módulos gerados a partir das medidas de deflexão VB também são os que apresentam maiores erros e maiores magnitudes quando comparados aos encontrados com os dados do FWD;
- c) Na análise do segmento 04 os dados do BackMeDiNa e do BAKFAA ficaram próximos e não apresentaram a divergência que ocorreu nos dados da VB para o segmento 02;
- d) Os gráficos do APÊNDICE G apresentam o ponto 70 como o principal outlier.

4.2.3.5 Módulos resilientes equivalentes retroanalizados no BackMeDiNa versus BAKFAA - Análise geral

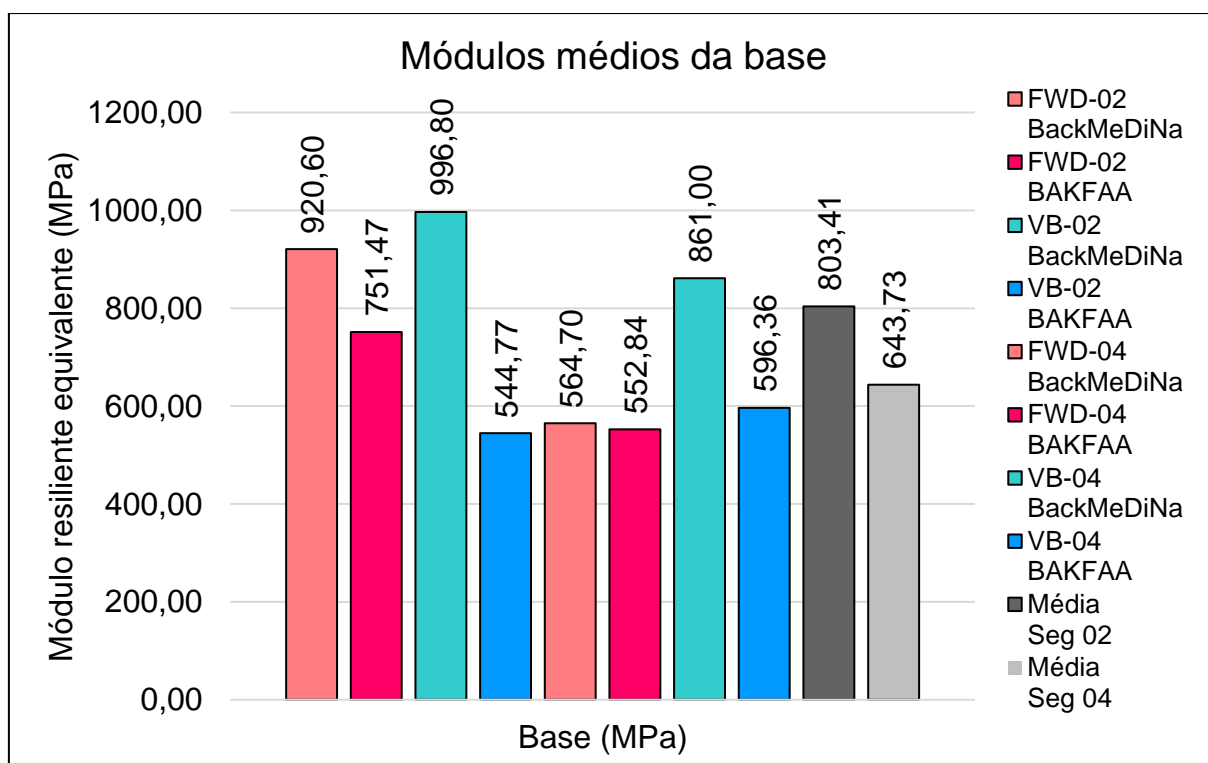
Foram plotados separadamente os módulos de cada camada do pavimento em ambos os segmentos e de ambos os *softwares* para visualizar os resultados e comparar os valores. Os módulos para o revestimento, base, sub-base e subleito estão ilustrados na Figura 92, na Figura 93, na Figura 94 e na Figura 95, respectivamente.

Figura 92 - Módulos médios do revestimento - comparativo.



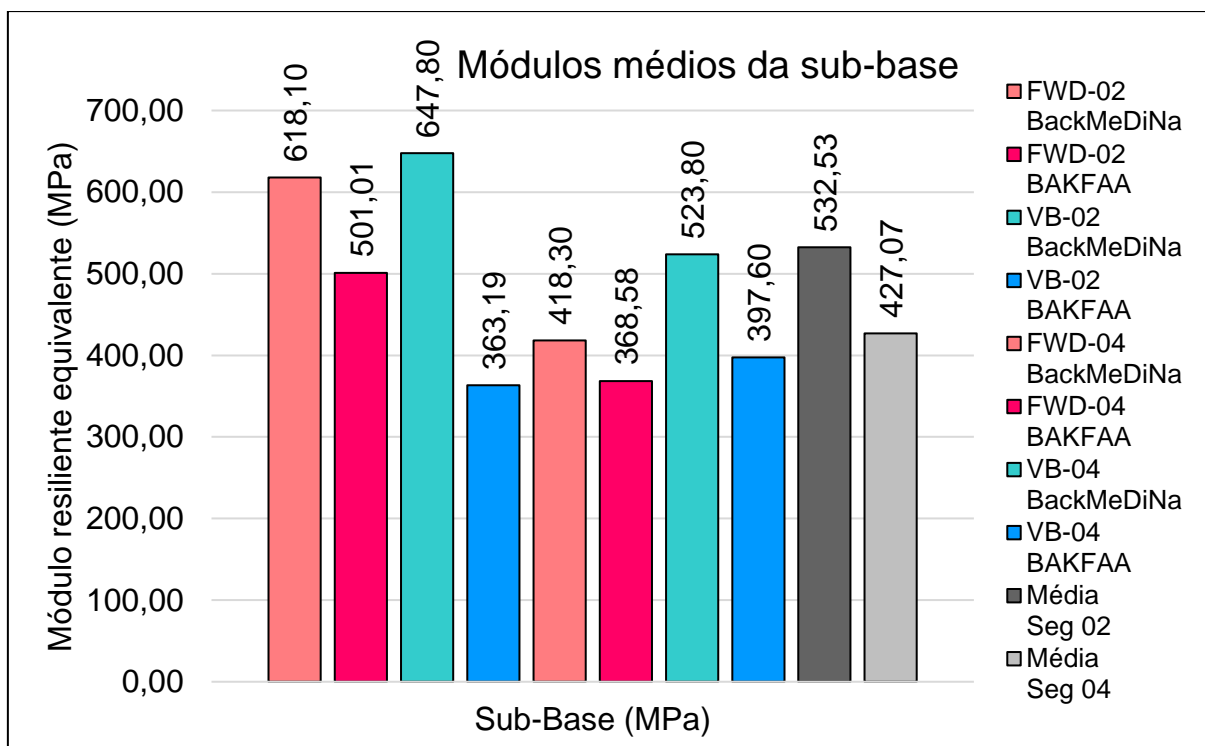
Fonte: A autora (2022).

Figura 93 - Módulos médios da base - comparativo.



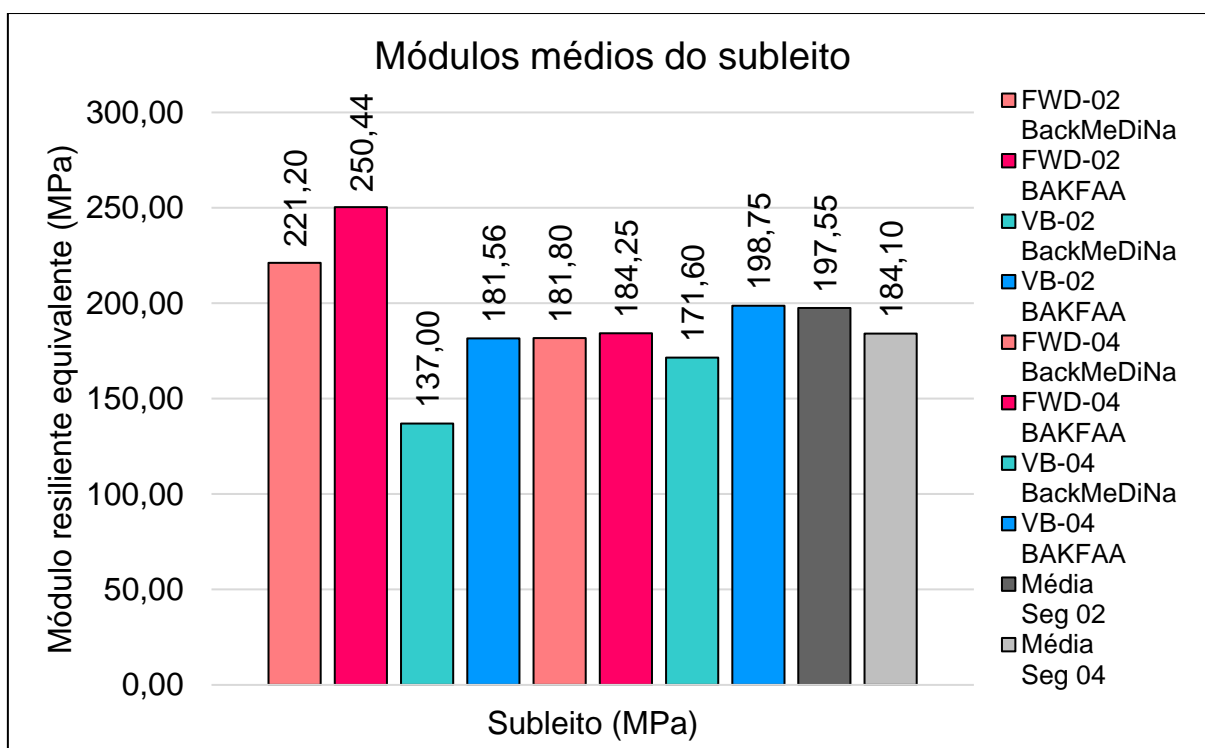
Fonte: A autora (2022).

Figura 94 - Módulos médios da sub-base - comparativo.



Fonte: A autora (2022).

Figura 95 - Módulos médios do subleito - comparativo.



Fonte: A autora (2022).

Sendo assim, diante das análises discorridas, pode-se concluir que:

- a) O BackMeDiNa gerou menores erros RMS (entre 3,240 e 13,143 μm) quando comparado ao BAKFAA (entre 4,018 e 32,670 μm), o que significa que as bacias retrocalculadas são mais próximas das medidas em campo;
- b) Os dados da VB geraram maiores desvios padrões e coeficientes de variação (entre 11,30 e 30,12%) quando comparados com os dados FWD (entre 6,24 e 17,79%);
- c) Os módulos gerados pelo BackMeDiNa, em sua maioria, foram maiores que os obtidos pelo BAKFAA;
- d) Os módulos gerados pelo BackMeDiNa apresentaram maior variação quando comparados com o BAKFAA;
- e) As retroanálises no BAKFAA foram mais rápidas que as realizadas no BackMeDiNa;
- f) A forma de obter a bacia calculada ocorre de forma diferente nos dois softwares, pois o BAKFAA lança um desenho inicial com os dados imputados pelo usuário e vai mantendo constante o delineamento da bacia ao longo da retroanálise, enquanto o BackMeDiNa vai modificando os módulos sem um delineamento pré-determinado, até encontrar os menores erros. Este motivo pode justificar o fato de o BAKFAA apresentar maiores erros;
- g) Para o revestimento: maiores módulos obtidos pelos dados da VB com o BackMeDiNa (13466,60 MPa para o segmento 02 e 12760,90 MPa para o segmento 04), o módulo da VB no segmento 02 (7372,07 MPa) destoa dos demais e, em geral, o BackMeDiNa trouxe módulos maiores em relação ao BAKFAA;
- h) Para a base: novamente maiores módulos obtidos pelos dados da VB com o BackMeDiNa (996,80 MPa para o segmento 02 e 861,00 MPa para o segmento 04), o BackMeDiNa trouxe módulos maiores em relação ao BAKFAA em todas as análises e os valores encontrados para o segmento 04 (com exceção da análise VB com o BackMeDiNa) apresentam menor variação de magnitude entre si;
- i) Para a sub-base: módulos obtidos através dos dados da VB com o BackMeDiNa são os maiores (647,80 MPa para o segmento 02 e 523,80 MPa para o segmento 04), o BackMeDiNa trouxe módulos maiores em

relação ao BAKFAA em todas as análises e, conforme ocorreu para base, os valores encontrados para o segmento 04 (com exceção da análise VB com o BackMeDiNa) apresentam menor variação de magnitude entre si;

- j) Para o subleito: ao contrário das demais camadas, os maiores módulos encontrados foram obtidos através dos dados FWD com o BAKFAA (250,44 MPa para o segmento 02 e 184,25 MPa para o segmento 04), o BAKFAA que trouxe módulos maiores em relação ao BackMeDiNa em todas as análises, os valores encontrados para o segmento 04 apresentam menor variação de magnitude entre si e chegaram em valores muito próximos;
- k) Conforme já exposto, pode observar-se avaliando a média de cada camada (duas últimas barras apresentadas nas Figura 92 à Figura 95), que os valores dos módulos obtidos no segmento 02 são maiores que os do segmento 04, devido o trecho já estar consolidado e ter apresentado, de forma geral, menores deflexões.

4.3 SOLUÇÃO NUMÉRICA ATRAVÉS DO MEF COM O ABAQUS

4.3.1 Construção dos modelos de elementos finitos e simulação das bacias de deflexão

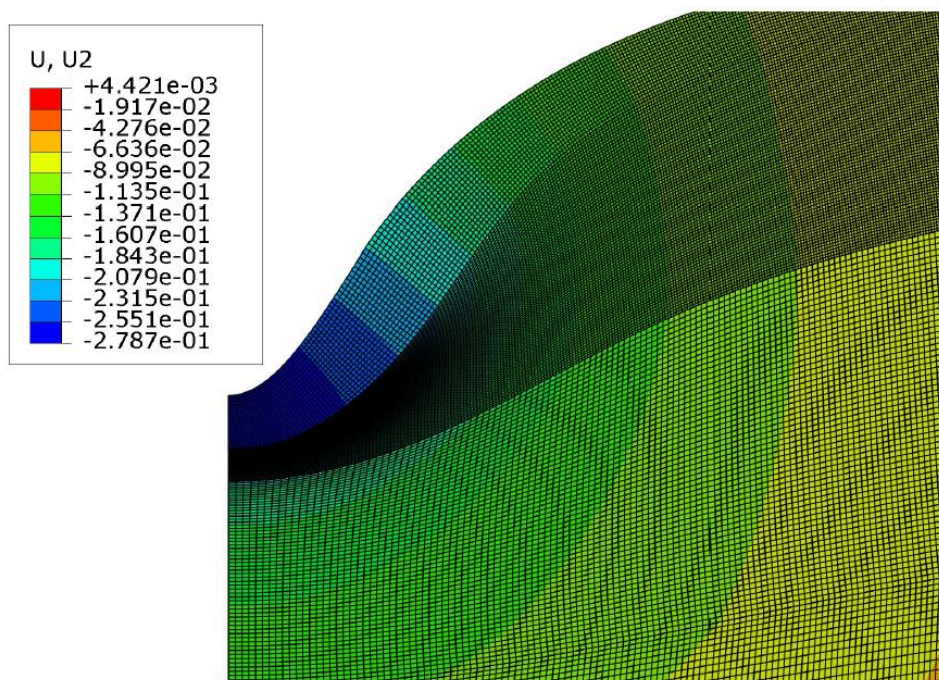
Os 12 modelos de elementos finitos (Figura 61) foram construídos no Abaqus e, como saída das análises, são obtidas as bacias de deflexão calculadas, sendo seis para o segmento 02 e seis para o segmento 04, com o uso dos módulos médios do ensaio FWD retroanalizados no BackMeDiNa. A escolha destes módulos ocorreu, pois o modelo visa simular a aplicação da carga de um ensaio FWD, e os dados dos módulos retroanalizados no BackMeDiNa foram os que apresentaram menores erros e variações, quando comparados ao BAKFAA, conforme já discorrido no tópico 4.2.3.

O tempo de processamento médio para obtenção dos dados de saída foi em torno de 15 a 20 minutos, tanto para os modelos estáticos quanto para os modelos dinâmicos. Embora o modelo estático tendesse a ser processado de forma mais rápida, ele precisou ser configurado com uma quantidade maior de nós para que o *software* não apresentasse erros e, dessa forma, o tempo de processamento de ambas as análises foi semelhante.

Os dados de deflexão do modelo estático são obtidos diretamente na plotagem dos deslocamentos na tela de visualização dos resultados no Abaqus, na Figura 96 é ilustrada a simulação da aplicação da carga FWD no modelo estático com aderência para o segmento 04. Já os modelos dinâmicos geram um resultado de deflexão a cada elemento de tempo simulado, conforme a Figura 97 para o segmento 02, sendo que para todas as simulações dinâmicas, o pico de deflexão ocorreu no pico de aplicação da carga no tempo 0,025 s.

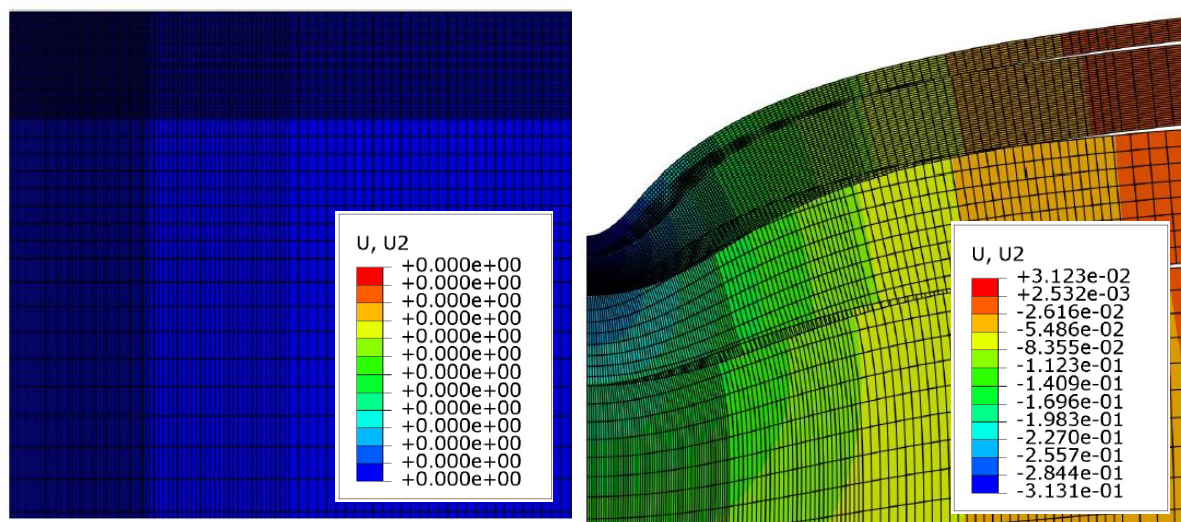
Na Figura 98 é apresentado o comportamento das deflexões dependentes do tempo para os sete geofones localizados nos diferentes deslocamentos radiais em relação ao ponto e aplicação da carga (dados do modelo do segmento 02 dinâmico sem aderência, como exemplo). Observa-se que a deflexão radial aumenta com o tempo até atingir a deflexão máxima, e após este pico começa a diminuir, comportamento observado para todos os pontos de medição. Com essa análise pode-se validar o comportamento elástico das camadas do pavimento.

Figura 96 - Plotagem do resultado da bacia de deflexão - modelo estático com aderência - segmento 04.



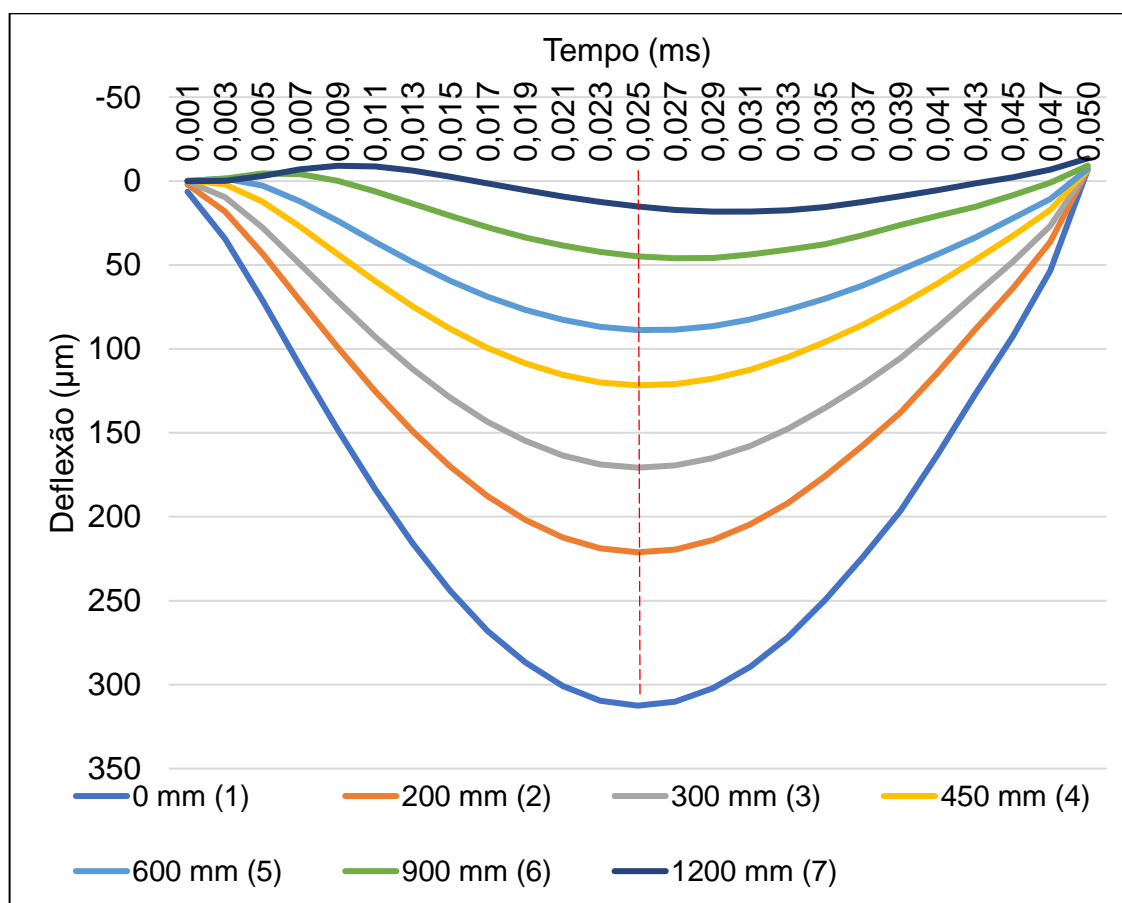
Fonte: A autora (2022).

Figura 97 - Plotagem do resultado da bacia de deflexão - modelo dinâmico sem aderência - tempo 0 e tempo 0,025s - segmento 02.



Fonte: A autora (2022).

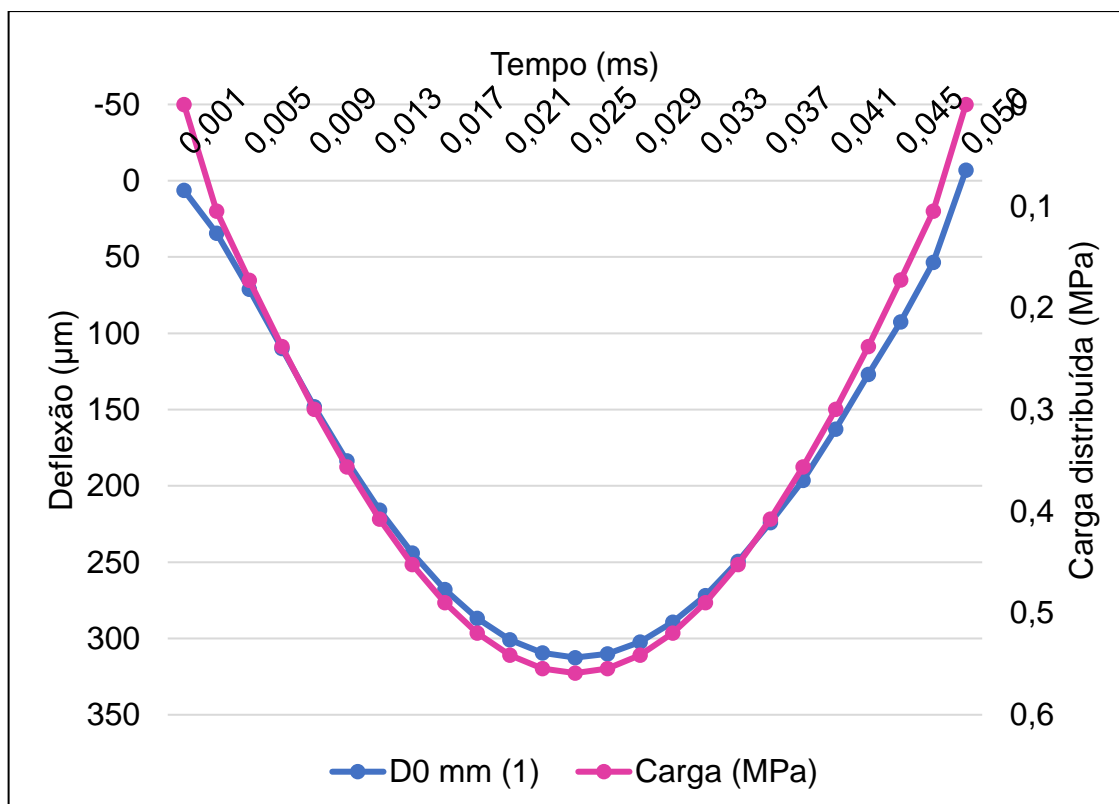
Figura 98 - Deflexões para os 7 geofones ao longo do tempo - segmento 02, dinâmico sem aderência.



Fonte: A autora (2022).

A variação da aplicação da carga (40 kN aplicado no prato de 150 mm, que gera uma pressão de 0,56 MPa) é demonstrada na Figura 99, onde fica evidente que, com o aumento da carga, a magnitude da deflexão também aumenta. Na Figura 99 também é plotada a deflexão D0, e o mesmo comportamento é encontrado nas medidas de deflexão dos demais sensores.

Figura 99 - Magnitude da carga em relação a variação de D0.



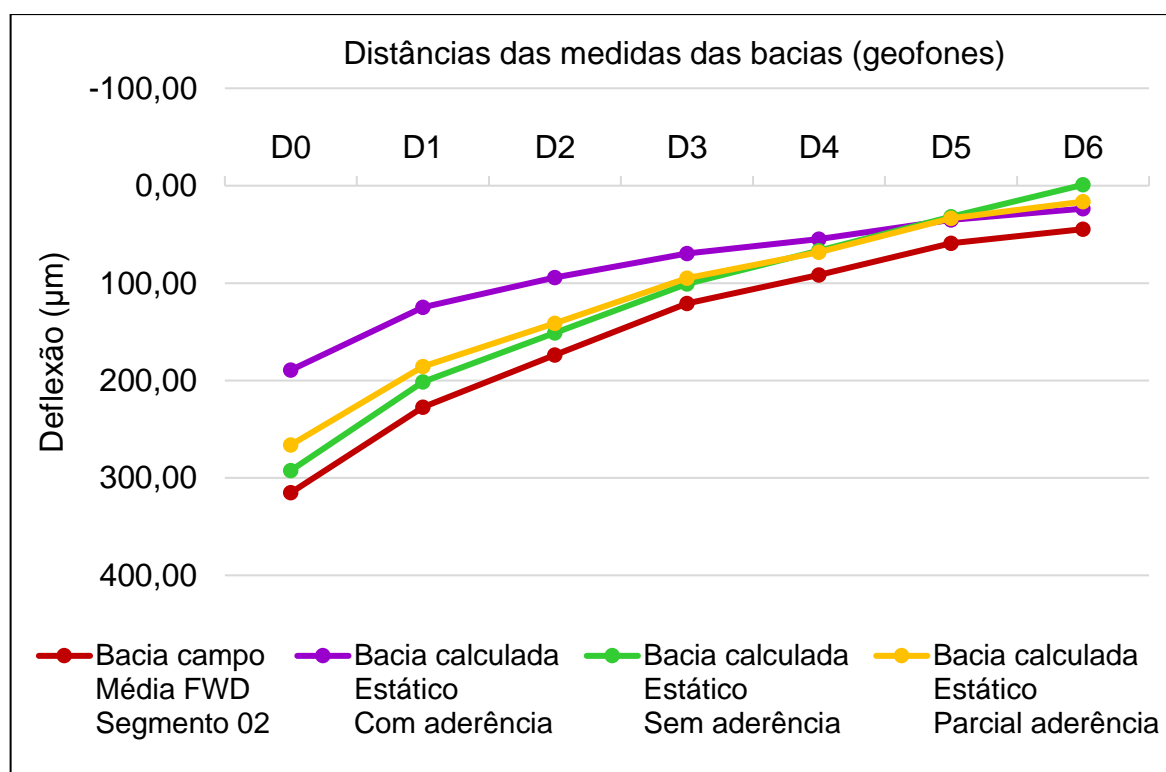
Fonte: A autora (2022).

Os resultados das bacias calculadas nos modelos de elementos finitos estáticos e dinâmicos dos segmentos 02 e 04 são apresentados no APÊNDICE H e APÊNDICE I, respectivamente.

Nos APÊNDICES H e I são apresentadas as medidas das bacias de deflexão obtidas através dos modelos de elementos finitos estáticos e dinâmicos, para as diferentes condições de aderência, e comparadas com os dados das bacias de campo medidos no ensaio FWD aplicando a correção de carga para 40 kN das Tabela 27 e Tabela 28. São registradas as diferenças absolutas (em μm), o erro relativo absoluto (em %) e o erro relativo admissível (em %, conforme a Tabela 14), entre as bacias calculadas e de campo. O erro RMS (em %) em relação as deflexões D0 a D6 também é calculado e apresentado.

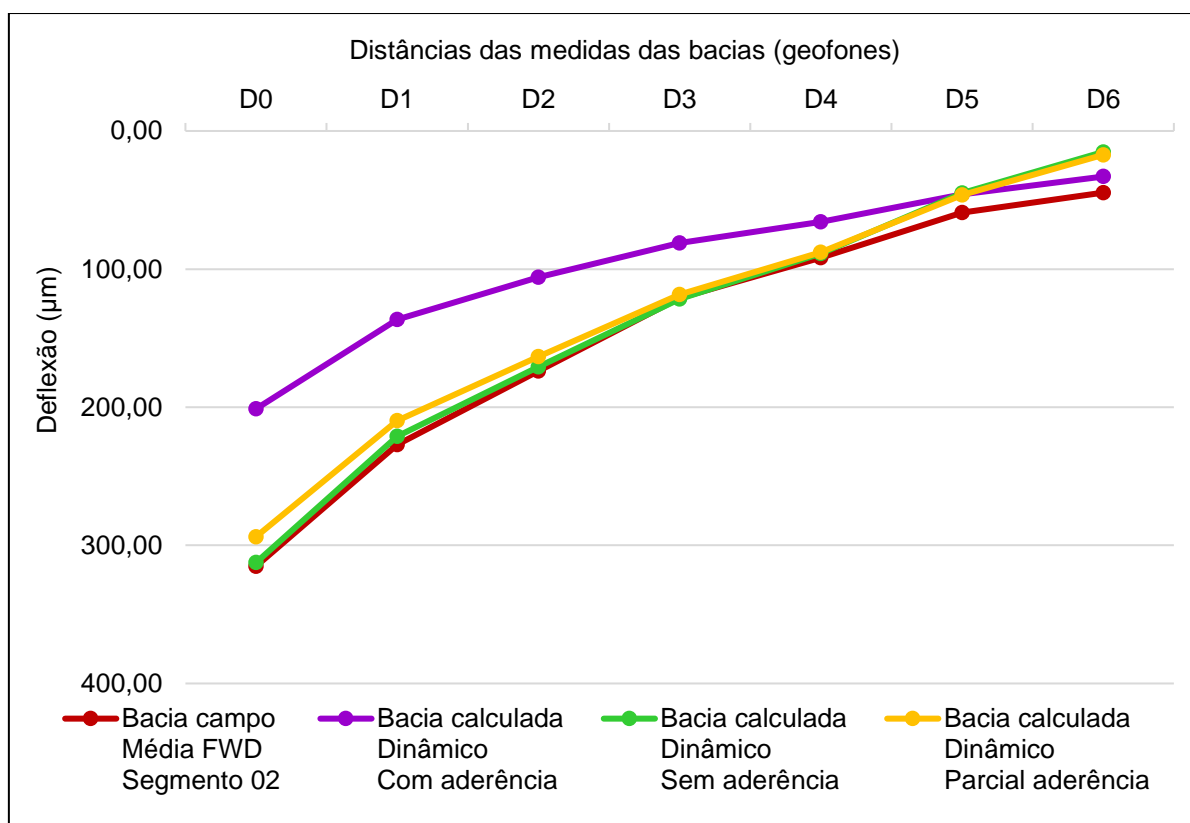
Na Figura 100 (estático) e na Figura 101 (dinâmico) são plotadas a bacia de campo medida com o FWD no segmento 02, corrigida para carga de 40 kN, e as demais bacias calculadas pelos modelos de elementos finitos estáticos e dinâmicos no Abaqus. Já na Figura 102 (estático) e na Figura 103 (dinâmico) são ilustradas as mesmas informações citadas, mas para o segmento 04.

Figura 100 - Bacias simuladas nos modelos estáticos - Segmento 02 - Abaqus.



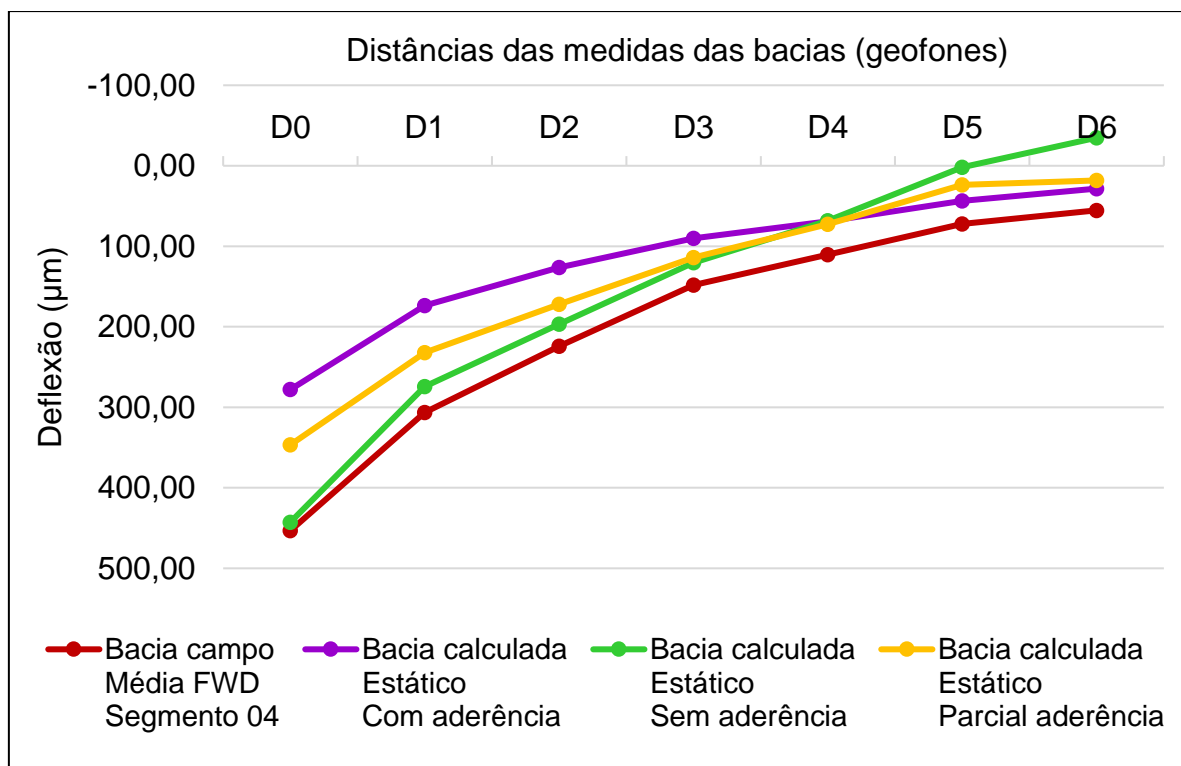
Fonte: A autora (2022).

Figura 101 - Bacias simuladas nos modelos dinâmicos - Segmento 02 - Abaqus.



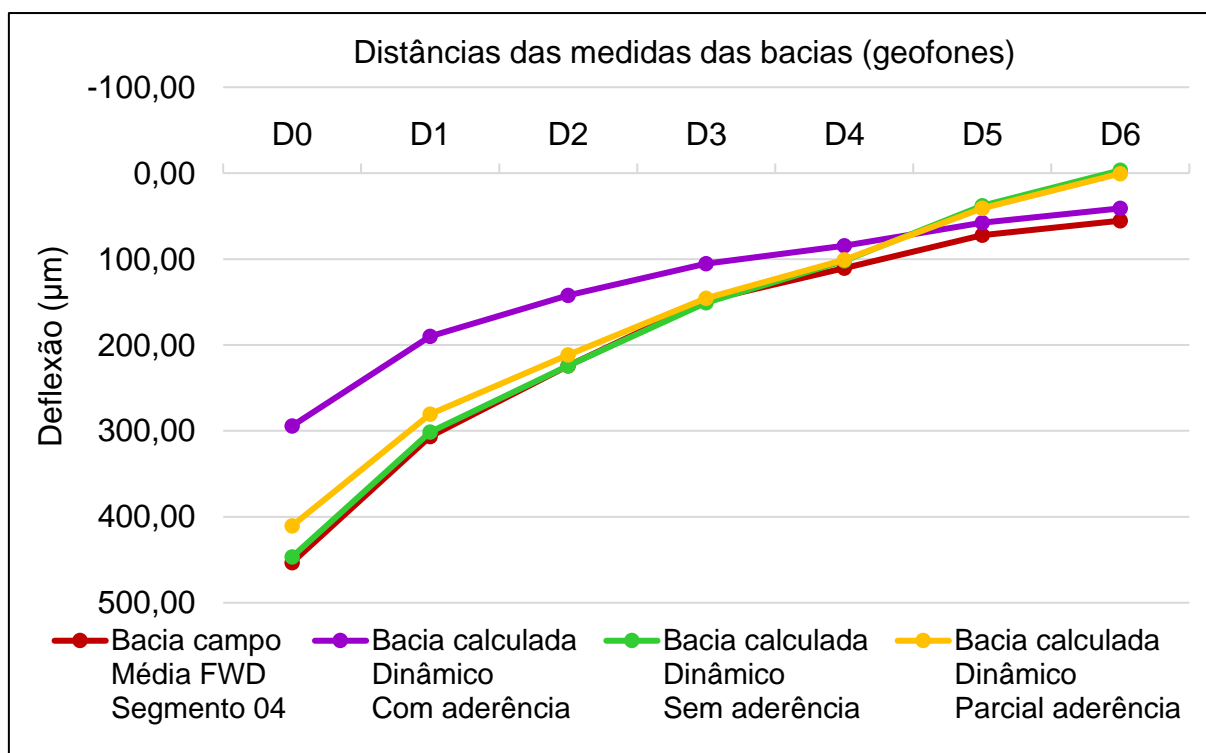
Fonte: A autora (2022).

Figura 102 - Bacias simuladas nos modelos estáticos - Segmento 04 - Abaqus.



Fonte: A autora (2022).

Figura 103 - Bacias simuladas nos modelos dinâmicos - Segmento 04 - Abaqus.



Fonte: A autora (2022).

Observando o delineamento das bacias na Figura 100 até a Figura 103, percebe-se que as bacias simuladas com o modelo dinâmico estão mais próximas da bacia de campo, quando comparadas as bacias geradas pelo modelo estático. Este resultado era esperado, devido a consideração de mais variáveis no modelo, como a massa específica das camadas e o movimento dinâmico de aplicação da carga ser mais próximo à realidade do ensaio FWD em campo (pois não considera apenas o pico da carga).

Conforme apresentado no capítulo de revisão, diversos autores já realizaram pesquisas com modelos estáticos e dinâmicos em diferentes tipos de análises de estruturas de pavimentos. Autores que realizaram análises semelhantes, obtiveram resultados divergentes em suas análises. Tarefder e Ahmed (2014) encontraram melhores resultados para as bacias deflectométricas simuladas em um modelo estático, enquanto Hamim *et al.* (2018), verificaram que a simulação das bacias em um modelo dinâmico é melhor para modelar as estruturas de um pavimento flexível submetido a um ensaio FWD.

Logo, a presente pesquisa corrobora com os resultados de Hamim *et al.* (2018), que encontram a melhor simulação das bacias de deflexão através de modelos de elementos finitos dinâmicos.

Ainda avaliando a Figura 100 à Figura 103, observa-se o afastamento da bacia calculada com aderência total nas primeiras medidas de deflexão (D0, D1 e D2) em relação a bacia medida em campo. Isso acontece, pois as camadas do pavimento comportam-se como um bloco monolítico, distribuindo melhor os esforços e gerando menores deflexões.

Outra visualização importante no desenho das bacias, é distanciamento das últimas medidas de deflexão (D5 e D6) nas simulações sem aderência, pois ao visualizar o efeito gerado pela carga na simulação gráfica, tem-se o descolamento dessas camadas nas últimas medidas dos geofones. O motivo desse distanciamento das medidas D5 e D6 da bacia calculada, quando comparada com a bacia de campo, pode ser justificado pela falta de aderência das camadas e ao tamanho da medida horizontal aplicado na geometria do modelo. Uma simulação rápida foi realizada e constatou-se que ao aumentar a medida horizontal (eixo y) de 1800 mm para 5000 mm, e então para 8000 mm, as medidas das deflexões nos últimos geofones melhoram consideravelmente.

Como os módulos utilizados nos modelos são referentes aos resultados obtidos pelo BackMeDiNa, que atribui a condição de não aderência em suas rotinas de cálculo, esperava-se que, as bacias calculadas mais próximas à bacia de campo, fossem as que consideraram a aderência nula entre as camadas. De fato, foi o que ocorreu, e entende-se, nesta pesquisa, ser a melhor opção de simulação numérica, uma vez que, a adoção da consideração de camadas não aderidas vai a favor da segurança, por ser a condição mais crítica que pode ser encontrada *in loco*.

O resumo das medidas das bacias analisadas em cada modelo é apresentado na Tabela 42 e na Tabela 43, para os segmentos 02 e 04, respectivamente. Conforme já citado, os demais resultados destas bacias estão nos APÊNDICES H e I.

Tabela 42 - Bacias de deflexão obtidas nos diferentes modelos do segmento 02.

Modelos	Deflexões (µm)						
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo FWD - 02	315,14	227,22	173,80	120,96	91,66	58,98	44,62
Bacia calculada Estático Com aderência	189,26	124,75	94,25	69,61	54,71	35,05	23,59
Bacia calculada Estático Sem aderência	292,37	201,33	150,97	100,89	66,57	31,83	-0,91
Bacia calculada Estático Parcial aderência	266,07	185,45	141,16	94,75	68,38	33,52	16,38
Bacia calculada Dinâmico Com aderência	201,17	136,53	105,92	81,06	65,85	45,87	32,98
Bacia calculada Dinâmico Sem aderência	312,51	221,14	170,74	121,68	88,74	44,85	15,18
Bacia calculada Dinâmico Parcial aderência	293,76	209,61	163,40	118,45	87,92	46,33	17,24

Fonte: A autora (2022).

Tabela 43 - Bacias de deflexão obtidas nos diferentes modelos do segmento 04.

Modelos	Deflexões (µm)						
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo FWD - 02	453,16	306,43	224,20	148,32	110,49	72,16	55,35
Bacia calculada Estático Com aderência	277,93	173,71	126,19	89,92	69,15	43,68	28,36
Bacia calculada Estático Sem aderência	442,71	274,01	196,56	120,38	68,16	1,91	-34,87

Modelos	Deflexões (µm)						
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia calculada Estático Parcial aderência	346,60	232,18	172,00	114,08	72,72	23,70	18,20
Bacia calculada Dinâmico Com aderência	294,13	189,75	142,10	105,52	84,30	57,69	40,99
Bacia calculada Dinâmico Sem aderência	446,55	301,26	224,17	150,82	101,92	37,85	-3,28
Bacia calculada Dinâmico Parcial aderência	410,39	280,27	211,41	145,56	100,96	40,82	0,45

Fonte: A autora (2022).

Ao analisar os dados da Tabela 42 e da Tabela 43 e dos APÊNDICE H e APÊNDICE I, observa-se que os maiores erros nas medidas de deflexão estão nas bacias simuladas com aderência total entre as camadas. No modelo estático, esse erro relativo, considerando a deflexão D0 medida em campo e a D0 simulada nos segmentos 02 e 04, é de 39,95% e 38,67%, respectivamente. Já no modelo dinâmico, esse erro em D0 é ligeiramente menor, sendo de 36,17% e 35,09%, para os segmentos 02 e 04, respectivamente.

Quando se segue para a análise dos modelos com aderência parcial, obtém-se os erros relativos intermediários das análises. Ainda avaliando o erro na deflexão D0, os valores encontrados são de 15,57% e 23,52%, nos modelos estáticos dos segmentos 02 e 04, respectivamente, e 6,79% e 9,44%, nos modelos dinâmicos dos segmentos 02 e 04, respectivamente.

Por fim, ao avaliar as deflexões D0 nos modelos sem aderência, obtém-se os menores erros, sendo nos modelos estáticos 7,23% e 2,31% para os segmentos 02 e 04, respectivamente, e 0,84% no modelo dinâmico do segmento 02 e 1,46% no modelo dinâmico do segmento 04.

Os quatro primeiros geofones (D0 a D3), das simulações com os modelos estáticos e dinâmicos, apresentaram os melhores resultados das medidas de deflexão (com menores erros relativos), sendo a simulação sem aderência a que apresentou o melhor resultado, seguida pela simulação com aderência parcial e com aderência total, nesta ordem.

Já as últimas medidas de deflexão simuladas (D5 e D6), possuem erros menores nos modelos simulados com aderência total, pois, conforme já citado, não ocorre o descolamento das últimas camadas.

Com base nos erros admissíveis da Tabela 14, há a consideração de 10% para as quatro primeiras medidas, 20% para as medidas D4 e D5 e 50% para a medida mais afastada do ponto de aplicação da carga. A bacia que mais se aproxima desses erros são as simuladas no modelo dinâmico sem aderência. Estes resultados podem ser observados com mais detalhes no APÊNDICE H e no APÊNDICE I, que apresentam os erros admissíveis em todas as bacias calculas nos modelos de elementos finitos.

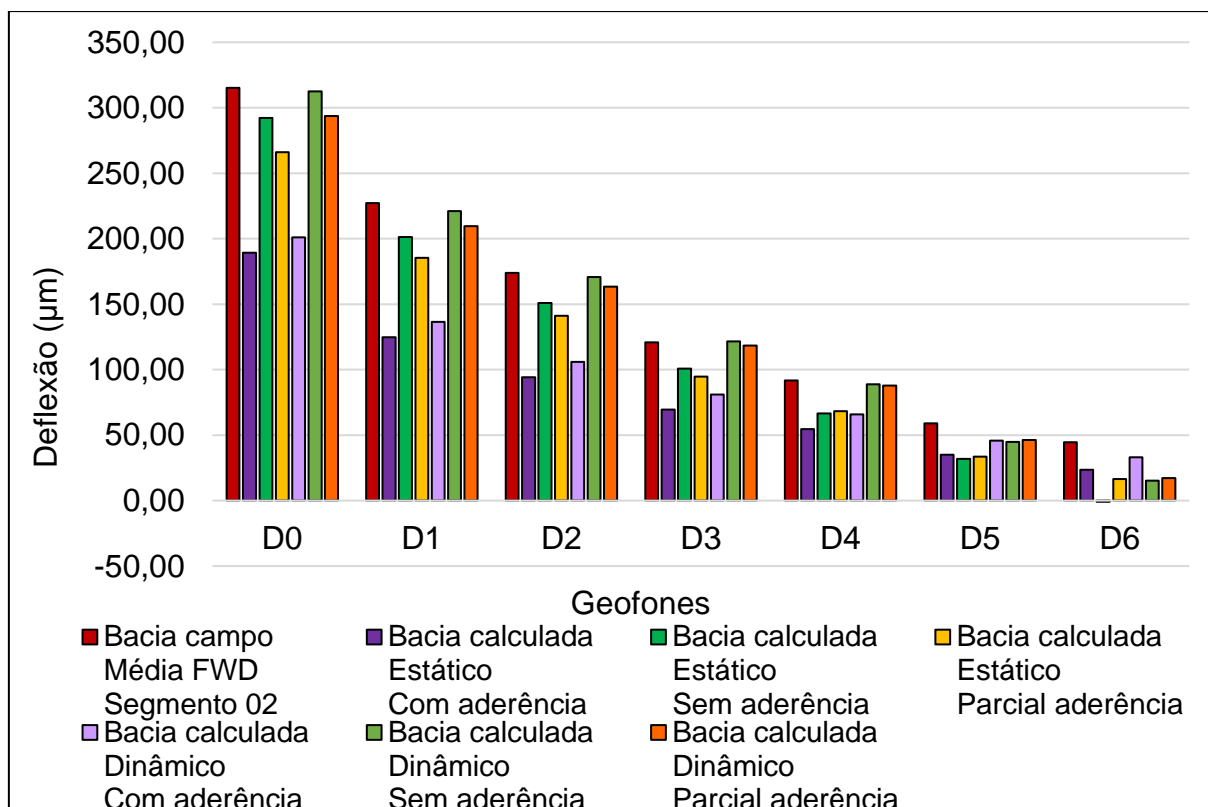
Ao avaliar a raiz quadrática média do erro (RMS), também apresentada nos resultados dos APÊNDICE H e I, para as quatro primeiras medidas dos geofones mais próximos à aplicação da carga, no segmento 02, encontram-se no modelo dinâmico: 1,68% na condição sem aderência, 6,05% com aderência parcial e 37,13% com aderência total. No modelo estático, os erros aumentam para 12,55% na consideração sem aderência, 18,73% com aderência parcial e 43,38% com aderência total.

No segmento 04, analisando os valores do erro RMS, obtém-se para o modelo dinâmico: 1,40% para condição sem aderência, 7,04% com aderência parcial e 34,84% com aderência total. Já no modelo estático esse erro RMS sobe para 12,49% na condição sem aderência, 23,53% com aderência parcial e 41,33% com aderência total.

As análises apresentadas estão ilustradas na Figura 104 e na Figura 105, onde fica evidenciada a diferença entre as medidas de deflexão nos geofones, simuladas nos diferentes modelos quando comparadas com a medida da bacia de deflexão em campo.

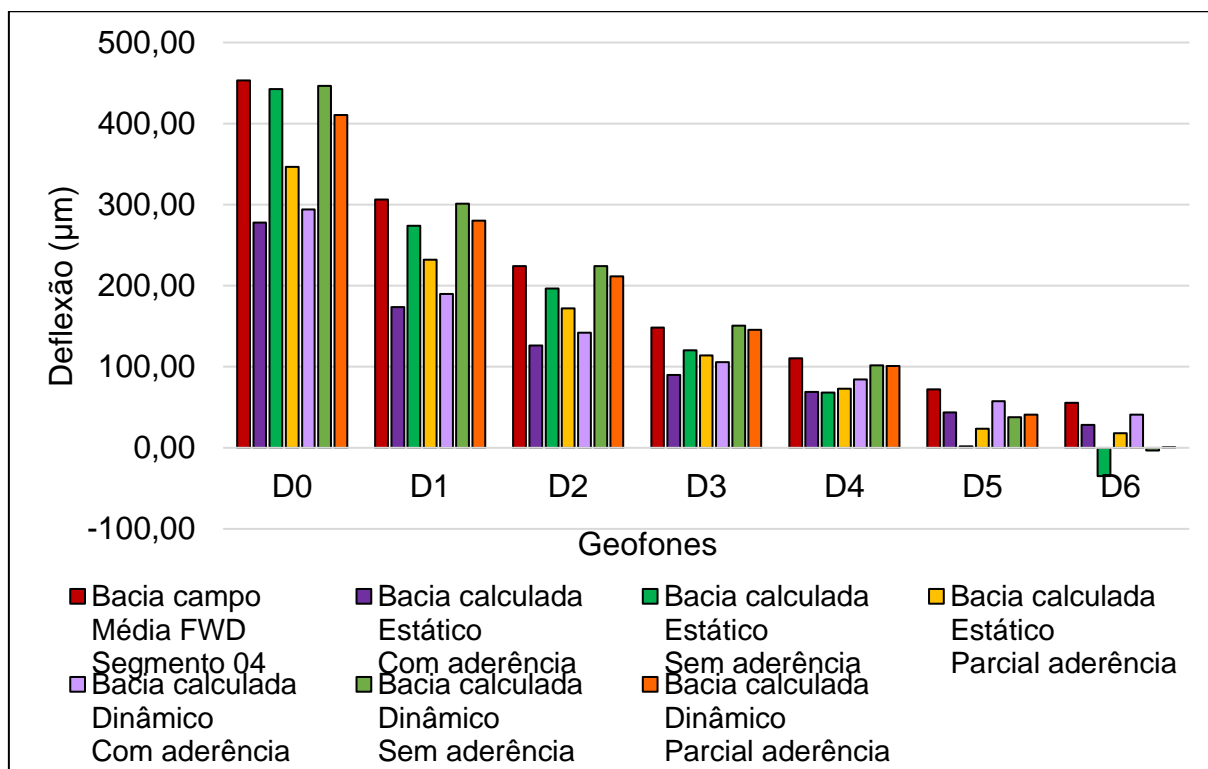
De forma geral, ao avaliar o erro RMS, a bacia de deflexão gerada pelo modelo de elementos finitos dinâmico sem aderência é o que mais se aproxima da bacia gerada em campo pelo FWD. Este resultados também foi encontrado por e Hamim *et al.* (2018), sendo assim, este será o modelo utilizado na etapa 05 da metodologia, disposta no tópico 4.3.2.

Figura 104 - Deflexões dos modelos do segmento 02.



Fonte: A autora (2022).

Figura 105 - Deflexões dos modelos do segmento 04.



Fonte: A autora (2022).

4.3.2 Validação do MEF na retroanálise dos módulos resilientes equivalentes

Após as análises do tópico 4.3.1, e a conclusão de que o modelo dinâmico sem aderência é o que melhor representa o delineamento das bacias de deflexão obtidas pelo ensaio FWD em campo, os módulos sementes dispostos na Tabela 37 foram aplicados na retroanálise através do MEF a fim da validação do modelo proposto nesta pesquisa.

No APENDICE J e no APÊNDICE K são apresentadas as medidas das bacias de deflexão obtidas na retroanálise através do MEF, com os módulos sementes mínimos, intermediários e máximos da Tabela 37, para os segmentos 02 e 04, respectivamente. Noss APÊNDICES J e K são registradas também, as diferenças absolutas (em μm), o erro relativo absoluto (em %) e o erro relativo admissível (em %, conforme a Tabela 14), entre as bacias retrocalculadas pelo MEF e a de campo. O erro RMS (em %) em relação as deflexões D0 a D6 também é calculado e apresentado. Os resultados encontrados serão discutidos na sequência.

Na retroanálise dos módulos resilientes equivalentes do segmento 02, apresentada no APÊNDICE J, foram imputados no modelo, os valores mínimos dos módulos da Tabela 37, que equivalem aos módulos sementes também utilizados nas retroanálises no BackMeDiNa e no BAKFAA. Os valores das deflexões foram altos devido aos valores baixos dos módulos assumidos no modelo, gerando um erro relativo de 171,40% na medida de deflexão D0 e erro RMS em torno de 155,54%, considerando os quatro primeiros geofones.

Na sequência, foram inseridos para retroanálise no modelo de elementos finitos do segmento 02, os módulos intermediários da Tabela 37. Como os valores dos módulos são maiores, as bacias de deflexão calculadas são menores do que as obtidas na simulação anterior. Mesmo assim, o erro relativo em D0 foi de 52,68% e o erro RMS das quatro primeiras medidas de deflexão se manteve alto, com 42,91%.

A última retroanálise no modelo do segmento 02 foi realizada com os módulos máximos da Tabela 37 e os resultados obtidos foram satisfatórios. O erro relativo em D0 foi de 5,49% e o erro RMS até o quarto geofone foi de 5,93%.

Para finalizar a retroanálise do segmento 02 através do MEF, percebeu-se que, as deflexões obtidas com o último intervalo de módulos sementes (módulos máximos da Tabela 37) estavam em torno de 4,6% maiores que as medidas das bacias em campo nos quatro primeiros geofones. Dessa forma, como a intenção era reduzir o

valor da deflexão, os módulos sementes foram aumentados nessa mesma proporção (4,6%). Esse procedimento final deve ser realizado pelo usuário para o refinamento dos módulos resilientes equivalentes até a obtenção de resultados coerentes e satisfatórios.

Os novos módulos imputados no modelo do segmento 02 foram de 10460 MPa para a camada de revestimento, 784,50 MPa para a base, 523 MPa para a sub-base e 261,50 MPa para o subleito. O erro relativo obtido para a medida de deflexão em D0 caiu para 0,64% e o erro RMS das quatro primeiras medidas dos geofones foi de 13,65%. Com esse percentual de erro obtido, a retroanálise foi finalizada e os módulos retroanalizados, para o segmento 02, foram os citados no início deste parágrafo.

Partindo para as simulações no segmento 04, a mesma metodologia foi seguida e tem os resultados apresentados no APÊNDICE K, conforme já citado.

Na retroanálise dos modelos dinâmicos sem aderência para o segmento 04, com módulos sementes mínimos, foram obtidos erros de 88,74% e 92,73% para o erro relativo em D0 e o erro RMS até a quarta medida do geofone, respectivamente.

Com a inserção dos módulos intermediários no modelo do segmento 04, os erros melhoraram significativamente. Para o erro relativo da medida de deflexão em D0 foi obtido o valor de 6,18%, e para o erro RMS até D3, o valor foi de 7,56%.

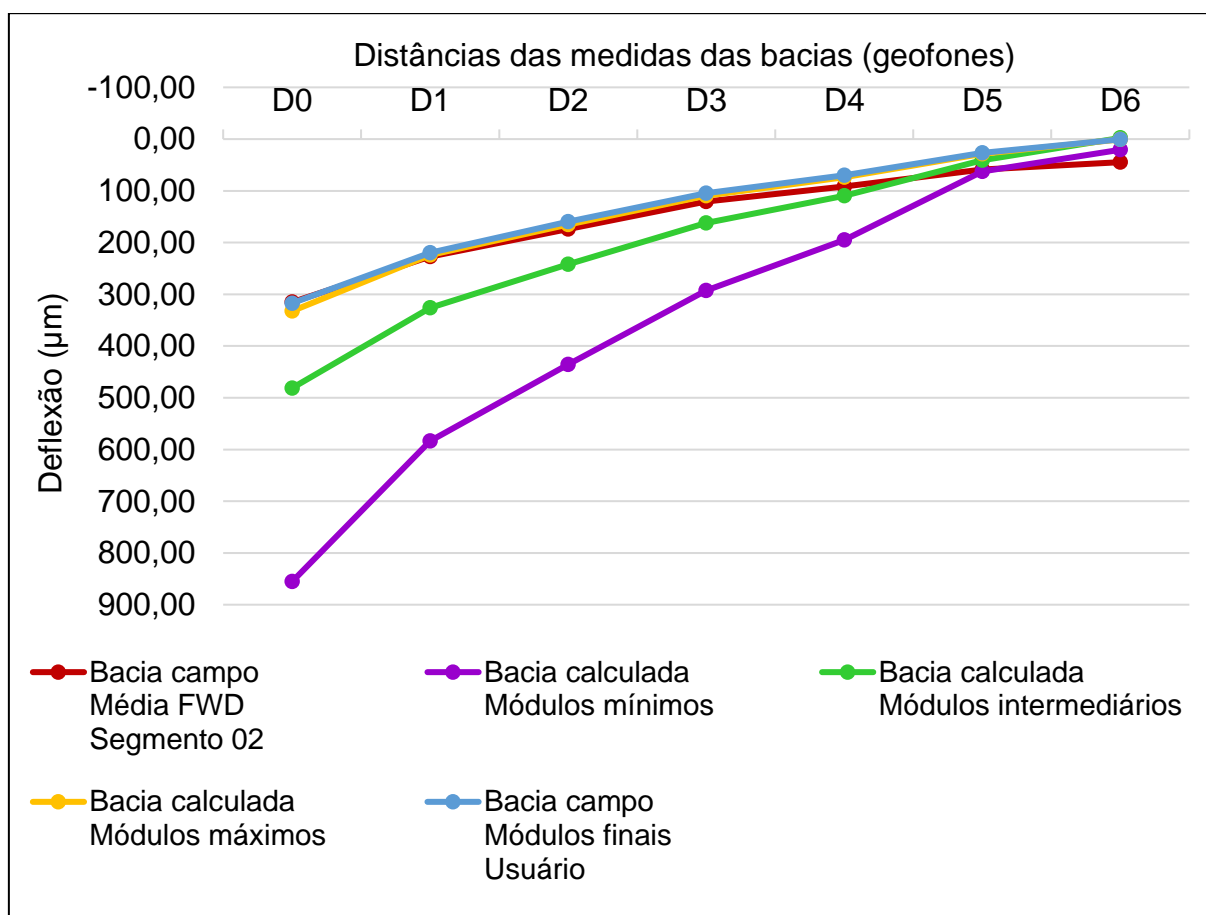
Finalizando as sugestões de módulos sementes da Tabela 37, foram simulados os módulos máximos no modelo do segmento 04, e os resultados obtidos apresentam erros maiores que os calculados anteriormente (com os módulos intermediários), sendo 26,64% de erro relativo na deflexão D0 e 26,45% de erro RMS até a medida de deflexão D3.

Diante desses resultados, foi realizada uma última retroanálise, no modelo do segmento 04, para ajuste fino dos valores dos módulos resilientes equivalentes. As bacias obtidas com os módulos intermediários da Tabela 37 estavam em torno de 6% maiores do que as bacias medidas em campo, sendo assim, os módulos intermediários foram aumentados em 6%, com a intenção de obter então, resultados menores para as deflexões.

Os módulos sementes, da última retroanálise, no modelo do segmento 04, foram de 7420 MPa para a camada de revestimento, 556,50 MPa para a base, 371 MPa para a sub-base e 185,5 MPa para o subleito. O erro relativo obtido para 0,02% para a medida de D0 e 1,48% de erro RMS até a medida de deflexão D3, sendo obtidos resultados satisfatórios quanto a magnitude dos erros desta retroanálise.

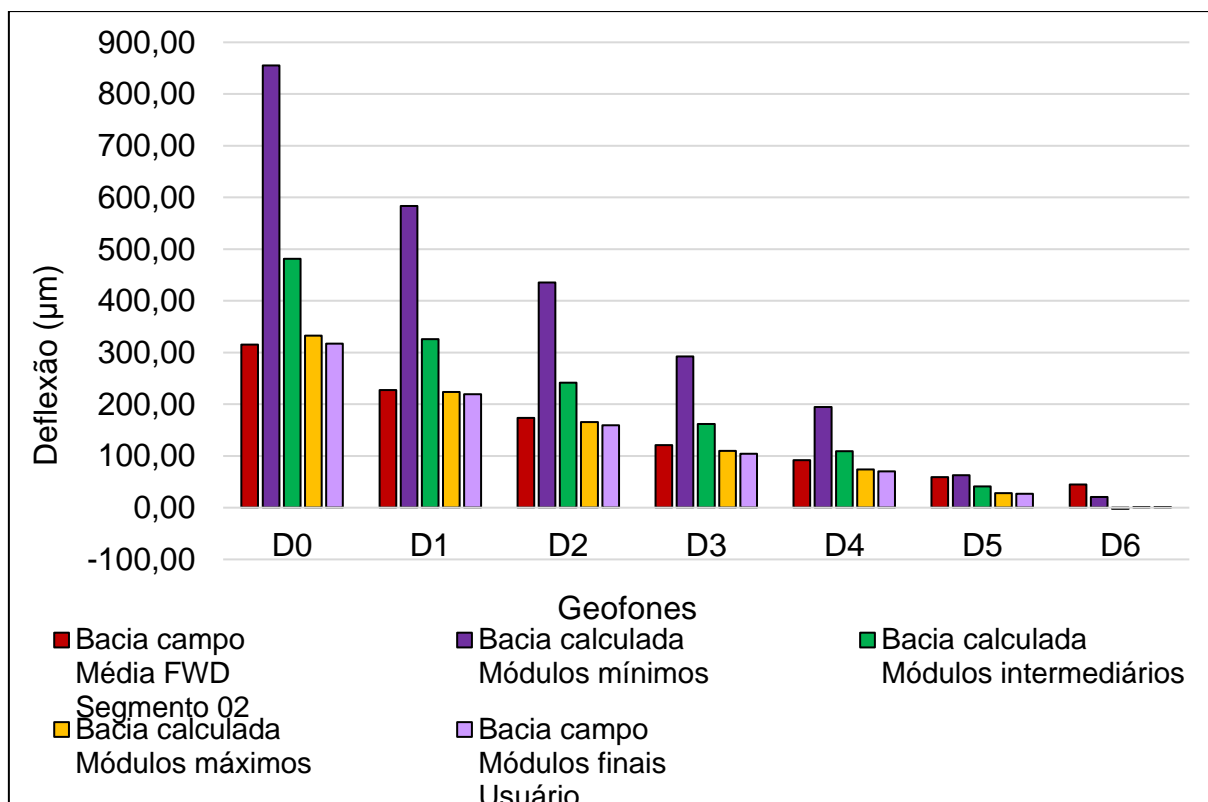
O resultado das bacias de deflexão retroanalizadas pelo MEF através do modelo dinâmico com os módulos sementes, tem seus delineamentos apresentados na Figura 106 e na Figura 107, para o segmento 02 e 04, respectivamente.

Figura 106 - Bacias simuladas no modelo dinâmico com o intervalo de módulos sementes - Segmento 02 - Abaqus.



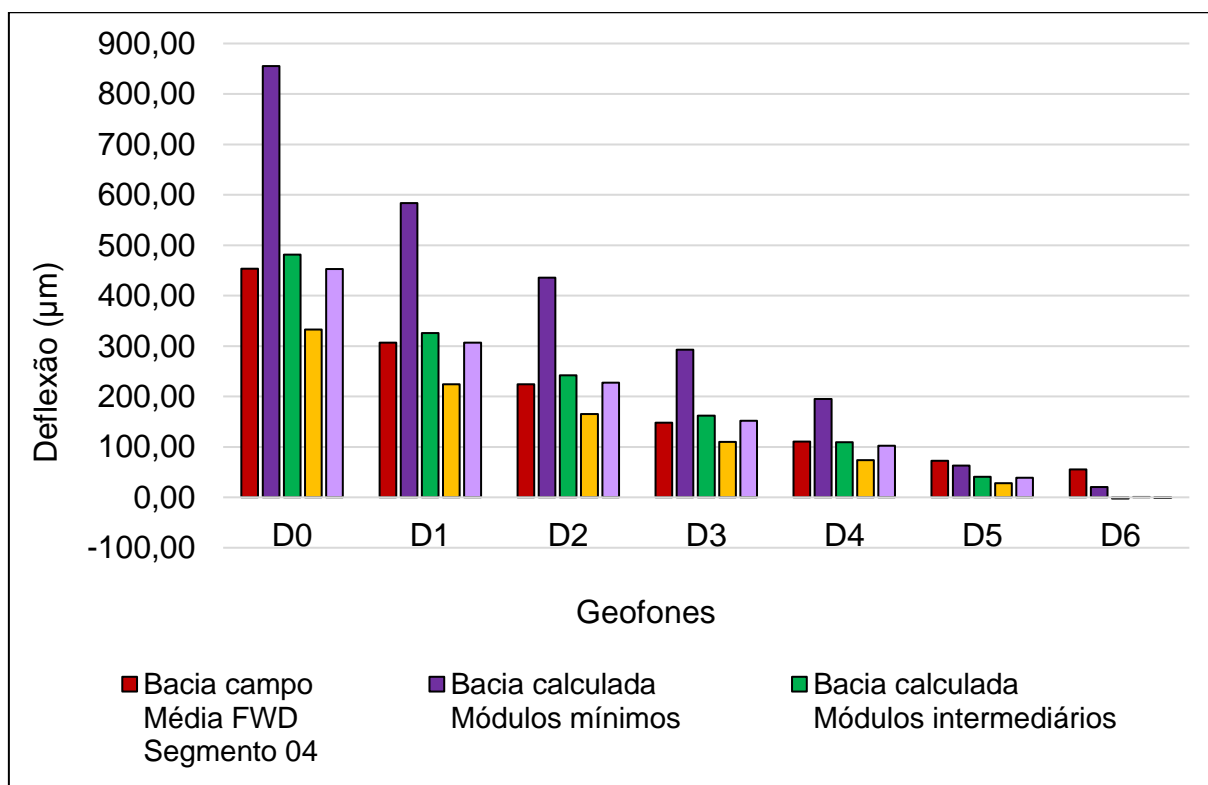
Fonte: A autora (2022).

Figura 108 - Deflexões obtidas na retroanálise dos módulos do segmento 02.



Fonte: A autora (2022).

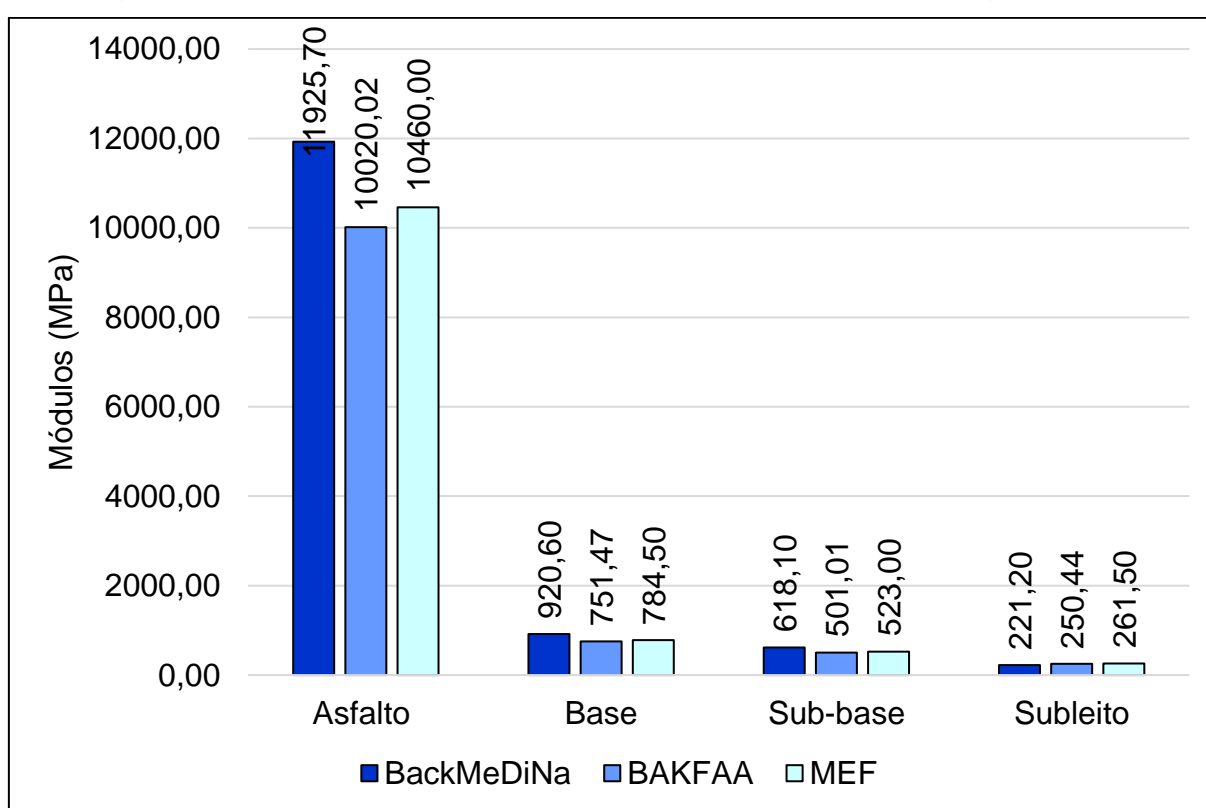
Figura 109 - Deflexões obtidas na retroanálise dos módulos do segmento 04.



Fonte: A autora (2022).

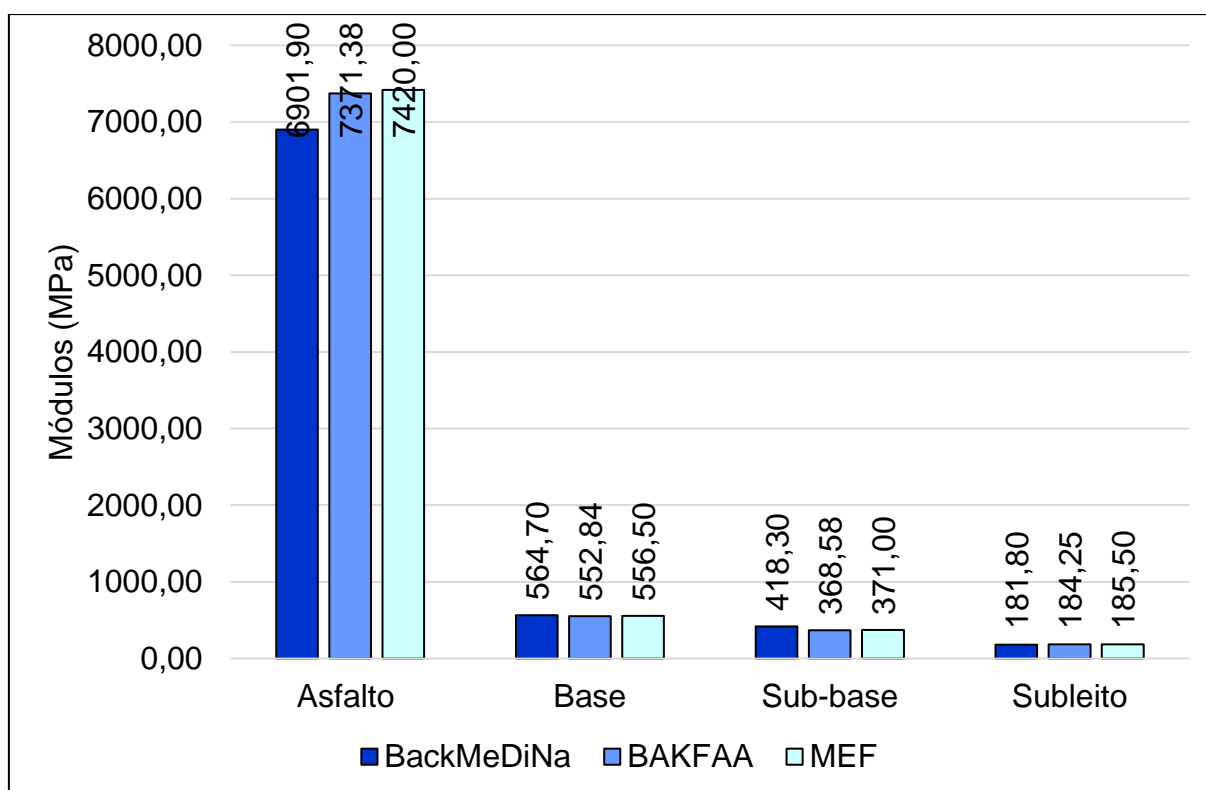
Por fim, considerando as retroanálises dos dados das bacias FWD de campo, são comparados os módulos resilientes equivalentes obtidos através do BackMeDiNa, BAKFAA e dos modelos de elementos finitos dinâmicos. O BAKFAA foi inserido novamente na discussão para efeito de comparação entre as diversas retroanálises apresentadas nesta pesquisa. Na Figura 110 e na Figura 111 são ilustradas a magnitude dos módulos retroanalizados nos diferentes *softwares* para o segmento 02 e 04, respectivamente.

Figura 110 - Módulos resilientes equivalentes - Retroanálise segmento 02.



Fonte: A autora (2022).

Figura 111 - Módulos resilientes equivalentes - Retroanálise segmento 04.



Fonte: A autora (2022).

No segmento 02, nas camadas de asfalto, base e sub-base os módulos obtidos pelo BackMeDiNa são, em média, 22% maiores que os valores dos módulos do BAKFAA e em torno de 17% acima dos valores obtidos no MEF. O que não ocorre para a camada de subleito, onde o BackMeDiNa encontrou valores 12% e 15% menores ao comparar com o BAKFAA e o MEF, respectivamente. Analisando o BAKFAA e o MEF, os valores dos módulos foram 4% maiores em todas as camadas na retroanálise realizada com MEF.

Já no segmento 04, os módulos das camadas de base e sub-base obtidos pelo BackMeDiNa são, em média, 8% maiores que o BAKFAA e 7% maiores que os encontrados pelo MEF. A camada de asfalto, ao contrário do que aconteceu no segmento 02, apresenta o maior módulo retroanalisado através do MEF, seguido pelo valor obtido no BAKFAA e no BackMeDiNa. Para o subleito, o BackMeDiNa, assim como no segmento 02, apresentou valores 1% e 2% menores ao comparar com o BAKFAA e o MEF, respectivamente. Ao avaliar os valores do BAKFAA e do MEF, os valores dos módulos foram 1% maiores em todas as camadas na retroanálise realizada com o MEF.

Dessa forma, a retroanálise através do MEF se mostrou bastante satisfatória para obtenção dos módulos resilientes dos pavimentos, pois os resultados dos erros relativos foram próximos dos limites estabelecidos por Bueno (2016) na Tabela 14 e os erros RMS foram próximos a 5%, critério de parada estabelecido pelos *softwares* BackMeDiNa e BAKFAA, por exemplo.

Logo os módulos resilientes equivalentes obtidos pelas retroanálises através do MEF, podem ser empregados na avaliação estrutural dos pavimentos através da previsão de desempenho, como a vida de fadiga, por exemplo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

O estudo do comportamento estrutural dos pavimentos em campo contribui na tomada de decisão referente à gestão das estradas. O uso dos módulos resilientes equivalentes obtidos nas retroanálises auxilia na previsão de desempenho dos pavimentos e contribui nas decisões quanto às intervenções, como reforços ou restaurações, por exemplo.

O cálculo retroativo dos módulos resilientes equivalentes de um pavimento pode ser obtido através da comparação entre as bacias de deflexão medidas em campo com as bacias calculadas através de *softwares* de retroanálise baseados em procedimentos e otimização iterativa, relacionados a TSCE ou ao MEF.

Com base nos resultados dos módulos resilientes equivalentes obtidos através dos *softwares* BackMeDiNa, BAKFAA e Abaqus as principais conclusões da dissertação foram:

- a) A metodologia proposta por Theisen *et al.* (2009) para correção das medidas das bacias deflectométricas do ensaio VB para dados de um ensaio FWD na entrada dos *softwares* de análise elástica de múltiplas camadas, se mostrou adequada, pois os valores obtidos para os módulos resilientes equivalentes dos segmentos foram semelhantes. Essa semelhança é evidenciada ao comparar as retroanálises do segmento 02 utilizando o BackMeDiNa e do segmento 04 com o cálculo no BAKFAA;
- b) A metodologia da correção de temperatura para 25°C proposta por Bueno (2016) e Bueno (2020) com base no ábaco do DER-SP (2006) também se mostrou importante ser considerada nas análises. Ao aplicar o ajuste nas primeiras medidas de deflexão (D0, D1 e D2) e retroanalisar novamente os módulos resilientes equivalentes para as medidas da VB, obtiveram-se valores finais maiores (entre 1% e 26%) para os módulos da camada termossuscetível (revestimento);
- c) Para todos os pontos com as maiores deflexões em D0 foram obtidos os menores valores de módulos resilientes equivalentes, tanto no *software* BackMeDiNa quanto no BAKFAA;

- d) Os módulos resilientes equivalentes gerados pelo BackMeDiNa foram até 22% maiores que os obtidos através do BAKFAA, ao comparar resultados obtidos através do FWD. Quando comparados os módulos gerados pela VB, esta diferença foi maior, de até 81%. Resultado que evidencia que as retroanálises provenientes dos dados da VB apresentam maiores erros e discrepâncias;
- e) O *software* BackMeDiNa mostrou-se apropriado para a retroanálise dos módulos resilientes equivalentes, uma vez que, os valores encontrados são próximos aos valores da literatura e aos módulos do ensaio realizado pelo LAPAV em 2019 (7338, 11111 e 7158 MPa para a camada de revestimento);
- f) O *software* BackMeDiNa apresentou menores erros RMS, erros relativos admissíveis e desvios padrões nos resultados quando comparado ao BAKFAA. Sendo assim, o BackMeDiNa mostrou-se melhor que o BAKFAA para delinear as bacias deflectométricas teóricas;
- g) A bacia de deflexão gerada pelo modelo de elementos finitos dinâmico é mais próxima da bacia de campo do que a gerada pelo modelo de elementos finitos estáticos;
- h) A condição de aderência entre as camadas é um fator importante na consideração da retroanálise, uma vez que, ao optar por uma estrutura com completa aderência, pode-se estar dimensionando uma durabilidade inadequada ao pavimento. A condição utilizada nesta pesquisa, e sugerida como entrada no *software* BackMeDiNa, é a de não aderência entre as camadas, optando-se assim, por uma análise no cenário menos favorável. A condição de não aderência gera maiores deflexões nas simulações dos modelos de elementos finitos estáticos e dinâmicos, quando comparadas aos modelos com aderência parcial ou nula, para os mesmos módulos atribuídos à estrutura do pavimento. Sendo assim, ao escolher essa condição de aderência para as análises, simula-se o cenário mais propício ao surgimento de defeitos;
- i) Dentre todos os modelos simulados, a bacia calculada mais próxima a de campo foi a bacia deflectométrica simulada no modelo de elementos finitos dinâmico sem aderência. Foi a bacia que apresentou menores erros

relativos e menores erros RMS quando comparada aos demais cenários de análises;

- j) A partir da retroanálise realizada com as variações de módulos sementes propostos nesta pesquisa, é possível concluir que o modelo dinâmico sem aderência prevê de forma satisfatória a resposta estrutural do pavimento após a aplicação de uma carga do teste FWD, pois gera bacias calculadas muito próximas a de campo (erros RMS menores que 5%);
- k) O modelo de elementos finitos foi validado através da comparação dos resultados dos módulos retroanalizados com a solução analítica pela TSCE, obtida no BackMeDiNa e no BAKFAA. Pode-se concluir que, conforme a comparação entre os módulos resilientes equivalentes gerados na TSCE e no MEF, a diferença entre os resultados é, em média, de 3%, ou seja, foram encontradas respostas muito próximas para os valores dos módulos obtidos pelas diferentes abordagens;
- l) O uso de técnicas avançadas, como o MEF, para a retroanálise, permite que, em análises futuras, outras configurações de carregamento possam ser simuladas e testadas na seção do pavimento modelada, sem a necessidade de gastos com ensaios em campo.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Na sequência são apresentadas sugestões para pesquisas futuras com o intuito de complementar a presente pesquisa.

- a) Para a correção de temperatura das medidas de deflexão obtidas nos ensaios de campo, aplicar a equação proposta por *Pais et al.* (2018) e verificar se os resultados são semelhantes aos corrigidos através da equação proposta por Bueno (2016) com base no DER-SP (2006);
- b) Para comparação entre os dados das bacias deflectométricas do ensaio VB e do ensaio FWD, estudar propostas mais simplificadas para conversão dos resultados obtidos em campo e posterior entrada nos *softwares* de retroanálise;
- c) No modelo de elementos finitos, embora a pesquisa tenha utilizado geometrias já validadas na literatura no que diz respeito a obtenção das medidas das bacias de deflexão, simular estruturas com medidas

horizontais acima de 5000 mm. Verificar se desta forma as últimas medidas de deflexão têm seus valores melhorados;

- d) Realizar novos ensaios de deflexão na Estrada Rio do Morro e aplicar o modelo de elementos finitos dinâmicos, sugerido na presente pesquisa, para retroanálise dos módulos resilientes equivalentes. Comparar com resultados encontrados por outras metodologias, como o BackMeDiNa, por exemplo;
- e) Implementar no modelo de elementos finitos análises não lineares e mais considerações quanto ao comportamento dos materiais das camadas do pavimento, como a viscoelasticidade e a plasticidade, tornando a análise mais robusta. Neste tópico também podem ser acrescentados ensaios dos materiais granulares e do revestimento em busca da melhor caracterização das camadas.

REFERÊNCIAS

- AEDO, Jorge Luis Castillo. **Programa para análise tridimensional de pavimentos asfálticos**. 88 f. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/380625919/Jorge-Castilho-Aedo-MSc-1997>. Acesso em: 9 jul. 2022.
- ALMEIDA, Jordana Vieira de. **Modelagem numérica tridimensional de pavimentos de concreto submetidos às cargas de tráfego e ao empenamento térmico**. 145 f. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1037//0033-2909.126.1.78>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- AMORIM, Sara I. R. *et al.* A model for equivalent axle load factors. **International Journal of Pavement Engineering**, Londres, v. 16, p. 881–893, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.968570>. Acesso em: 20 jun. 2020.
- APONTE, Carlos Fernando Cogollo. **Utilização do método dos elementos finitos no desenvolvimento de modelos de corte de material**. 101 f. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: https://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0912769_2011_pretextual.pdf?msckid=3fa9b9f3b39611eca41d010d4d44bbb3. Acesso em: 2 abr. 2022.
- ARSHAD, A. K. *et al.* Comparison between laboratory and field measured resilient modulus for flexible pavement. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, Shah Alam, v. 9, n. 10, p. 558–568, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/328868421>. Acesso em: 8 nov. 2020.
- ASSAN, Aloisio Ernesto. **Método dos elementos finitos: primeiros passos**. 2. ed. Campinas: Unicamp, 2010.
- AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos elementos finitos**. 1. ed. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. v. 1 *E-book*.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERKENBROCK, Caroline Angélica. **Comparativo da resposta estrutural de um pavimento flexível simulado numericamente, com base nos dados obtidos pelos ensaios com o FWD e com a Viga Benkelman**. 161 f. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2022. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cct/id_cpmenu/706/2022_05_29_Caroline_Ang_lica_Berkenbrock_16569557459503_706.pdf. Acesso em: 5 nov. 2022.
- BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 3ªed. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008.

BOCK, André Luis. **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado**. 142 f. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0102-33061996000200017>. Acesso em: 2 nov. 2022.

BOETTCHER, Ana Claudia. **Drenagem em estradas: Concepção do sistema de drenagem subsuperficial e estudo de eficiência de drenos cegos x drenos tubulares para diferentes tecnologias de tubos**. 175 f. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2012. Disponível em:

<https://sistemabu.udesc.br/pergamumweb/vinculos/000000/0000000000017/00001706.pdf>. Acesso em: 7 set. 2021.

BORDIM, Cassia. **Utilização do método de elementos finitos na avaliação das respostas estruturais de pavimentos flexíveis**. 103 f. 2010. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2010. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/handle/123456789/222>. Acesso em: 8 nov. 2020.

BORGES, Clarissa Beatriz Sandoval. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com Viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. 197 f. 2001. 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: 26 set. 2021.

BRANCO, Fernando; SANTOS, Luís Picado; PEREIRA, Paulo. **Pavimentos rodoviários**. Coimbra: Almedina, 2016.

BUENO, Lucas *et al.* Retroanálise de módulos de resiliência: Aspectos inerentes ao processo iterativo de ajuste de bacias deflectométricas. **Revista CIATEC – UPF**, [s. l.], v. 12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5335/ciatec.v12i1.10865>. Acesso em: 20 mar. 2022.

BUENO, Lucas Dotto. **Avaliação deflectométrica e de rigidez: Estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS**. 460 f. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7926>. Acesso em: 15 jun. 2020.

CAMARINI, Guilherme Crepaldi; JUNIOR, Carlos Alberto Prado da Silva; FONTENELE, Heliana Barbosa. Avaliação de bacias de deflexões retroanalizadas pelo programa BackMeDiNa. **33º Congresso de Ensino e Pesquisa em Transporte da ANPET**, Balneário Camboriú, p. 1133–1144, 2019. Disponível em: http://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Dimensionamento,Avaliação e Gestão de Pavimentos I/2_175_AC.pdf. Acesso em: 3 abr. 2022.

CANESTRARI, Francesco *et al.* Mechanical testing of interlayer bonding in asphalt

pavements. **Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials - RILEM State-of-the-Art Reports 9**, [s. l.], 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5104-0>. Acesso em: 10 out. 2021.

CARVALHO, Roberto Chust; FILHO, Jasson Rodrigues de Figueiredo. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118:2014**. 4ªed. São Carlos: EDUFSCAR, 2014.

CEYLAN, Halil; GOPALAKRISHNAN, Kasthurirangan. Finite element based hybrid evolutionary optimization approach to solving rigid pavement inversion problem. **Engineering with Computers**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 1–13, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00366-012-0281-y>. Acesso em: 7 nov. 2020.

CEYLAN, Haul *et al.* Backcalculation of full-depth asphalt pavement layer moduli considering nonlinear stress-dependent subgrade behavior. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 171–182, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298430500150981>. Acesso em: 9 jul. 2022.

COOK, Robert D. *et al.* **Concepts and applications of finite element analysis**. 4. ed. Madison: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CORREIA, João dos Santos. Retroanálise de resultados de caracterização estrutural de pavimentos. **8º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia / V Congresso de Engenharia de Moçambique**, Maputo, p. 667–668, 2017. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/clme/2017/Proceedings/data/papers/6566.pdf>. Acesso em: 3 abr. 2022.

COSTA, Gessyca MENEZES *et al.* Efeito de diferenças de características mecânicas de materiais para pavimentos obtidos em laboratório e campo. **XXVIII ANPET – Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes**, Curitiba, p. 12, 2014. Disponível em: https://www.anpet.org.br/ssat/interface/content/autor/trabalhos/publicacao/2014/438_AC.pdf. Acesso em: 2 out. 2022.

DENG, Yong *et al.* Development of equivalent stationary dynamic loads for moving vehicular loads using artificial intelligence-based finite element model updating. **Engineering with Computers**, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00366-021-01306-w>. Acesso em: 11 nov. 2022.

DER-SP. **Departamento de Estradas de Rodagem - IP-DE-P00/001: Projeto de pavimentação: instrução de projeto**. São Paulo: DER/SP, 2006. *E-book*.

DNIT. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2ªed. Rio de Janeiro: IPR-720, 2006.

DUNCAN, J M; MONISMITH, C L; WILSON, E L. Finite Element Analyses of Pavements. **Highway Research Board**, Berkeley, v. 38, p. 18–33, 1968. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1968/228/228-003.pdf>. Acesso em: 11 set. 2021.

FERREIRA, Felipe de Almeida. **Análise do dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando o programa SISPAVBR**. 125 f. 2013. Graduação (Trabalho de

Conclusão de Curso em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10009006.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2022.

FERRI, Santi. **Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos**. 331 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica Da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-29072013-121302/publico/FERRIS_2013 DISSERTACAO_unprotected.pdf. Acesso em: 14 set. 2021.

FHWA. **Federal Highway Administration - Performance Program Manual for Falling Weight Deflectometer**. 4.1ed. McLean: LTPP, 2006. *E-book*.

FONSECA, Jorge Luiz Gomes. **Um método de retroanálise de bacias de deflexão de pavimentos**. 150 f. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2002.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV**. 294 f. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://engfranco.com.br/pavimentos>. Acesso em: 20 jun. 2020.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, IPR, DNIT, 2020. *E-book*.

FRITZEN, Marcos Antonio *et al.* Estudo de projeto de reforço utilizando o método de dimensionamento nacional - MEDINA. **33º Congresso de Ensino e Pesquisa em Transporte da ANPET**, Balneário Camboriú, p. 1–7, 2019. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Dimensionamento, Avaliação e Gestão de Pavimentos VI/6_448_AC.pdf. Acesso em: 14 dez. 2020.

FU, Guozhi *et al.* Accuracy evaluation of statically backcalculated layer properties of asphalt pavements from falling weight deflectometer data. **NRC Research Press**, [s. l.], v. 325, n. June 2019, p. 317–325, 2020. Disponível em: [dx.doi.org/10.1139/cjce-2019-0152](https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0152). Acesso em: 30 out. 2022.

GHADIMI, Behzad *et al.* Effects of geometrical parameters on numerical modeling of pavement granular material. **Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements - Proceedings of the 2013 Airfield and Highway Pavement Conference**, Reston, p. 1291–1303, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/9780784413005.109>. Acesso em: 11 set. 2021.

GOKTEPE, A. Burak; AGAR, Emine; LAV, A. Hilmi. Advances in backcalculating the mechanical properties of flexible pavements. **Advances in Engineering Software**, [s. l.], 2021.

I., v. 37, n. 7, p. 421–431, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.advgengsoft.2005.10.001>. Acesso em: 7 nov. 2020.

GOPALAKRISHNAN, Kasthurirangan. Neural network-swarm intelligence hybrid nonlinear optimization algorithm for pavement moduli back-calculation. **Journal of Transportation Engineering**, Reston, v. 136, n. 6, p. 528–536, 2010. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000128](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000128). Acesso em: 8 nov. 2020.

HADI, Muhammad N.S.; BODHINAYAKE, B. C. Non-linear finite element analysis of flexible pavements. **Advances in Engineering Software**, [s. l.], v. 34, n. 11–12, p. 657–662, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(03\)00109-1](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(03)00109-1). Acesso em: 7 nov. 2020.

HAMIM, Asmah *et al.* Comparative study on using static and dynamic finite element models to develop FWD measurement on flexible pavement structures. **Construction and Building Materials**, Wollongong, v. 176, p. 583–592, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.082>. Acesso em: 11 set. 2021.

HIBBELER, R. C. **Resistência de Materiais**. 5ªed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. *E-book*.

HOLANDA, Aurea da Silva *et al.* Finite element modeling of flexible pavements. **Conference: XXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, Fortaleza, n. September, 2006. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br:8080/ri/handle/123456789/1380>. Acesso em: 2 out. 2021.

HORAK, Emile. Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, [s. l.], v. 50, n. 2, p. 2–9, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228663228_Benchmarking_the_structural_condition_of_flexible_pavements_with_deflection_bowl_parameters. Acesso em: 19 set. 2021.

HUANG, Yang H. **Pavement Analysis and Design**. 2ªed. Nova Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004. *E-book*.

JIANG, Xi *et al.* Evaluation of inverted pavement by structural condition indicators from falling weight deflectometer. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 319, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125991>. Acesso em: 30 out. 2022.

KHAZANOVICH, Lev; LUKANEN, Erland; TOMPKINS, Derek. Evaluation of bearing capacity of low-volume roads in Minnesota. **Transportation Research Record**, [s. l.], v. 2433, n. 2, p. 79–86, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2433-09>. Acesso em: 2 out. 2021.

KIM, Minkwan; TUTUMLUER, Erol; KWON, Jayhyun. Nonlinear pavement foundation modeling for three-dimensional finite-element analysis of flexible pavements. **International Journal of Geomechanics**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 195–208, 2009. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1532-3641\(2009\)9:5\(195\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1532-3641(2009)9:5(195)). Acesso em: 10 out. 2021.

KNABBEN, Ramon Mendes; CARPIO, Joe Arnaldo Villena del. **Como usar o software MeDiNa: o guia prático para utilização do software MeDiNa de dimensionamento de pavimentos flexíveis**. [S. l.]: E-book, 2020. *E-book*.

KUO, Chen Ming; CHOU, Fang Ju. Development of 3-D finite element model for flexible pavements. **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 707–717, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02533839.2004.9670918>. Acesso em: 10 out. 2021.

LING, Jianming *et al.* Analysis of airfield composite pavement responses using full-scale accelerated pavement testing and finite element method. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 212, p. 596–606, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.336>. Acesso em: 2 out. 2021.

LIU, Pengfei *et al.* Application of finite layer method in pavement structural analysis. **Applied Sciences**, Basel, v. 7, n. 6, p. 611, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app7060611>. Acesso em: 23 maio 2021.

LIU, Pengfei *et al.* Application of semi-analytical finite element method to evaluate asphalt pavement bearing capacity. **International Journal of Pavement Engineering**, Londres, v. 19, n. 6, p. 479–488, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1175562>. Acesso em: 26 fev. 2021.

LIU, Pengfei; WANG, Dawei; OESER, Markus. Application of semi-analytical finite element method coupled with infinite element for analysis of asphalt pavement structural response. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, Xiam, v. 2, n. 1, p. 48–58, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.01.005>. Acesso em: 27 fev. 2021.

LIU, Pengfei; WANG, Dawei; OESER, Markus. Application of semi-analytical finite element method to analyze asphalt pavement response under heavy traffic loads. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, Xiam, v. 4, n. 2, p. 206–214, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.03.003>. Acesso em: 27 fev. 2021.

LUIS, André Denis. **Utilização do equipamento tipo Falling Weight Deflectometer para medição de deflexão recuperável para diferentes tipos de pavimentos asfálticos**. 231 f. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2009. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/468413>. Acesso em: 25 nov. 2022.

MAGALHÃES, Bruno Alberto da Cunha. **Comparação de diferentes métodos de avaliação da capacidade de carga de pavimentos rodoviários**. 88 f. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Braga, 2015. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/40470>. Acesso em: 25 set. 2021.

MALYSZ, Rodrigo. **Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos**. 350 f. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande

do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/19046>. Acesso em: 5 nov. 2022.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória**. 461 f. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <https://www.pec.coppe.ufrj.br/en/doctoral-thesis/343-2004/3618-geraldo-luciano-de-oliveira-marques>. Acesso em: 1 nov. 2022.

MARTINS, Márcio da Fonseca *et al.* Avaliação da não linearidade de módulos de resiliência retroanalizados de materiais granulares de base de pavimentos obtidos durante o controle tecnológico da duplicação de uma rodovia no RS. **Revista CIATEC**, Santa Maria, v. 10, p. 31–42, 2018. Disponível em: <http://seer.upf.br/index.php/ciatec/article/view/7860/4768>. Acesso em: 14 set. 2021.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

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

MEDINA, J. *et al.* Utilização de ensaios deflectométricos e de laboratório para avaliação estrutural de pavimentos. **28ª Reunião Anual de Pavimentação**, Belo Horizonte, v. 1, p. 595–625, 1994.

MEDINA, J.; MACÊDO, J. A. G.; MOTTA, L. M. G. Utilização de ensaios deflectométricos e de laboratório para avaliação estrutural de pavimentos. **28ª Reunião Anual de Pavimentação**, Br, p. 595–625, 1994.

MINHOTO, Manuel; PAIS, Jorge C; PEREIRA, Paulo. The temperature effect on the reflective cracking of asphalt overlays. **Road Materials and Pavement Design**, Londres, p. 615–632, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690141>. Acesso em: 21 jul. 2021.

MORAES, Carla Gonçalves de. **Análise de bacias deflectométricas obtidas por 4 equipamentos do tipo Fallin Weight Deflectometer (GWD)**. 280 f. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2015.

MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de carga repetidas**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1991. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/135-1991/753-laura-maria-goretti-da-motta>. Acesso em: 27 jun. 2021.

NERY, Claudia Celene Zago. **Comparativo entre deflexões com viga Benkelman, FWD e LWD na avaliação estrutural e dimensionamento de reforço de pavimento**. 238 f. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020. Disponível em:

https://www.udesc.br/arquivos/cct/id_cpmenu/706/2020_11_27_Claudia_Celene_Zago_Nery_16171999947442_706.pdf. Acesso em: 20 jun. 2021.

NÓBREGA, Eduardo Suassuna. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**. 365 f. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2015/2598-moraes-cg-tm-15-pdf>. Acesso em: 8 nov. 2020.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J. *et al.* Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test. **NDT and E International**, [s. l.], v. 43, n. 7, p. 629–634, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.06.007>. Acesso em: 25 set. 2021.

PAIS, Jorge *et al.* The adjustment of pavement deflections due to temperature variations. **International Journal of Pavement Engineering**, Londres, p. 1–10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1557334>. Acesso em: 25 maio 2021.

PANDOLFO, D.K.; ECHEVERRIA, J.A.S.; SPECHT, L.P. Análise mecânica 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**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 71–86, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.18256/2358-6508/recimed.v3n2p71-86>. Acesso em: 17 out. 2022.

PEREIRA, José Miguel Belucio. **Um prodecimento de retroanálise para pavimentos flexíveis baseado na teoria do ponto inerte e em modelagem matemática**. 938 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-06072007-084827/publico/Miguel.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2021.

PICOUX, B.; EL AYADI, A.; PETIT, C. Dynamic response of a flexible pavement submitted by impulsive loading. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 5, p. 845–854, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.09.001>. Acesso em: 2 out. 2021.

PINTO, I. E.; DOMINGUES, F.A.A. A contribuição ao estudo de correlação entre equipamento medidores de deflexão: Viga Benkelman e Falling Weight Deflectometer. **Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Paviment and Technological Control**, Auburn, p. 43, 2001.

PINTO, Paulo C. *et al.* Metodologias de avaliação e diagnóstico da rede pavimentada do DAER-RS. **Revista Estradas**, Porto Alegre, v. 18, p. 30–37, 2013. Disponível em: <https://issuu.com/revistaestradas/docs/re18>. Acesso em: 16 set. 2021.

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto Simões. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.pdf**. 2ªed. Rio de Janeiro: IBP, 2010.

PONTE, Elaine Cristina Rodrigues. **Avaliação de modelos refinados para instabilidade e vibrações de estruturas bidimensionais**. 90 f. 2007. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil - Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.11334>. Acesso em: 11 set. 2021.

PREUSSLER, Leonardo Appel. **Contribuição ao estudo da deformabilidade de camadas do pavimento**. 129 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-02062008-143306/publico/Dissertacao_Leonardo_Preussler_Revisada.pdf. Acesso em: 21 fev. 2021.

RABAIOTTI, Carlo; CAPREZ, Markus. Mechanical response of asphalt-pavements under static and moving wheel-load. **GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age**, [s. l.], p. 55, 2006. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/40803\(187\)55](https://doi.org/10.1061/40803(187)55). Acesso em: 2 out. 2021.

RABBI, Md Fazle; MISHRA, Debakanta. Using FWD deflection basin parameters for network-level assessment of flexible pavements. **International Journal of Pavement Engineering**, Londres, v. 22, n. 2, p. 147–161, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1580366>. Acesso em: 17 set. 2021.

RANGEL, George Wilton Albuquerque. **Um método para a estimativa da deflexão do pavimento ferroviário lastreado**. 368 f. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/en/doctoral-thesis/595-2017/8644-george-wilton-albuquerque-rangel-2>. Acesso em: 10 jul. 2022.

RIBAS, Jeancarlo. **Parâmetros elásticos típicos de materiais de pavimentos flexíveis do Rio Grande do Sul e sua aplicação em uma análise de custo/benefício**. 190 f. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7868/RIBAS%2CJEANCARLO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 mar. 2022.

RODRIGUES, Regis Martins. Avaliação mecânica dos pavimentos ao projeto e à avaliação estrutural dos pavimentos asfálticos. **29ª Reunião Anual de Pavimentação**, Cuiabá, v. 2, p. 22–345, 1995. Disponível em: <https://www.escavador.com/sobre/1041903/regis-martins-rodrigues>. Acesso em: 16 set. 2021.

SALTAN, Mehmet; TERZI, Serdal; KÜÇÜKSILLE, Ecir Uğur. Backcalculation of pavement layer moduli and Poisson's ratio using data mining. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 38, n. 3, p. 2600–2608, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.050>. Acesso em: 25 set. 2021.

SALVIANO, Willian Renan de Araújo. **Análise do controle construtivo de um pavimento semirrígido por deflexão**. 271 f. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: www.coc.ufrj.br/en/documents2/mestrado/2015/2616-salviano-wra

tm-15-pdf. Acesso em: 20 out. 2022.

SANTOS, Anthony Gomes dos. **Estudo teórico do efeito da interação entre camadas no comportamento estrutural de pavimentos asfálticos**. 87 f. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <http://ieeauthorcenter.ieee.org/wp-content/uploads/IEEE-Reference-Guide.pdf%0Ahttp://wwwlib.murdoch.edu.au/find/citation/ieee.html%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.022%0Ahttps://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper%0Ahttps://tore.tuhh.de/hand>. Acesso em: 3 out. 2021.

SANTOS, Anthony Gomes dos; ASSIS, Rosuel Krum Mathias de; JÚNIOR, José Leomar Fernandes. Efeito da aderência entre camadas na previsão de desempenho de pavimentos asfálticos. **Revista Transportes**, São Paulo, p. 89–101, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/transportes.v27i2.1597>. Acesso em: 27 ago. 2021.

SANTOS, Paulo José Café Ribeiro dos. **Utilização de deflectômetro de peso leve (LWD) em pavimento rodoviário**. 109 f. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Departamento de Ciência e Tecnologia - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.springer.com/series/15440%0Apapers://ae99785b-2213-416d-aa7e-3a12880cc9b9/Paper/p18311>. Acesso em: 18 set. 2021.

SCHERER, Renan Gustavo. **Estudo da influência da condição de aderência entre camadas de pavimentos em seu comportamento mecânico**. 170 f. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Preservação Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/15839>. Acesso em: 25 nov. 2020.

SILVA, Prepredigna Delmiro Elga Almeida da. **Contribuição para o aperfeiçoamento do emprego do programa FEPV2 em estudos e projetos de pavimentos flexíveis**. 118 f. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 1995. Disponível em: [file:///C:/Users/aninh/Google Drive/MESTRADO/5. SES 2021.1/2. PRÉ QUALIFICAÇÃO + ARTIGO - 50%25/0. ARTIGO - 30.06/MENDELEY/Prepredigna Delmiro Elga Almeida da Silva.pdf](file:///C:/Users/aninh/Google%20Drive/MESTRADO/5.SES%2021.1/2.PRÉ%20QUALIFICAÇÃO%20ARTIGO-50%25/0.ARTIGO-30.06/MENDELEY/Prepredigna%20Delmiro%20Elga%20Almeida%20da%20Silva.pdf). Acesso em: 9 jul. 2022.

SILVA, Samuel de Almeida Torquato e. **Modelagem mecanístico-empírica da interface revestimento asfáltico-base granular**. 120 f. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/27260/1/2017_dis_satsilva.pdf. Acesso em: 27 mar. 2022.

SORIANO, Humberto Lima; LIMA, Silvio de Sousa. **Análise de estruturas: Método das Forças e Método dos Deslocamentos**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2004. v. I

SOUSA, Jorge B *et al.* Mechanistic-empirical overlay design method for reflective cracking. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation**

Research Board, Washington, p. 209–217, 2002. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.3141/1809-23>. Acesso em: 20 jun. 2021.

SOUZA JÚNIOR, José Geraldo de. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal**. 218 f. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: https://www.uam.es/gruposinv/meva/publicaciones/jesus/capitulos_espanyol_jesus/2005_motivacion_para_el_aprendizaje_Perspectiva_alumnos.pdf%0Ahttps://www.researchgate.net/profile/Juan_Aparicio7/publication/253571379_Los_estudios_sobre_el_cambio_conceptual_/. Acesso em: 2 abr. 2022.

SYSTÈMES, Dassault. **Abaqus 6.14 Online Documentation**. Providence, USA, 2014. Disponível em: <http://wufengyun.com/v6.14/books/usi/default.htm>. Acesso em: 9 jul. 2022.

TANG, Xiaochao; YANG, Xiaoming. Inverse analysis of pavement structural properties based on dynamic finite element modeling and genetic algorithm. **International Journal of Transportation Science and Technology**, Shanghai, v. 2, n. 1, p. 15–30, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1260/2046-0430.2.1.15>. Acesso em: 6 nov. 2020.

TAREFDER, Rafiqul A.; AHMED, Mesbah U. Modeling of the FWD deflection basin to evaluate airport pavements. **International Journal of Geomechanics**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 205–213, 2014. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000305](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000305). Acesso em: 10 out. 2021.

THEISEN, Klaus Machado *et al.* Método de retroanálise de bacias obtidas por carregamento de eixo padrão através do uso de softwares adaptados para FWD. **XXIII ANPET – Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes - Editora da UFFES**, Vitória, v. 2, 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/268347870_METODO_DE_RETROANALISE_DE_BACIAS_OBTIDAS_POR_CARREGAMENTO_DE_EIXO_PADRAO_ATRAVES_DO_USO_DE_SOFTWARES_ADAPTADOS_PARA_FWD. Acesso em: 26 set. 2021.

TIGDEMIR, Mesut; KALYONCUOGLU, S. Figen; KALYONCUOGLU, U. Yalcin. Application of ultrasonic method in asphalt concrete testing for fatigue life estimation. **NDT and E International**, [s. l.], v. 37, n. 8, p. 597–602, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.03.006>. Acesso em: 25 set. 2021.

TORII, André Jacomel. **Análise dinâmica de estruturas com o método dos elementos finitos generalizados**. 223 f. 2012. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia) - Setor de Tecnologia - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/28386>. Acesso em: 11 set. 2021.

VIEIRA, Gustavo Henrique Veronese. **Avaliação estrutural de pavimentos urbanos a partir de ensaios de campo e retroanálise**. 3–199 f. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Tecnológicas, 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: 25 maio 2020.

VILLELA, Assis Rodrigues Abbud; MARCON, Antônio Furtado. Avaliação estrutural de pavimentos utilizando um método simplificado de retroanálise. **Retran-2CL. 33ª Reunião Anual de Pavimentação**, Florianópolis, p. 622–633, 2001. Disponível em: <https://www.escavador.com/sobre/889800/assis-rodrigues-abbud-villela>. Acesso em: 7 maio 2021.

VYAS, Vidhi; SINGH, Ajit Pratap; SRIVASTAVA, Anshuman. Prediction of asphalt pavement condition using FWD deflection basin parameters and artificial neural networks. **Road Materials and Pavement Design**, Londres, v. 0, n. 0, p. 1–19, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1797855>. Acesso em: 8 nov. 2020.

WANG, Hao *et al.* Prediction of airfield pavement responses from surface deflections: comparison between the traditional backcalculation approach and the ANN model. **Road Materials and Pavement Design**, Londres, v. 22, n. 9, p. 1930–1945, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1733638>. Acesso em: 17 set. 2021.

WANG, Hao *et al.* Structural assessment of asphalt pavement condition using backcalculated modulus and field data. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 211, p. 943–951, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.250>. Acesso em: 10 out. 2021.

WU, Shuhua *et al.* Effects of interlayer bonding conditions between semi-rigid base layer and asphalt layer on mechanical responses of asphalt pavement structure. **International Journal of Pavement Research and Technology**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 274–281, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.02.003>. Acesso em: 6 fev. 2021.

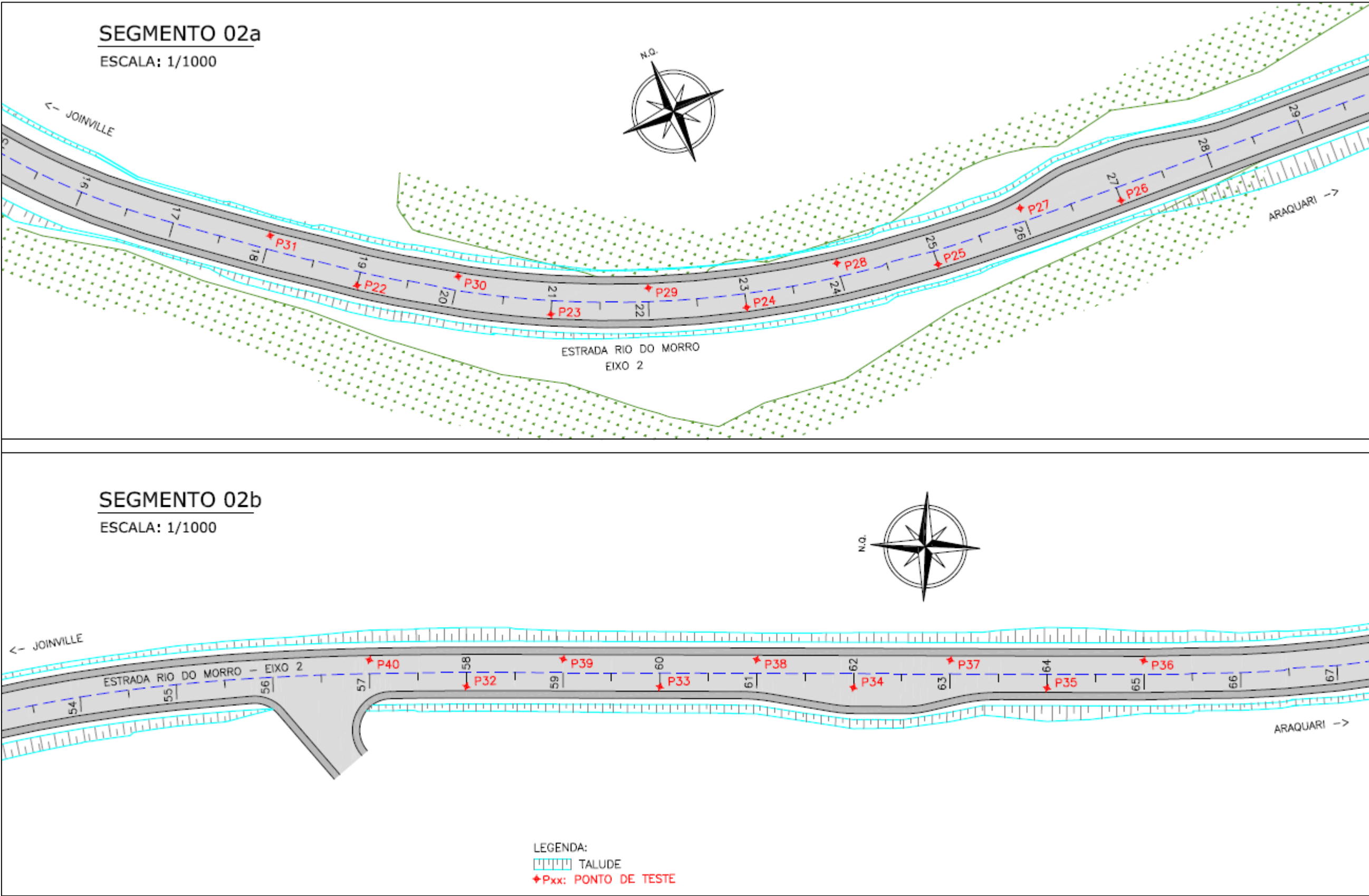
YASSENN, Osama Mahmoud; ENDUT, Intan Rohani; ISHAK, Siti Zaharah. Finite Element Modelling of Flexible Pavement. **Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)**, Selangor, v. 2, n. 1, p. 3159–3199, 2015. Disponível em: <http://www.jmest.org/wp-content/uploads/JMESTN42350341.pdf>. Acesso em: 10 set. 2021.

YOO, Pyeong Jun; AL-QADI, Imad L. Effect of transient dynamic loading on flexible pavements. **Transportation Research Record**, [s. l.], n. 1990, p. 129–140, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/1990-15>. Acesso em: 10 out. 2021.

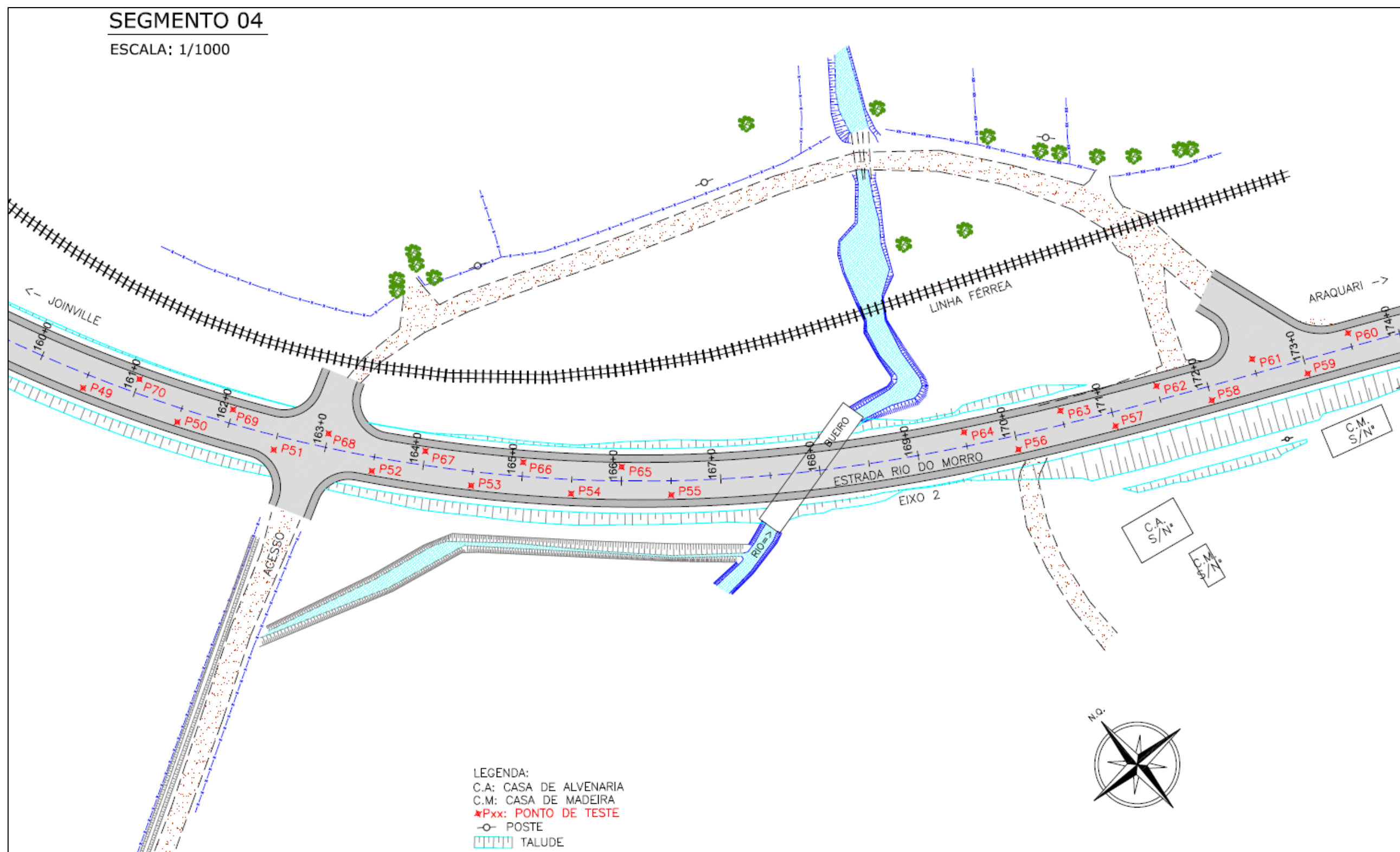
ZHENG, Yuanxun; ZHANG, Peng; LIU, Heng. Correlation between pavement temperature and deflection basin form factors of asphalt pavement. **International Journal of Pavement Engineering**, Londres, v. 20, n. 8, p. 1–6, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1356172>. Acesso em: 16 jun. 2021.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. **The finite element method: Its basis and fundamentals**. 6ªed. Burlington: Elsevier, 2005.

ANEXO A - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE TESTE



Fonte: Nery (2020)



Fonte: Nery (2020).

ANEXO B - BACIAS DE DEFLEXÃO MEDIDAS EM CAMPO

Tabela 44 - Localização dos pontos de teste utilizados na pesquisa.

Ponto	Eixo	Estaca	Lado	Coordenada E	Coordenada N
				Datum SIRGAS 2000	
23	2	21+0	Direito	720820.259	7082902.599
24	2	23+0	Direito	720857.625	7082887.026
28	2	24+0	Esquerdo	720878.360	7082887.560
31	2	18+0	Esquerdo	720774.360	7082941.625
32	2	58+0	Direito	721357.461	7082539.371
34	2	62+0	Direito	721358.611	7082459.395
36	2	65+0	Esquerdo	721365.223	7082399.524
37	2	63+0	Esquerdo	721364.631	7082439.481
39	2	59+0	Esquerdo	721363.484	7082519.472
40	2	57+0	Esquerdo	721362.588	7082559.521
50	2	161+10	Direito	721672.303	7080810.722
51	2	162+10	Direito	721672.359	7080793.833
52	2	163+10	Direito	721695.516	7080777.718
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
59	2	173+0	Direito	721850.933	7080669.621
62	2	171+10	Esquerdo	721826.259	7080687.582
70	2	161+0	Esquerdo	721672.169	7080822.231

Fonte: Adaptado de Nery (2020).

Tabela 45 - Dados obtidos com o equipamento FWD para o segmento 02.

Ponto	Carga (kgf)	Deflexão (1 x 10 ⁻³ mm ou µm)							Temp.		Data
		FWD D0	FWD D1	FWD D2	FWD D3	FWD D4	FWD D5	FWD D6	Ar	Pav.	06/06/19
	kgf	0cm	20cm	30cm	45cm	60cm	90cm	120cm	°C	°C	Hora
23	4218	313	224	171	121	94	61	47	22	23	13:53
24	4166	316	228	174	124	96	61	47	22	23	13:54
28	4154	370	280	221	156	120	76	58	23	24	14:07
31	4034	324	231	174	113	83	52	40	22	24	14:10
32	4209	325	234	180	127	98	65	49	23	24	14:20
34	4049	300	220	170	121	93	60	45	23	24	14:21
36	4221	355	257	194	132	89	58	41	23	25	14:25
37	4076	322	227	168	115	87	55	41	23	25	14:26
39	4194	328	230	177	124	95	62	47	23	25	14:28
40	4169	316	226	174	122	96	62	48	23	25	14:29

Fonte: Adaptado de Nery (2020).

Tabela 46 - Dados obtidos com o equipamento FWD para o segmento 04.

Ponto	Carga (kgf)	Deflexão (1 x 10 ⁻³ mm ou µm)							Temp.		Data
		FWD D0	FWD D1	FWD D2	FWD D3	FWD D4	FWD D5	FWD D6	Ar	Pav.	06/06/19
	kgf	0cm	20cm	30cm	45cm	60cm	90cm	120cm	°C	°C	Hora
50	4104	512	339	245	158	116	73	56	22	27	15:30
51	4063	450	292	206	134	100	65	50	23	27	15:31
52	4026	473	323	242	157	119	77	61	22	27	15:32
54	4044	484	320	234	156	113	72	54	23	27	15:33
55	4138	490	323	235	157	116	74	57	23	27	15:34
56	4128	373	250	184	119	85	54	40	23	26	15:40
57	4128	490	347	259	177	134	91	69	23	26	15:41
59	4178	495	331	241	159	120	79	62	23	26	15:43
62	4037	476	337	247	165	127	87	67	23	26	15:49
70	4068	392	272	200	135	100	66	50	23	25	16:00

Fonte: Adaptado de Nery (2020).

Tabela 47 - Dados obtidos com o equipamento VB para o segmento 02.

Ponto	Deflexão (1 x 10 ⁻³ mm ou µm)							Temperatura		Constante
	VB D0	VB D1	VB D2	VB D3	VB D4	VB D5	VB D6	Ar	Pav.	2,056
	0cm	20cm	30cm	45cm	60cm	90cm	120cm	°C	°C	Data
23	411	308	267	226	185	144	103	25	29,5	06/12/2019
24	411	308	247	206	164	103	82	25	29,5	06/12/2019
28	555	493	432	329	288	185	144	27,5	33	06/12/2019
31	411	370	308	226	164	123	82	26	31	06/12/2019
32	288	226	185	144	123	103	82	24	26	06/12/2019
34	267	247	226	185	144	103	82	24	27	06/12/2019
36	308	226	185	164	144	103	82	24	28	06/12/2019
37	267	206	185	164	144	62	41	23,5	28	06/12/2019
39	267	247	206	164	123	82	62	23	26	06/12/2019
40	247	226	185	144	123	82	62	23	26	06/12/2019

Fonte: Adaptado de Nery (2020).

Tabela 48 - Dados obtidos com o equipamento VB para o segmento 04.

Ponto	Deflexão (1 x 10 ⁻³ mm ou µm)							Temperatura		Constante
	VB D0	VB D1	VB D2	VB D3	VB D4	VB D5	VB D6	Ar	Pav.	2,056
	0cm	20cm	30cm	45cm	60cm	90cm	120cm	°C	°C	Data
50	370	329	288	206	123	82	62	27	37	06/12/2019
51	288	267	247	185	144	82	62	27	37,5	06/12/2019
52	329	267	206	164	123	103	62	27	38	06/12/2019
54	288	267	206	164	103	62	41	27	38	06/12/2019
55	329	288	206	144	123	103	62	28	38,5	06/12/2019
56	247	226	185	123	82	62	41	28	37	06/12/2019
57	288	247	206	164	123	82	62	29	38	06/12/2019

Ponto	Deflexão (1 x 10 ⁻³ mm ou µm)							Temperatura		Constante
	VB D0	VB D1	VB D2	VB D3	VB D4	VB D5	VB D6	Ar	Pav.	2,056
	0cm	20cm	30cm	45cm	60cm	90cm	120cm	°C	°C	Data
59	308	267	226	164	123	82	82	29	38	06/12/2019
62	391	350	267	226	185	123	82	26	35,5	06/12/2019
70	206	185	144	123	82	62	41	27	37,5	06/12/2019

Fonte: Adaptado de Nery (2020).

APÊNDICE A - MÓDULOS RESILIENTES EQUIVALENTES - BACKMEDINA

Tabela 49 - Valores dos módulos do segmento 02 - ensaio FWD - BackMeDiNa.

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (µm)						
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		0cm	20cm	30cm	45cm	60cm	90cm	120cm
23	Campo	313	224	171	121	94	61	47
	Retroanalísada	311	224	176	129	98	61	42
24	Campo	316	228	174	124	96	61	47
	Retroanalísada	324	231	180	130	98	61	42
28	Campo	370	280	221	156	120	76	58
	Retroanalísada	379	276	218	161	123	77	54
31	Campo	324	231	174	113	83	52	40
	Retroanalísada	330	226	171	119	87	53	37
32	Campo	325	234	180	127	98	65	49
	Retroanalísada	325	234	184	135	103	64	44
34	Campo	300	220	170	121	93	60	45
	Retroanalísada	304	219	173	127	96	60	42
36	Campo	355	257	194	132	89	58	41
	Retroanalísada	364	251	189	131	95	57	40
37	Campo	322	227	168	115	87	55	41
	Retroanalísada	327	226	172	121	89	54	38
39	Campo	328	230	177	124	95	62	47
	Retroanalísada	327	233	181	131	99	61	42
40	Campo	316	226	174	122	96	62	48
	Retroanalísada	311	225	177	130	99	62	43
Média Campo		326,9	235,7	180,3	125,5	95,1	61,2	46,3
Média Retroanalísada		330,2	234,5	182,1	131,4	98,7	61	42,4
Ponto	Módulos resilientes equivalentes (MPa)					Erro RMS (µm)		
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito				
23	13045	1041	695	224		5,126		
24	12061	949	634	221		4,795		
28	11214	861	575	175		3,287		
31	10549	801	548	242		4,183		
32	12664	985	666	213		5,030		
34	13297	996	699	218		3,475		
36	10295	772	485	233		3,240		
37	10940	830	575	239		3,734		
39	12061	938	634	221		4,961		
40	13131	1033	699	218		4,884		
Média	11925,70	920,60	618,10	221,20		4,272		
DP	1115,56	97,88	75,77	18,80				
CV (%)	9,35	10,63	12,26	8,50				

Tabela 50 - Valores dos módulos do segmento 02 - ensaio VB - BackMeDiNa.

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (µm)						
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		16cm	25cm	34cm	47cm	62cm	91cm	121cm
23	Campo	205,5	154	133,5	113	92,5	72	51,5
	Retroanalísada	199	168	144	119	96	65	46
24	Campo	205,5	154	123,5	103	82	51,5	41
	Retroanalísada	205	164	135	105	81	52	36
28	Campo	277,5	246,5	216	164,5	144	92,5	72
	Retroanalísada	288	244	211	174	140	96	68
31	Campo	205,5	185	154	113	82	61,5	41
	Retroanalísada	214	175	146	116	90	58	41
32	Campo	144	113	92,5	72	61,5	51,5	41
	Retroanalísada	139	117	101	82	66	45	32
34	Campo	133,5	123,5	113	92,5	72	51,5	41
	Retroanalísada	158	132	113	92	73	49	34
36	Campo	154	113	92,5	82	72	51,5	41
	Retroanalísada	145	123	106	88	71	48	34
37	Campo	133,5	103	92,5	82	72	31	20,5
	Retroanalísada	141	112	92	70	53	33	23
39	Campo	133,5	123,5	103	82	61,5	41	31
	Retroanalísada	152	123	102	81	63	41	28
40	Campo	123,5	113	92,5	72	61,5	41	31
	Retroanalísada	129	108	93	76	61	41	29
Média Campo		171,6	142,9	121,3	97,6	80,1	54,5	41,1
Média Retroanalísada		177	146,6	124,3	100,3	79,4	52,8	37,1
Ponto	Módulos resilientes equivalentes (MPa)					Erro RMS (µm)		
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito				
23	12163	925	616	105		7,612		
24	8443	642	443	127		6,638		
28	8443	642	443	71		3,909		
31	9541	734	426	114		5,450		
32	16846	1309	875	151		11,932		
34	13779	1085	725	138		10,010		
36	16638	1309	875	140		10,132		
37	13210	1028	510	196		13,143		
39	12212	949	634	163		6,483		
40	17704	1345	931	165		4,015		
Média	12897,90	996,80	647,80	137,00		7,932		
DP	3424,09	269,40	195,13	35,21				
CV (%)	26,55	27,03	30,12	25,70				

Tabela 51 - Valores dos módulos do segmento 04 - ensaio FWD - BackMeDiNa.

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (µm)						
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		0cm	20cm	30cm	45cm	60cm	90cm	120cm
50	Campo	512	339	245	158	116	73	56
	Retroanalísada	512	335	245	167	121	72	50
51	Campo	450	292	206	134	100	65	50
	Retroanalísada	451	288	209	143	105	63	44
52	Campo	473	323	242	157	119	77	61
	Retroanalísada	476	326	245	170	125	75	52
54	Campo	484	320	234	156	113	72	54
	Retroanalísada	480	323	239	163	118	70	49
55	Campo	490	323	235	157	116	74	57
	Retroanalísada	486	323	239	166	122	74	51
56	Campo	373	250	184	119	85	54	40
	Retroanalísada	373	251	186	127	92	55	38
57	Campo	490	347	259	177	134	91	69
	Retroanalísada	490	345	266	190	142	87	60
59	Campo	495	331	241	159	120	79	62
	Retroanalísada	499	338	252	174	127	76	53
62	Campo	476	337	247	165	127	87	67
	Retroanalísada	475	333	255	182	135	83	57
70	Campo	392	272	200	135	100	66	50
	Retroanalísada	393	267	201	143	107	65	45
Média Campo		463,5	313,4	229,3	151,7	113	73,8	56,6
Média Retroanalísada		463,5	312,9	233,7	162,5	119,4	72	49,9
Ponto	Módulos resilientes equivalentes (MPa)					Erro RMS (µm)		
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito				
50	5100	492	362	177		4,915		
51	5184	506	473	201		5,702		
52	7245	544	380	169		6,774		
54	6900	518	362	179		4,461		
55	5916	517	419	177		4,985		
56	9000	683	473	236		4,516		
57	7658	597	402	152		6,400		
59	6641	544	362	173		7,311		
62	7658	589	402	156		7,575		
70	7717	657	548	198		5,211		
Média	6901,90	564,70	418,30	181,80		5,785		
DP	1227,72	65,14	61,75	24,53				
CV (%)	17,79	11,54	14,76	13,50				

Tabela 52 - Valores dos módulos do segmento 04 - ensaio VB - BackMeDiNa.

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (µm)						
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		16cm	25cm	34cm	47cm	62cm	91cm	121cm
50	Campo	185	164,5	144	103	61,5	41	31
	Retroanalísada	200	160	129	96	70	42	29
51	Campo	144	133,5	123,5	92,5	72	41	31
	Retroanalísada	162	132	111	88	69	45	31
52	Campo	164,5	133,5	103	82	61,5	51,5	31
	Retroanalísada	168	134	110	86	66	42	30
54	Campo	144	133,5	103	82	51,5	31	20,5
	Retroanalísada	164	125	98	72	52	31	22
55	Campo	164,5	144	103	72	61,5	51,5	31
	Retroanalísada	172	135	110	84	64	40	28
56	Campo	123,5	113	92,5	61,5	41	31	20,5
	Retroanalísada	136	105	83	62	46	29	20
57	Campo	144	123,5	103	82	61,5	41	31
	Retroanalísada	156	126	104	82	64	41	29
59	Campo	154	133,5	113	82	61,5	41	41
	Retroanalísada	166	134	110	87	67	43	30
62	Campo	195,5	175	133,5	113	92,5	61,5	195,5
	Retroanalísada	202	167	141	113	90	59	202
70	Campo	103	92,5	72	61,5	41	31	20,5
	Retroanalísada	109	86	71	55	42	27	19
Média Campo		152,2	134,7	109,1	83,15	60,55	42,15	45,3
Média Retroanalísada		163,5	130,4	106,7	82,5	63	39,9	44
Ponto	Módulos resilientes equivalentes (MPa)					Erro RMS (µm)		
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito				
50	10519	810	238	154		8,164		
51	12309	971	587	149		7,523		
52	10507	799	532	155		8,271		
54	9568	744	337	204		8,108		
55	9186	725	483	161		11,908		
56	10679	820	548	222		8,062		
57	11631	904	604	161		4,353		
59	10563	833	555	153		11,518		
62	10262	781	538	113		3,749		
70	11935	1223	816	244		7,773		
Média	10715,90	861,00	523,80	171,60		7,943		
DP	990,68	146,24	154,87	39,35				
CV (%)	9,24	16,99	29,57	22,93				

APÊNDICE B - VARIAÇÃO NAS MEDIDAS DE DEFLEXÃO APÓS CORREÇÃO DA TEMPERATURA

Tabela 53 - Variação na correção das bacias deflectométricas medidas em campo x reajustadas para os ensaios FWD e VB do segmento 02.

Ponto	Deflexão em μm e Variação da deflexão em %				
	Bacia de deflexão	D0	D1	D2	Temp pavto
		0cm	20cm	30cm	°C
23 FWD	Campo	313,00	224,00	171,00	23
	Corrigida	316,16	226,26	172,73	25
	Variação	1,0%	1,0%	1,0%	
24 FWD	Campo	316,00	228,00	174,00	23
	Corrigida	319,19	230,30	175,76	25
	Variação	1,0%	1,0%	1,0%	
28 FWD	Campo	370,00	280,00	221,00	24
	Corrigida	371,86	281,41	222,11	25
	Variação	0,5%	0,5%	0,5%	
31 FWD	Campo	324,00	231,00	174,00	24
	Corrigida	325,63	232,16	174,87	25
	Variação	0,5%	0,5%	0,5%	
32 FWD	Campo	325,00	234,00	180,00	24
	Corrigida	326,63	235,18	180,90	25
	Variação	0,5%	0,5%	0,5%	
34 FWD	Campo	300,00	220,00	170,00	24
	Corrigida	301,51	221,11	170,85	25
	Variação	0,5%	0,5%	0,5%	
36 FWD	Campo	355,00	257,00	194,00	25
	Corrigida	355,00	257,00	194,00	25
	Variação	0,0%	0,0%	0,0%	
37 FWD	Campo	322,00	227,00	168,00	25
	Corrigida	322,00	227,00	168,00	25
	Variação	0,0%	0,0%	0,0%	
39 FWD	Campo	328,00	230,00	177,00	25
	Corrigida	328,00	230,00	177,00	25
	Variação	0,0%	0,0%	0,0%	
40 FWD	Campo	316,00	226,00	174,00	25
	Corrigida	316,00	226,00	174,00	25
	Variação	0,0%	0,0%	0,0%	
23 VB	Campo	411,00	308,00	267,00	29,5
	Corrigida	401,96	301,22	261,12	25
	Variação	-2,2%	-2,2%	-2,2%	
24 VB	Campo	411,00	308,00	247,00	29,5
	Corrigida	401,96	301,22	241,56	25
	Variação	-2,2%	-2,2%	-2,2%	

Ponto	Deflexão em μm e Variação da deflexão em %				
	Bacia de deflexão	D0	D1	D2	Temp pavto
		0cm	20cm	30cm	°C
28 VB	Campo	555,00	493,00	432,00	33
	Corrigida	533,65	474,04	415,38	25
	Variação	-3,8%	-3,8%	-3,8%	
31 VB	Campo	411,00	370,00	308,00	31
	Corrigida	399,03	359,22	299,03	25
	Variação	-2,9%	-2,9%	-2,9%	
32 VB	Campo	288,00	226,00	185,00	26
	Corrigida	286,57	224,88	184,08	25
	Variação	-0,5%	-0,5%	-0,5%	
34 VB	Campo	267,00	247,00	226,00	27
	Corrigida	264,36	244,55	223,76	25
	Variação	-1,0%	-1,0%	-1,0%	
36 VB	Campo	308,00	226,00	185,00	28
	Corrigida	303,45	222,66	182,27	25
	Variação	-1,5%	-1,5%	-1,5%	
37 VB	Campo	267,00	206,00	185,00	28
	Corrigida	263,05	202,96	182,27	25
	Variação	-1,5%	-1,5%	-1,5%	
39 VB	Campo	267,00	247,00	206,00	26
	Corrigida	265,67	245,77	204,98	25
	Variação	-0,5%	-0,5%	-0,5%	
40 VB	Campo	247,00	226,00	185,00	26
	Corrigida	245,77	224,88	184,08	25
	Variação	-0,5%	-0,5%	-0,5%	

Tabela 54 - Variação na correção das bacias deflectométricas medidas em campo x reajustadas para os ensaios FWD e VB do segmento 04.

Ponto	Deflexão em μm e Variação da deflexão em %				
	Bacia de deflexão	D0	D1	D2	Temp pavto
		0cm	20cm	30cm	°C
50 FWD	Campo	512,00	339,00	245,00	27
	Corrigida	506,93	335,64	242,57	25
	Variação	-1,0%	-1,0%	-1,0%	
51 FWD	Campo	450,00	292,00	206,00	27
	Corrigida	445,54	289,11	203,96	25
	Variação	-1,0%	-1,0%	-1,0%	
52 FWD	Campo	473,00	323,00	242,00	27
	Corrigida	468,32	319,80	239,60	25
	Variação	-1,0%	-1,0%	-1,0%	
54 FWD	Campo	484,00	320,00	234,00	27
	Corrigida	479,21	316,83	231,68	25
	Variação	-1,0%	-1,0%	-1,0%	
55 FWD	Campo	490,00	323,00	235,00	27
	Corrigida	485,15	319,80	232,67	25
	Variação	-1,0%	-1,0%	-1,0%	
56 FWD	Campo	373,00	250,00	184,00	26
	Corrigida	371,14	248,76	183,08	25
	Variação	-0,5%	-0,5%	-0,5%	
57 FWD	Campo	490,00	347,00	259,00	26
	Corrigida	487,56	345,27	257,71	25
	Variação	-0,5%	-0,5%	-0,5%	
59 FWD	Campo	495,00	331,00	241,00	26
	Corrigida	492,54	329,35	239,80	25
	Variação	-0,5%	-0,5%	-0,5%	
62 FWD	Campo	476,00	337,00	247,00	26
	Corrigida	473,63	335,32	245,77	25
	Variação	-0,5%	-0,5%	-0,5%	
70 FWD	Campo	392,00	272,00	200,00	25
	Corrigida	392,00	272,00	200,00	25
	Variação	0,0%	0,0%	0,0%	
50 VB	Campo	370,00	329,00	288,00	37
	Corrigida	349,06	310,38	271,70	25
	Variação	-5,7%	-5,7%	-5,7%	
51 VB	Campo	288,00	267,00	247,00	37,5
	Corrigida	271,06	251,29	232,47	25
	Variação	-5,9%	-5,9%	-5,9%	
52 VB	Campo	329,00	267,00	206,00	38
	Corrigida	308,92	250,70	193,43	25
	Variação	-6,1%	-6,1%	-6,1%	
54 VB	Campo	288,00	267,00	206,00	38
	Corrigida	270,42	250,70	193,43	25
	Variação	-6,1%	-6,1%	-6,1%	

Ponto	Deflexão em μm e Variação da deflexão em %				
	Bacia de deflexão	D0	D1	D2	Temp pavto
		0cm	20cm	30cm	°C
55 VB	Campo	329,00	288,00	206,00	38,5
	Corrigida	308,20	269,79	192,97	25
	Variação	-6,3%	-6,3%	-6,3%	
56 VB	Campo	247,00	226,00	185,00	37
	Corrigida	233,02	213,21	174,53	25
	Variação	-5,7%	-5,7%	-5,7%	
57 VB	Campo	288,00	247,00	206,00	38
	Corrigida	270,42	231,92	193,43	25
	Variação	-6,1%	-6,1%	-6,1%	
59 VB	Campo	308,00	267,00	226,00	38
	Corrigida	289,20	250,70	212,21	25
	Variação	-6,1%	-6,1%	-6,1%	
62 VB	Campo	391,00	350,00	267,00	35,5
	Corrigida	371,50	332,54	253,68	25
	Variação	-5,0%	-5,0%	-5,0%	
70 VB	Campo	206,00	185,00	144,00	37,5
	Corrigida	193,88	174,12	135,53	25
	Variação	-5,9%	-5,9%	-5,9%	

APÊNDICE C - MÓDULOS COM CORREÇÃO DA DEFLEXÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA - ENSAIO VB - BACKMEDINA

Tabela 55 - Valores dos módulos do segmento 02 - ensaio VB - com correção da deflexão em função da temperatura - BackMeDiNa.

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (µm)						
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		16cm	25cm	34cm	47cm	62cm	91cm	121cm
23	Campo	201	150,6	130,6	113	92,5	72	51,5
	Retroanalísada	195	165	143	118	96	66	47
24	Campo	201	150,6	120,8	103	82	51,5	41
	Retroanalísada	199	160	132	104	80	52	36
28	Campo	266,8	237	207,7	164,5	144	92,5	72
	Retroanalísada	276	236	205	171	139	96	68
31	Campo	199,5	179,6	149,5	113	82	61,5	41
	Retroanalísada	208	171	143	114	89	58	40
32	Campo	143,3	112,4	92	72	61,5	51,5	41
	Retroanalísada	139	117	100	82	66	45	32
34	Campo	132,2	122,3	111,9	92,5	72	51,5	41
	Retroanalísada	156	130	111	91	73	49	34
36	Campo	151,7	111,3	91,1	82	72	51,5	41
	Retroanalísada	143	121	105	87	71	49	34
37	Campo	131,5	101,5	91,1	82	72	31	20,5
	Retroanalísada	139	111	91	70	52	33	23
39	Campo	132,8	122,9	102,5	82	61,5	41	31
	Retroanalísada	151	123	102	81	63	41	28
40	Campo	122,9	112,4	92	72	61,5	41	31
	Retroanalísada	128	108	93	76	61	41	29
Média Campo		168,3	140,1	118,9	97,6	80,1	54,5	41,1
Média Retroanalísada		173,4	144,2	122,5	99,4	79	53	37,1
Ponto	Módulos resilientes equivalentes (MPa)							
	Revest. (sem correção)	Revest. (com correção)	Varição MR (%)	Erro da retroanálise RMS (µm)				
23	12163	12839	6%	7,272				
24	8443	8976	6%	6,352				
28	8443	9424	12%	3,517				
31	9541	10262	8%	4,957				
32	16846	17054	1%	11,886				
34	13779	14498	5%	9,885				
36	16638	17470	5%	9,970				
37	13210	13705	4%	13,608				
39	12212	12513	2%	6,427				
40	17704	17925	1%	3,907				
		Média	5%	7,778				

Tabela 56 - Valores dos módulos do segmento 04 - ensaio VB - com correção da deflexão em função da temperatura - BackMeDiNa.

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (µm)						
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		16cm	25cm	34cm	47cm	62cm	91cm	121cm
50	Campo	174,5	155,2	135,8	103	61,5	41	31
	Retroanalísada	189	152	124	93	69	42	29
51	Campo	135,5	125,6	116,2	92,5	72	41	31
	Retroanalísada	151	126	106	86	67	44	31
52	Campo	154,5	125,4	96,7	82	61,5	51,5	31
	Retroanalísada	157	127	106	84	66	43	30
54	Campo	135,2	125,4	96,7	82	51,5	31	20,5
	Retroanalísada	153	119	95	70	52	31	22
55	Campo	154,1	134,9	96,5	72	61,5	51,5	31
	Retroanalísada	157	127	105	83	64	42	29
56	Campo	116,5	106,6	87,3	61,5	41	31	20,5
	Retroanalísada	127	99	80	61	46	29	20
57	Campo	135,2	116,0	96,7	82	61,5	41	31
	Retroanalísada	143	118	99	79	62	41	29
59	Campo	144,6	125,4	106,1	82	61,5	41	41
	Retroanalísada	152	125	105	84	66	44	31
62	Campo	185,7	166,3	126,8	113	92,5	61,5	41
	Retroanalísada	188	158	136	111	89	60	42
70	Campo	96,9	87,1	67,8	61,5	41	31	20,5
	Retroanalísada	112	89	73	57	43	28	19
Média Campo		143,3	126,8	102,7	83,15	60,55	42,15	29,85
Média Retroanalísada		152,9	124	102,9	80,8	62,4	40,4	28,2
Ponto	Módulos resilientes equivalentes (MPa)							
	Revest. (sem correção)	Revest. (com correção)	Varição MR (%)	Erro da retroanálise RMS (µm)				
50	10519	11314	8%	7,922				
51	12309	14660	19%	7,163				
52	10507	12061	15%	7,920				
54	9568	10940	14%	8,204				
55	9186	11487	25%	10,332				
56	10679	12061	13%	7,549				
57	11631	13962	20%	3,734				
59	10563	13210	25%	10,249				
62	10262	12544	22%	3,936				
70	11935	15070	26%	8,709				
		Média	19%	7,572				

APÊNDICE D - MÓDULOS RESILIENTES EQUIVALENTES - BAKFAA

Tabela 57 - Valores dos módulos do segmento 02 - ensaio FWD - BAKFAA.

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (µm)						
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		0cm	20cm	30cm	45cm	60cm	90cm	120cm
23	Campo	313	224	171	121	94	61	47
	Retroanalísada	323	220	164	112	74	48	34
24	Campo	316	228	174	124	96	61	47
	Retroanalísada	332	226	168	115	76	50	35
28	Campo	370	280	221	156	120	76	58
	Retroanalísada	401	272	203	139	91	60	42
31	Campo	324	231	174	113	83	52	40
	Retroanalísada	332	225	168	115	75	50	34
32	Campo	325	234	180	127	98	65	49
	Retroanalísada	343	233	173	119	78	51	36
34	Campo	300	220	170	121	93	60	45
	Retroanalísada	320	217	162	111	73	48	33
36	Campo	355	257	194	132	89	58	41
	Retroanalísada	368	250	187	128	84	55	38
37	Campo	322	227	168	115	87	55	41
	Retroanalísada	328	223	166	114	75	49	34
39	Campo	328	230	177	124	95	62	47
	Retroanalísada	338	230	171	117	77	51	35
40	Campo	316	226	174	122	96	62	48
	Retroanalísada	329	224	167	114	75	49	34
Média Campo		326,9	235,7	180,3	125,5	95,1	61,2	46,3
Média Retroanalísada		341,4	232	172,9	118,4	77,8	51,1	35,5
Ponto	Módulos resilientes equivalentes (MPa)					Erro RMS (µm)		
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito				
23	10712,06	803,37	535,62	267,74		12,023		
24	10294,08	772,02	514,72	257,29		12,415		
28	8520,84	639,05	426,03	212,96		20,614		
31	9991,34	749,33	499,57	249,73		5,659		
32	10091,25	756,82	504,57	252,23		13,045		
34	10397,02	779,74	519,87	259,86		13,429		
36	9412,31	705,9	470,62	235,25		6,960		
37	10192,16	764,38	509,62	254,75		6,460		
39	10192,16	764,38	509,62	254,75		10,554		
40	10397,02	779,74	519,87	259,86		12,486		
Média	10020,02	751,47	501,01	250,44		11,365		
DP	625,42	46,90	31,28	15,63				
CV (%)	6,24	6,24	6,24	6,24				

Tabela 58 - Valores dos módulos do segmento 02 - ensaio VB - BAKFAA.

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (µm)						
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		16cm	25cm	34cm	47cm	62cm	91cm	121cm
23	Campo	205,5	154	133,5	113	92,5	72	51,5
	Retroanalísada	223	164	130	93	69	42	30
24	Campo	205,5	154	123,5	103	82	51,5	41
	Retroanalísada	214	158	125	90	66	40	28
28	Campo	277,5	246,5	216	164,5	144	92,5	72
	Retroanalísada	322	238	188	135	100	61	43
31	Campo	205,5	185	154	113	82	61,5	41
	Retroanalísada	234	173	137	98	73	44	31
32	Campo	144	113	92,5	72	61,5	51,5	41
	Retroanalísada	156	115	91	65	48	29	21
34	Campo	133,5	123,5	113	92,5	72	51,5	41
	Retroanalísada	172	127	101	72	53	32	23
36	Campo	154	113	92,5	82	72	51,5	41
	Retroanalísada	164	121	96	69	51	53	22
37	Campo	133,5	103	92,5	82	72	31	20,5
	Retroanalísada	150	110	88	63	46	28	20
39	Campo	133,5	123,5	103	82	61,5	41	31
	Retroanalísada	159	117	93	67	49	30	21
40	Campo	123,5	113	92,5	72	61,5	41	31
	Retroanalísada	145	107	85	61	45	27	19
Média Campo		171,6	142,9	121,3	97,6	80,1	54,5	41,1
Média Retroanalísada		193,9	143	113,4	81,3	60	38,6	25,8
Ponto	Módulos resilientes equivalentes (MPa)					Erro RMS (µm)		
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito				
23	5955,42	446,66	297,79	148,88		19,698		
24	6197,24	464,8	309,88	154,92		10,606		
28	4121,2	309,09	206,06	103,03		32,670		
31	5666,39	424,98	283,33	141,66		16,695		
32	8520,84	639,05	426,03	212,96		13,415		
34	7713,79	578,52	385,69	192,81		21,006		
36	8107,28	608,03	405,36	202,64		15,052		
37	8866,82	664,99	443,33	221,61		13,976		
39	8352,94	626,45	417,63	208,76		14,044		
40	9135,49	685,14	456,77	228,33		13,527		
Média	7263,74	544,77	363,19	181,56		17,069		
DP	1667,68	125,07	83,38	41,67				
CV (%)	22,96	22,96	22,96	22,96				

Tabela 59 - Valores dos módulos do segmento 04 - ensaio FWD - BAKFAA.

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (µm)						
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		0cm	20cm	30cm	45cm	60cm	90cm	120cm
50	Campo	512	339	245	158	116	73	56
	Retroanalísada	502	341	254	174	114	75	52
51	Campo	450	292	206	134	100	65	50
	Retroanalísada	433	295	219	150	98	65	45
52	Campo	473	323	242	157	119	77	61
	Retroanalísada	474	322	240	164	108	71	49
54	Campo	484	320	234	156	113	72	54
	Retroanalísada	476	323	241	165	108	71	49
55	Campo	490	323	235	157	116	74	57
	Retroanalísada	482	328	244	167	110	72	50
56	Campo	373	250	184	119	85	54	40
	Retroanalísada	367	250	186	128	84	55	38
57	Campo	490	347	259	177	134	91	69
	Retroanalísada	500	340	253	174	114	75	52
59	Campo	495	331	241	159	120	79	62
	Retroanalísada	491	334	249	171	112	73	51
62	Campo	476	337	247	165	127	87	67
	Retroanalísada	484	329	245	168	110	72	50
70	Campo	392	272	200	135	100	66	50
	Retroanalísada	396	269	201	137	90	59	41
Média Campo		463,5	313,4	229,3	151,7	113	73,8	56,6
Média Retroanalísada		460,5	313,1	233,2	159,8	104,8	68,8	47,7
Ponto	Módulos resilientes equivalentes (MPa)					Erro RMS (µm)		
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito				
50	6710,71	503,3	335,55	167,74		8,224		
51	7713,79	578,52	385,69	192,81		10,445		
52	6983,19	523,73	349,17	174,55		7,211		
54	6983,19	523,73	349,17	174,55		6,012		
55	7053,02	528,97	352,66	176,29		7,203		
56	9226,85	691,99	461,34	230,61		4,018		
57	6777,82	508,33	338,9	169,42		12,867		
59	6983,19	523,73	349,17	174,55		7,862		
62	6845,6	513,41	342,29	171,11		11,439		
70	8436,47	632,72	421,81	210,85		6,006		
Média	7371,38	552,84	368,58	184,25		8,129		
DP	837,53	62,81	41,87	20,93				
CV (%)	11,36	11,36	11,36	11,36				

Tabela 60 - Valores dos módulos do segmento 04 - ensaio VB - BAKFAA.

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (µm)						
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		16cm	25cm	34cm	47cm	62cm	91cm	121cm
50	Campo	185	164,5	144	103	61,5	41	31
	Retroanalísada	208	153	122	87	64	39	28
51	Campo	144	133,5	123,5	92,5	72	41	31
	Retroanalísada	174	128	102	73	54	33	23
52	Campo	164,5	133,5	103	82	61,5	51,5	31
	Retroanalísada	177	131	104	74	55	33	24
54	Campo	144	133,5	103	82	51,5	31	20,5
	Retroanalísada	164	121	96	69	51	31	22
55	Campo	164,5	144	103	72	61,5	51,5	31
	Retroanalísada	179	132	105	75	56	34	24
56	Campo	123,5	113	92,5	61,5	41	31	20,5
	Retroanalísada	139	103	82	59	43	26	19
57	Campo	144	123,5	103	82	61,5	41	31
	Retroanalísada	162	120	95	68	50	31	22
59	Campo	154	133,5	113	82	61,5	41	41
	Retroanalísada	174	128	103	72	54	33	23
62	Campo	195,5	175	133,5	113	92,5	61,5	195,5
	Retroanalísada	225	166	132	94	70	42	30
70	Campo	103	92,5	72	61,5	41	31	20,5
	Retroanalísada	118	87	69	49	37	22	16
Média Campo		152,2	134,7	109,1	83,15	60,55	42,15	45,3
Média Retroanalísada		172	126,9	101	72	53,4	32,4	23,1
Ponto	Módulos resilientes equivalentes (MPa)					Erro RMS (µm)		
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito				
50	6385,02	478,88	319,27	159,61		14,204		
51	7634,42	572,79	381,87	190,9		17,820		
52	7486,93	561,51	374,35	187,14		9,624		
54	8107,28	608,03	405,36	202,64		10,526		
55	7412,8	555,95	370,65	185,28		10,434		
56	9506,43	712,96	475,33	237,6		8,548		
57	8188,36	614,11	409,41	204,66		11,487		
59	7637,42	572,79	381,87	190,9		12,364		
62	5896,46	442,24	294,94	147,41		18,090		
70	11258,47	844,35	562,95	281,4		8,641		
Média	7951,36	596,36	397,60	198,75		12,174		
DP	1520,84	114,05	76,03	38,00				
CV (%)	19,12	19,12	19,12	19,12				

APÊNDICE E - MÓDULOS COM CORREÇÃO DA DEFLEXÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA - ENSAIO VB - BAKFAA

Tabela 61 - Valores dos módulos do segmento 02 - ensaio VB - com correção da deflexão em função da temperatura - BAKFAA.

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (µm)						
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		16cm	25cm	34cm	47cm	62cm	91cm	121cm
23	Campo	201	150,6	130,6	113	92,5	72	51,5
	Retroanalísada	218	161	128	92	68	41	29
24	Campo	201	150,6	120,8	103	82	51,5	41
	Retroanalísada	212	156	124	89	66	40	28
28	Campo	266,8	237	207,7	164,5	144	92,5	72
	Retroanalísada	318	235	187	134	99	60	42
31	Campo	199,5	179,6	149,5	113	82	61,5	41
	Retroanalísada	229	169	134	96	71	43	30
32	Campo	143,3	112,4	92	72	61,5	51,5	41
	Retroanalísada	156	115	91	65	48	29	21
34	Campo	132,2	122,3	111,9	92,5	72	51,5	41
	Retroanalísada	165	122	97	69	51	31	22
36	Campo	151,7	111,3	91,1	82	72	51,5	41
	Retroanalísada	162	120	95	68	50	31	22
37	Campo	131,5	101,5	91,1	82	72	31	20,5
	Retroanalísada	145	107	85	61	45	27	19
39	Campo	132,8	122,9	102,5	82	61,5	41	31
	Retroanalísada	157	116	92	66	49	30	21
40	Campo	122,9	112,4	92	72	61,5	41	31
	Retroanalísada	145	107	85	61	45	27	19
Média Campo		168,3	140,1	118,9	97,6	80,1	54,5	41,1
Média Retroanalísada		190,7	140,8	111,8	80,1	59,2	35,9	25,3
Ponto	Módulos resilientes equivalentes (MPa)							
	Revest. (sem correção)	Revest. (com correção)	Varição MR (%)	Erro da retroanálise RMS (µm)				
23	5955,42	6075,13	2%	20,488				
24	6197,24	6259,21	1%	11,462				
28	4121,2	4162,42	1%	33,875				
31	5666,39	5780,28	2%	17,166				
32	8520,84	8520,84	0%	13,512				
34	7713,79	8027,01	4%	20,897				
36	8107,28	8188,36	1%	15,454				
37	8866,82	9135,49	3%	14,336				
39	8352,94	8436,47	1%	14,127				
40	9135,49	9135,49	0%	13,546				

Tabela 62 - Valores dos módulos do segmento 04 - ensaio VB - com correção da deflexão em função da temperatura - BAKFAA.

Ponto	Bacia de deflexão	Deflexão (µm)						
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		16cm	25cm	34cm	47cm	62cm	91cm	121cm
50	Campo	174,5	155,2	135,8	103	61,5	41	31
	Retroanalísada	200	147	117	84	62	38	27
51	Campo	135,5	125,6	116,2	92,5	72	41	31
	Retroanalísada	167	123	98	70	52	32	22
52	Campo	154,5	125,4	96,7	82	61,5	51,5	31
	Retroanalísada	167	123	98	70	52	32	22
54	Campo	135,2	125,4	96,7	82	51,5	31	20,5
	Retroanalísada	156	115	91	65	48	29	21
55	Campo	154,1	134,9	96,5	72	61,5	51,5	31
	Retroanalísada	168	124	99	71	52	32	22
56	Campo	116,5	106,6	87,3	61,5	41	31	20,5
	Retroanalísada	133	98	78	56	41	25	18
57	Campo	135,2	116,0	96,7	82	61,5	41	31
	Retroanalísada	154	114	90	65	48	29	20
59	Campo	144,6	125,4	106,1	82	61,5	41	41
	Retroanalísada	165	122	97	69	51	31	22
62	Campo	185,7	166,3	126,8	113	92,5	61,5	41
	Retroanalísada	216	160	127	91	67	41	29
70	Campo	96,9	87,1	67,8	61,5	41	31	20,5
	Retroanalísada	112	83	66	47	35	21	15
Média Campo		143,3	126,8	102,7	83,15	60,55	42,15	29,85
Média Retroanalísada		163,8	120,9	96,1	68,8	50,8	31	21,8
Ponto	Módulos resilientes equivalentes (MPa)							
	Revest. (sem correção)	Revest. (com correção)	Variação MR (%)	Erro da retroanálise RMS (µm)				
50	6385,02	6644,27	4%	14,379				
51	7634,42	7947,53	4%	18,551				
52	7486,93	7947,53	6%	11,161				
54	8107,28	8520,84	5%	11,003				
55	7412,8	7868,84	6%	11,138				
56	9506,43	9991,34	5%	8,494				
57	8188,36	8606,05	5%	12,767				
59	7637,42	8027,01	5%	13,340				
62	5896,46	6135,88	4%	19,597				
70	11258,47	11832,76	5%	9,476				

APÊNDICE F - BOXPLOT DOS MÓDULOS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO - SEGEMENTO 02

Figura 112 - Módulos do revestimento - segmento 02 - BackMeDiNa e BAKFAA.

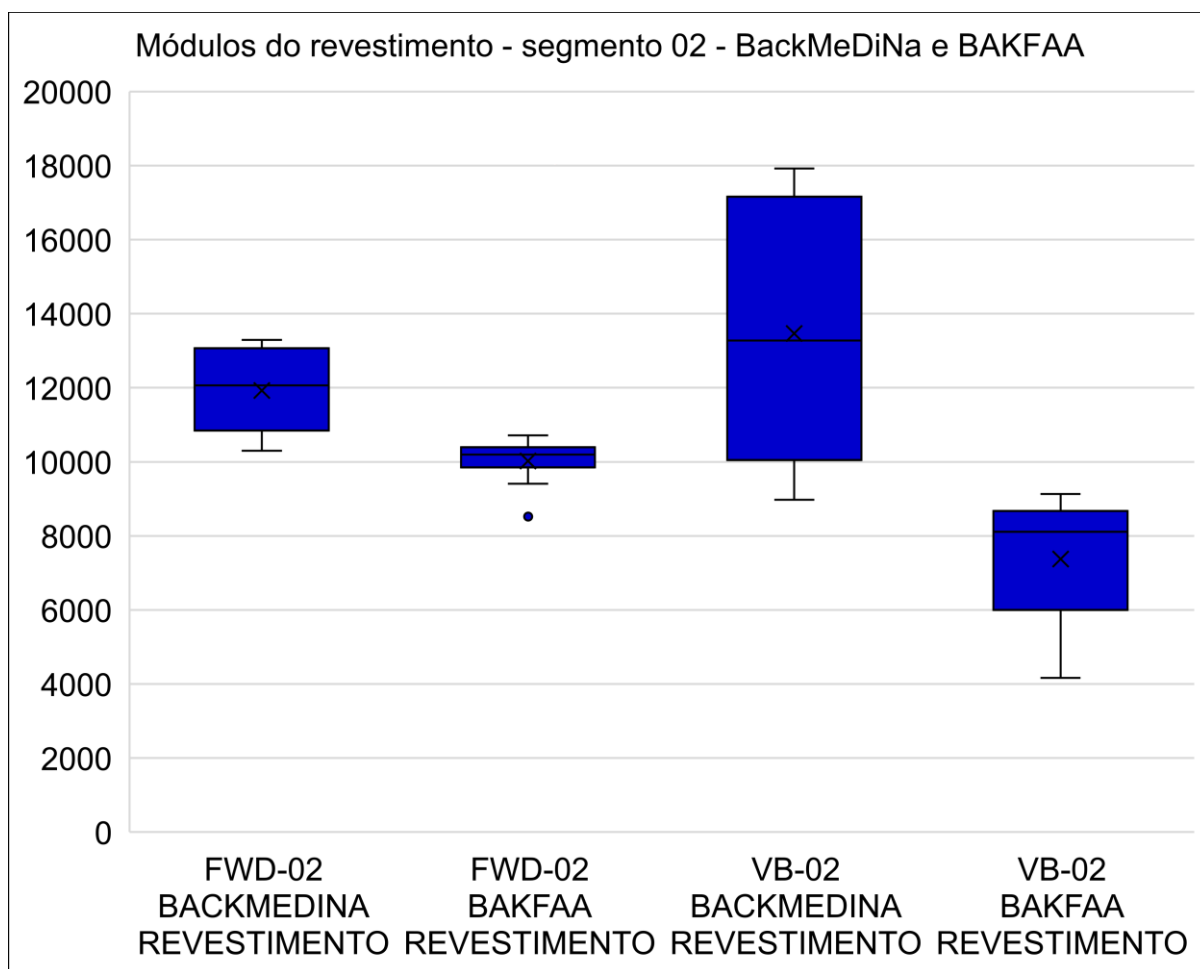


Figura 113 - Módulos da base - segmento 02 - BackMeDiNa e BAKFAA.

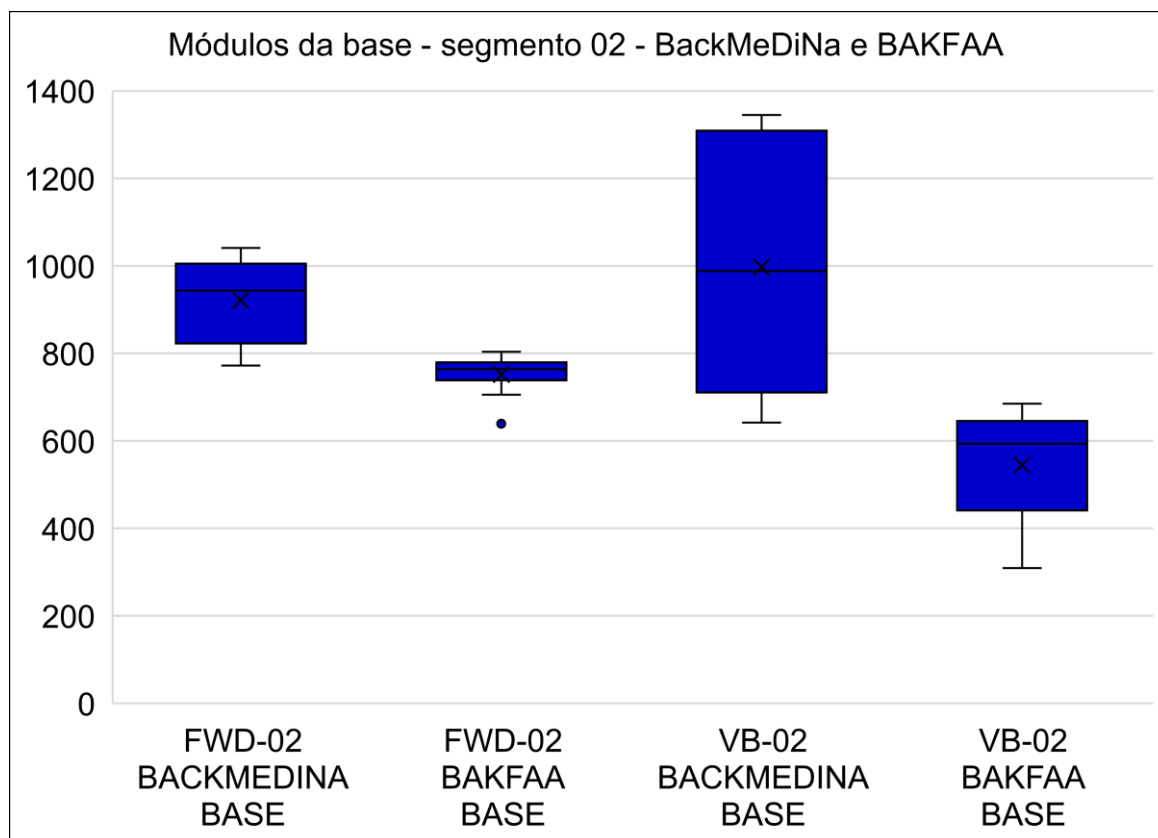


Figura 114 - Módulos da sub-base - segmento 02 - BackMeDiNa e BAKFAA.

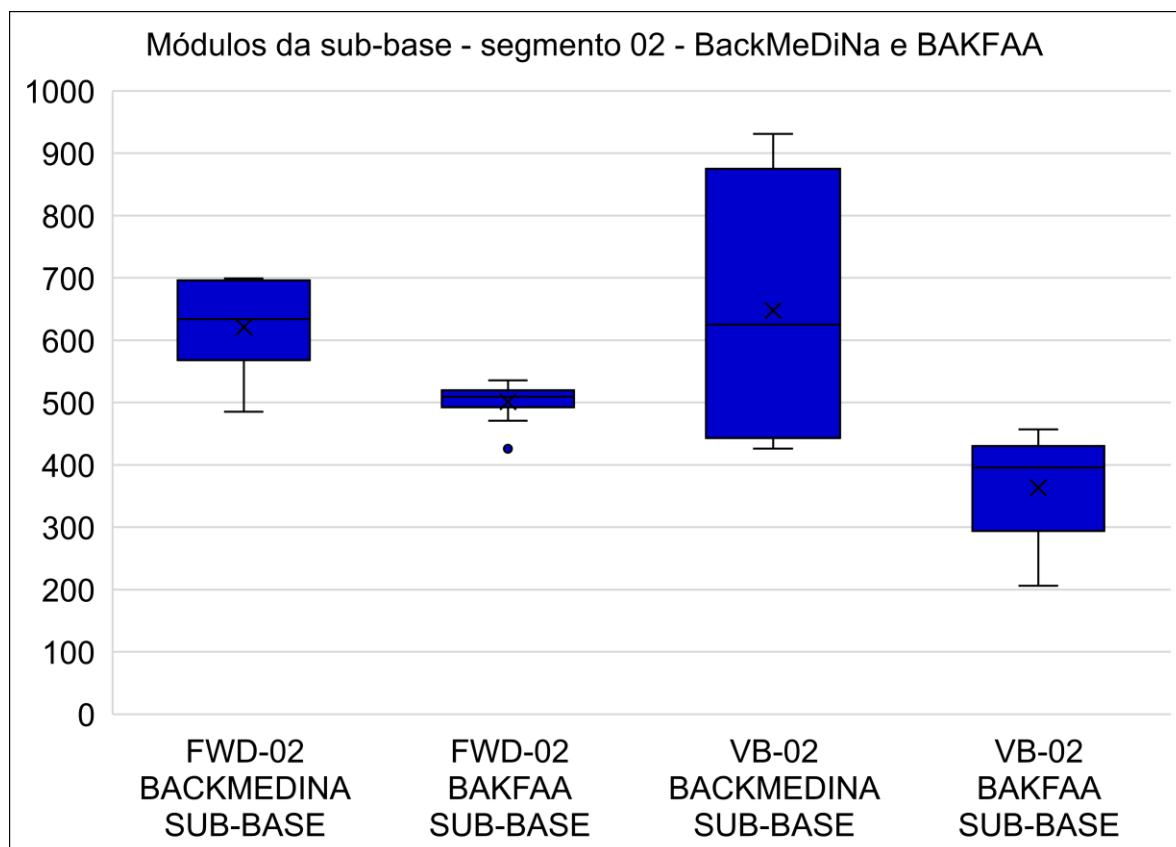
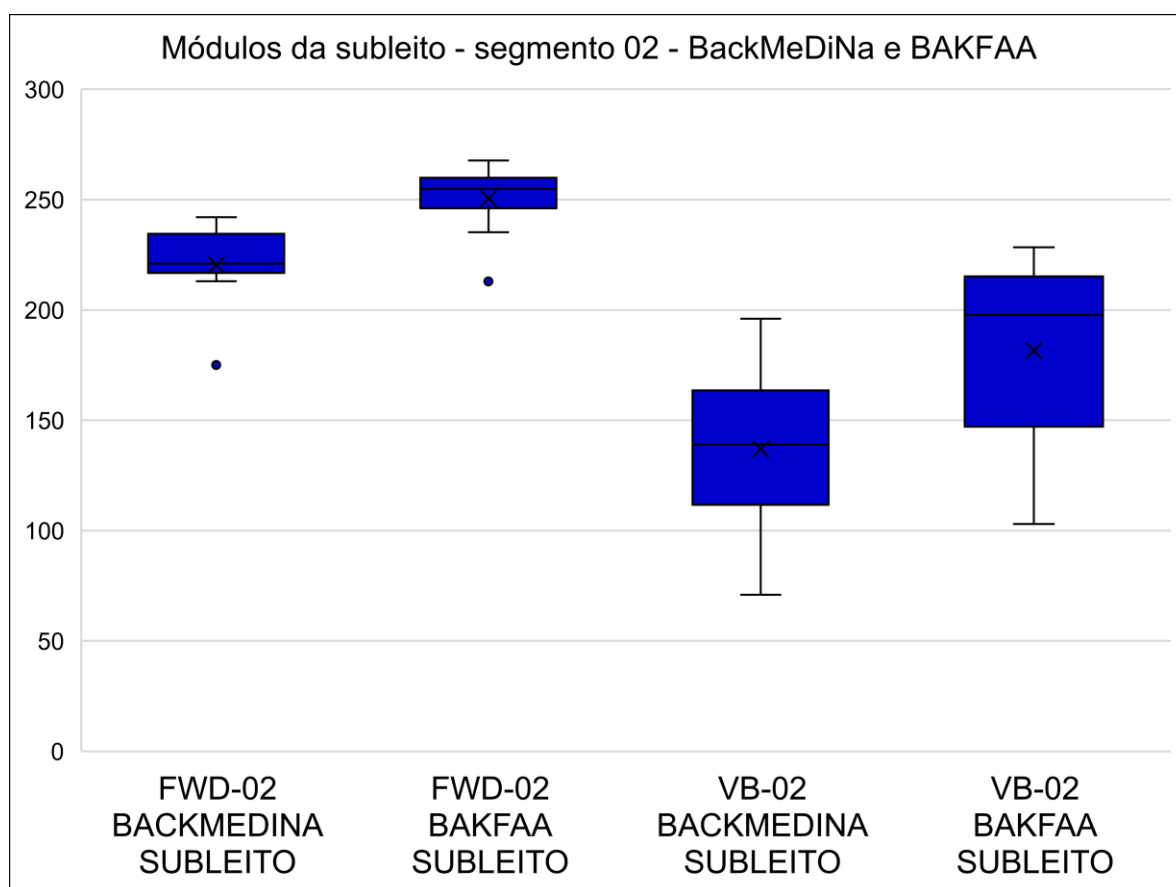


Figura 115 - Módulos do subleito - segmento 02 - BackMeDiNa e BAKFAA.



APÊNDICE G - BOXPLOT DOS MÓDULOS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO - SEGEMENTO 04

Figura 116 - Módulos do revestimento - segmento 04 - BackMeDiNa e BAKFAA.

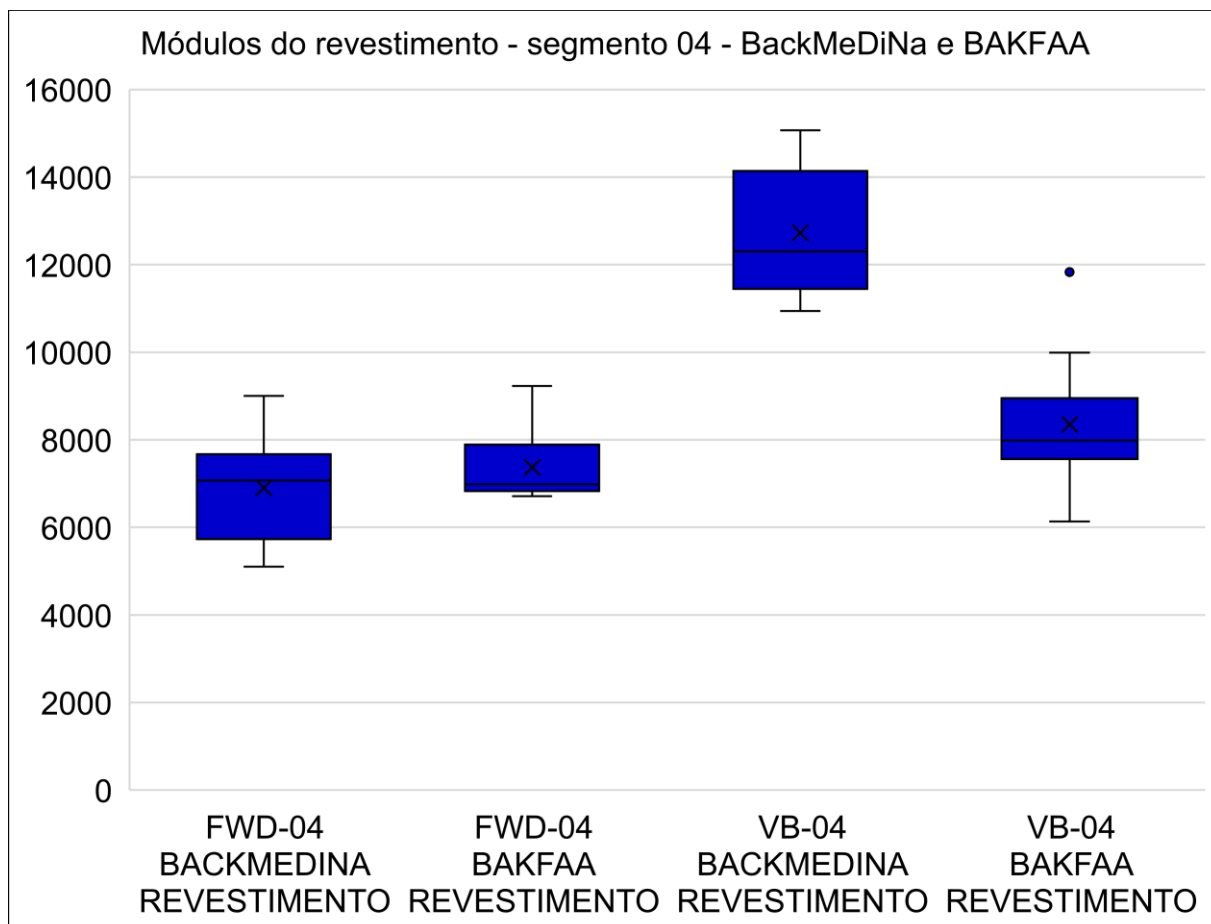


Figura 117 - Módulos do base - segmento 04 - BackMeDiNa e BAKFAA.

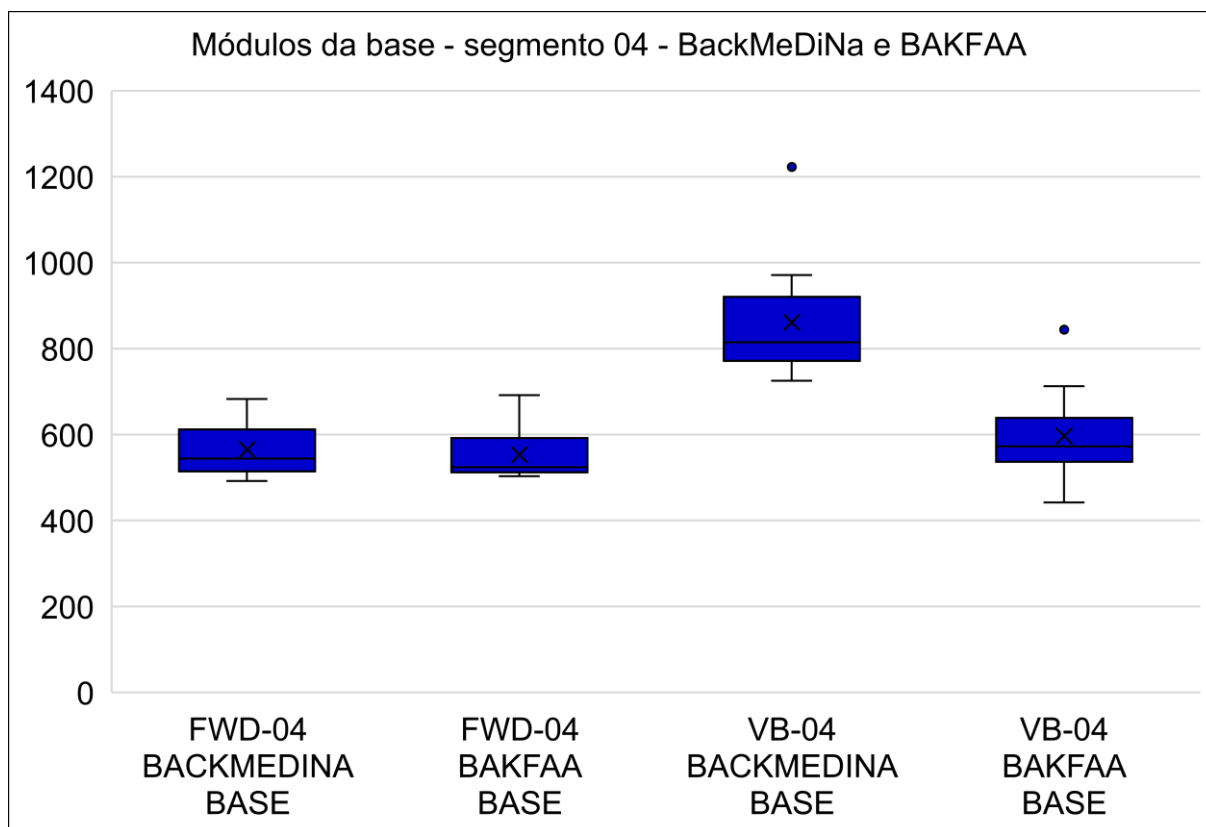


Figura 118 - Módulos do sub-base - segmento 04 - BackMeDiNa e BAKFAA.

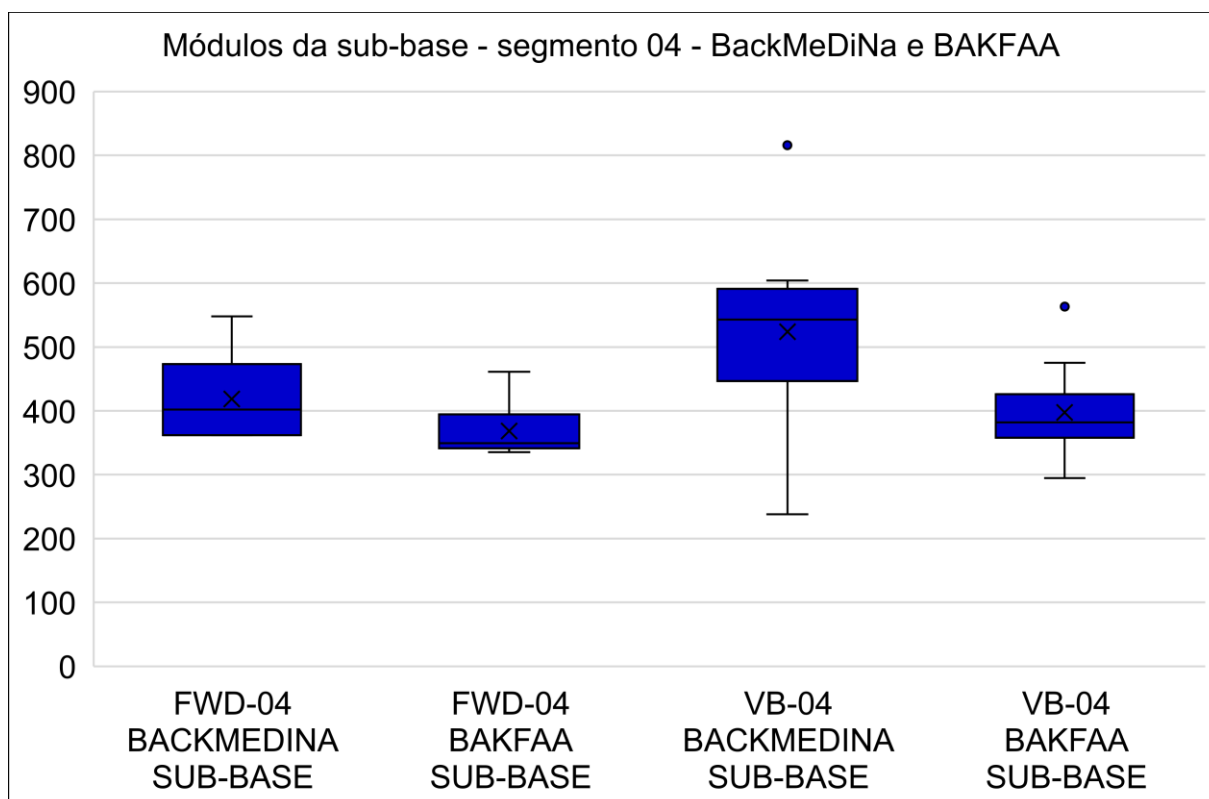
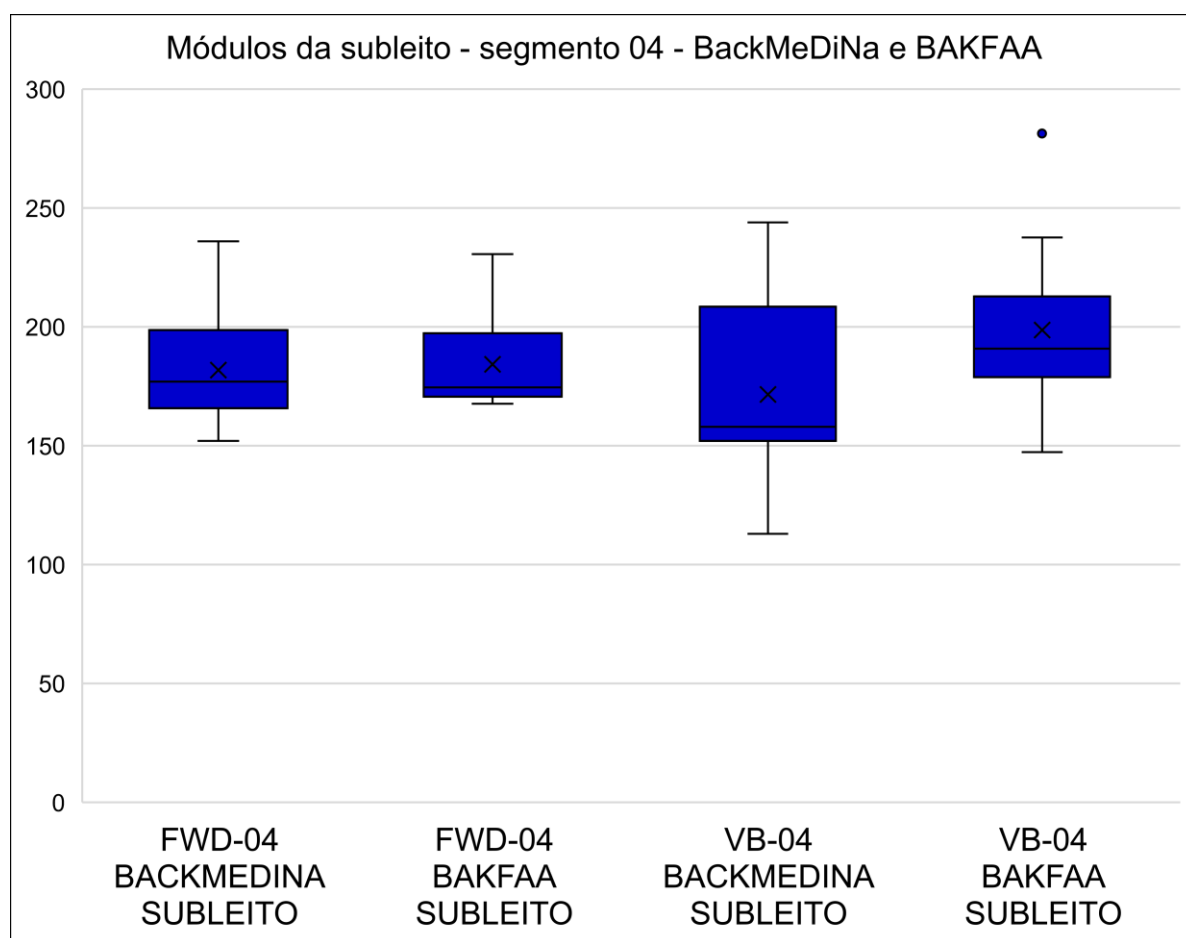


Figura 119 - Módulos do subleito - segmento 04 - BackMeDiNa e BAKFAA.



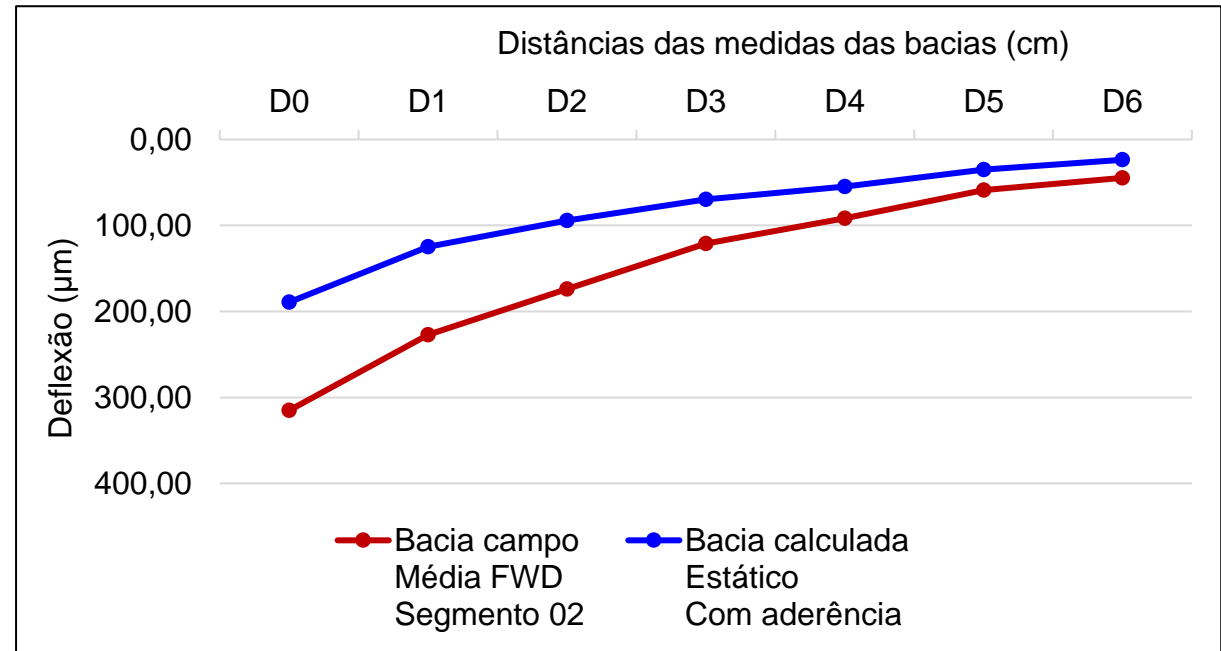
APÊNDICE H - BACIAS DE DEFLEXÃO - MODELOS ABAQUS - SEGMENTO 02

Dados MR: média FWD - BackMeDiNa - segmento 02
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 02
Modelo: Estático com aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 02	315,14	227,22	173,80	120,96	91,66	58,98	44,62
Bacia calculada Estático Com aderência	189,26	124,75	94,25	69,61	54,71	35,05	23,59

Diferença absoluta (µm)	125,89	102,47	79,56	51,34	36,95	23,93	21,03
Erro relativo absoluto (%)	39,95	45,10	45,77	42,45	40,31	40,58	47,14
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	39,95						
RMSE - D0 e D1 (%)	42,60						
RMSE - D0 a D2 (%)	43,68						
RMSE - D0 a D3 (%)	43,38						
RMSE - D0 a D4 (%)	42,78						
RMSE - D0 a D5 (%)	42,42						
RMSE - Completa (%)	43,13						



Dados MR: média FWD - BackMeDiNa - segmento 02

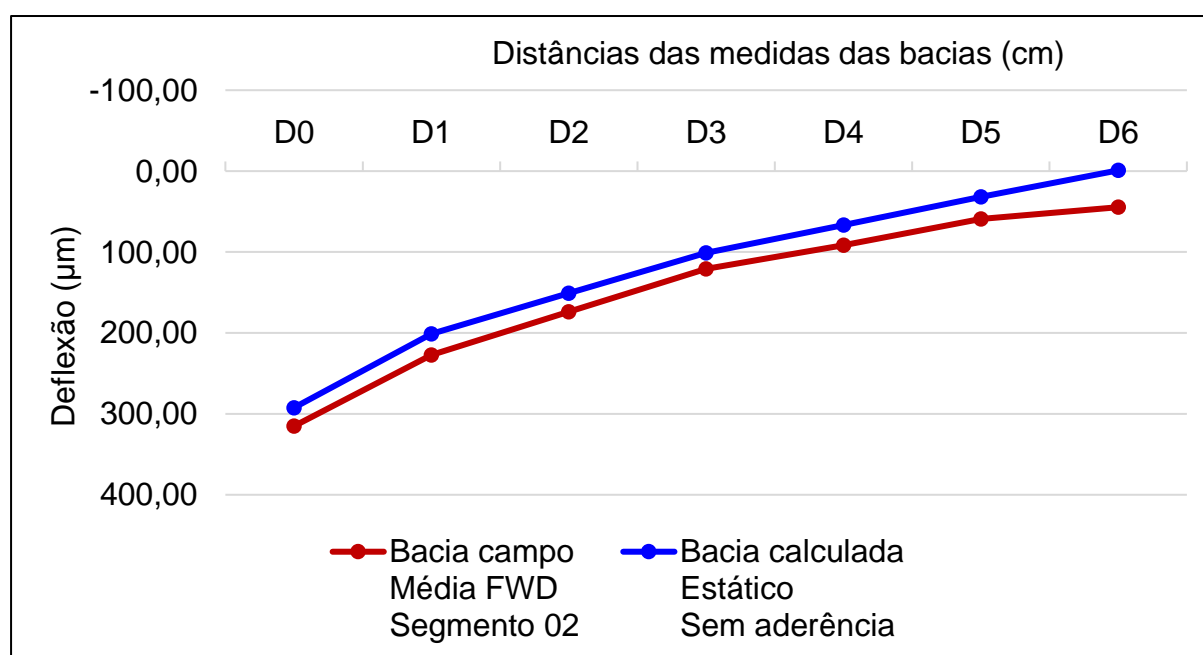
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 02

Modelo: Estático sem aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 02	315,14	227,22	173,80	120,96	91,66	58,98	44,62
Bacia calculada Estático Sem aderência	292,37	201,33	150,97	100,89	66,57	31,83	-0,91

Diferença absoluta (µm)	22,78	25,89	22,84	20,06	25,09	27,14	45,53
Erro relativo absoluto (%)	7,23	11,40	13,14	16,59	27,37	46,03	102,04
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	7,23						
RMSE - D0 e D1 (%)	9,54						
RMSE - D0 a D2 (%)	10,87						
RMSE - D0 a D3 (%)	12,55						
RMSE - D0 a D4 (%)	16,61						
RMSE - D0 a D5 (%)	24,14						
RMSE - Completa (%)	44,58						



Dados MR: média FWD - BackMeDiNa - segmento 02

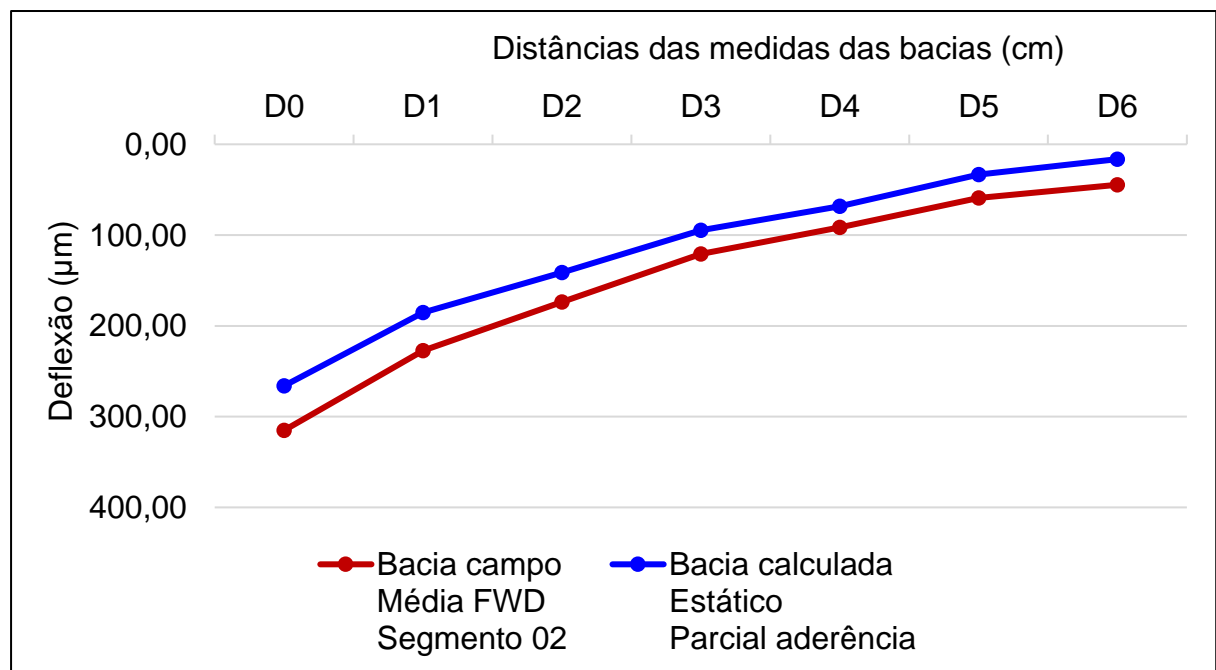
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 02

Modelo: Estático com aderência parcial

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 02	315,14	227,22	173,80	120,96	91,66	58,98	44,62
Bacia calculada Estático Parcial aderência	266,07	185,45	141,16	94,75	68,38	33,52	16,38

Diferença absoluta (µm)	49,07	41,77	32,64	26,21	23,28	25,45	28,24
Erro relativo absoluto (%)	15,57	18,38	18,78	21,67	25,40	43,16	63,29
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	15,57						
RMSE - D0 e D1 (%)	17,04						
RMSE - D0 a D2 (%)	17,64						
RMSE - D0 a D3 (%)	18,73						
RMSE - D0 a D4 (%)	20,24						
RMSE - D0 a D5 (%)	25,53						
RMSE - Completa (%)	33,63						



Dados MR: média FWD - BackMeDiNa - segmento 02

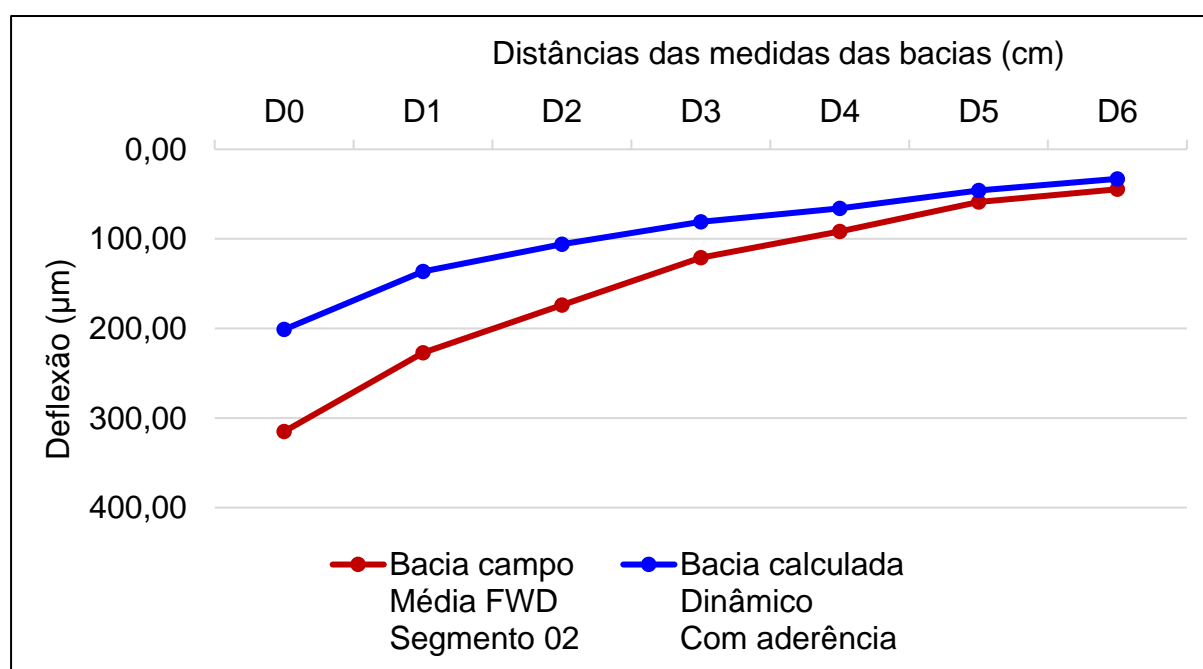
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 02

Modelo: Dinâmico com aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 02	315,14	227,22	173,80	120,96	91,66	58,98	44,62
Bacia calculada Dinâmico Com aderência	201,17	136,53	105,92	81,06	65,85	45,87	32,98

Diferença absoluta (μm)	113,98	90,69	67,89	39,89	25,81	13,10	11,64
Erro relativo absoluto (%)	36,17	39,91	39,06	32,98	28,16	22,22	26,09
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	36,17						
RMSE - D0 e D1 (%)	38,09						
RMSE - D0 a D2 (%)	38,41						
RMSE - D0 a D3 (%)	37,13						
RMSE - D0 a D4 (%)	35,52						
RMSE - D0 a D5 (%)	33,67						
RMSE - Completa (%)	32,69						



Dados MR: média FWD - BackMeDiNa - segmento 02

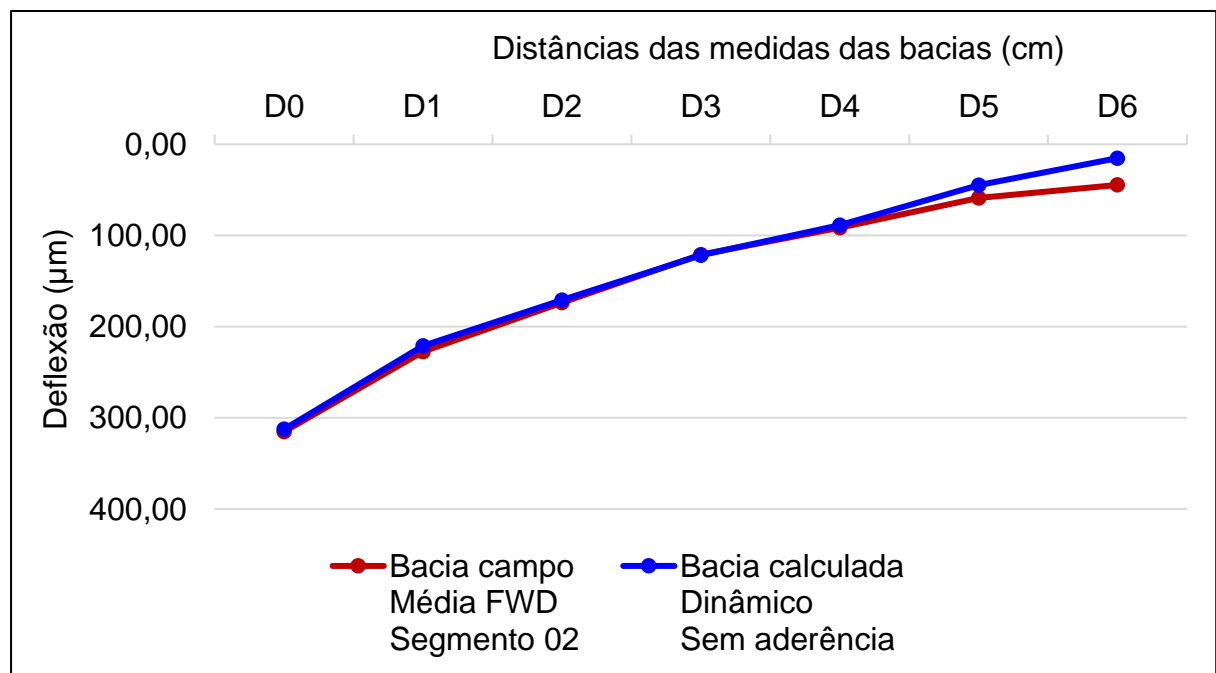
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 02

Modelo: Dinâmico sem aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 02	315,14	227,22	173,80	120,96	91,66	58,98	44,62
Bacia calculada Dinâmico Sem aderência	312,51	221,14	170,74	121,68	88,74	44,85	15,18

Diferença absoluta (µm)	2,64	6,09	3,06	0,72	2,92	14,13	29,44
Erro relativo absoluto (%)	0,84	2,68	1,76	0,60	3,19	23,96	65,98
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	0,84						
RMSE - D0 e D1 (%)	1,98						
RMSE - D0 a D2 (%)	1,91						
RMSE - D0 a D3 (%)	1,68						
RMSE - D0 a D4 (%)	2,07						
RMSE - D0 a D5 (%)	9,96						
RMSE - Completa (%)	26,59						



Dados MR: média FWD - BackMeDiNa - segmento 02

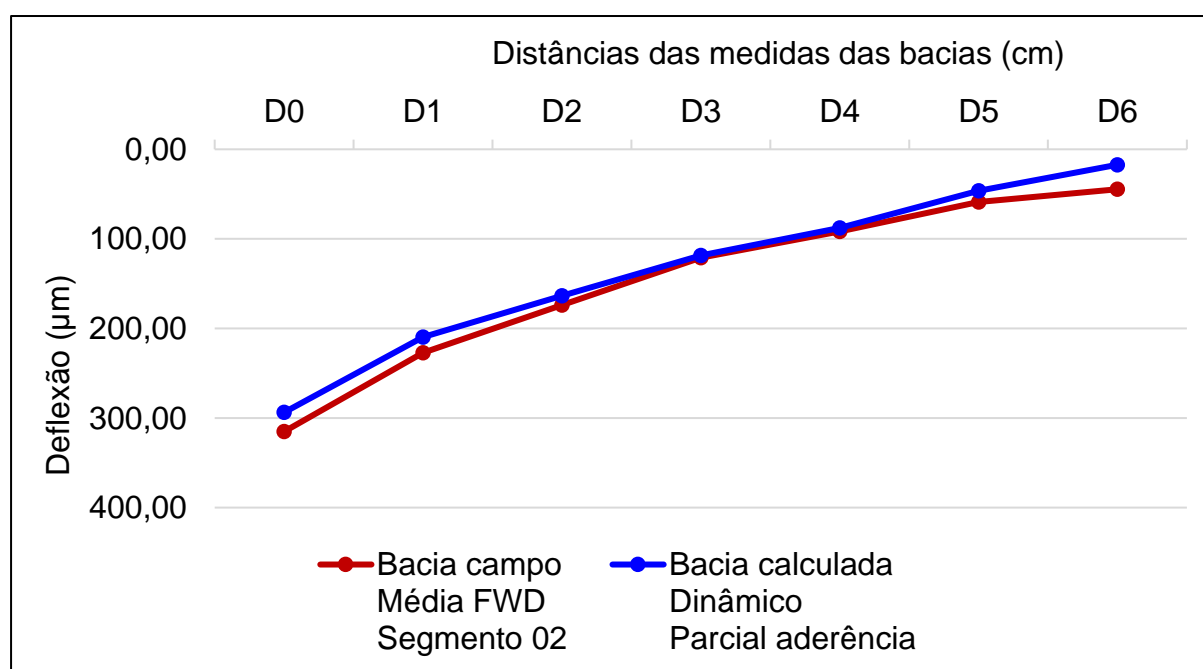
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 02

Modelo: Dinâmico com aderência parcial

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 02	315,14	227,22	173,80	120,96	91,66	58,98	44,62
Bacia calculada Dinâmico Parcial aderência	293,76	209,61	163,40	118,45	87,92	46,33	17,24

Diferença absoluta (µm)	21,39	17,61	10,41	2,51	3,74	12,64	27,38
Erro relativo absoluto (%)	6,79	7,75	5,99	2,07	4,08	21,44	61,35
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	6,79						
RMSE - D0 e D1 (%)	7,29						
RMSE - D0 a D2 (%)	6,88						
RMSE - D0 a D3 (%)	6,05						
RMSE - D0 a D4 (%)	5,71						
RMSE - D0 a D5 (%)	10,19						
RMSE - Completa (%)	25,03						



APÊNDICE I - BACIAS DE DEFLEXÃO - MODELOS ABAQUS - SEGMENTO 04

Dados MR: média FWD - BackMeDiNa - segmento 04

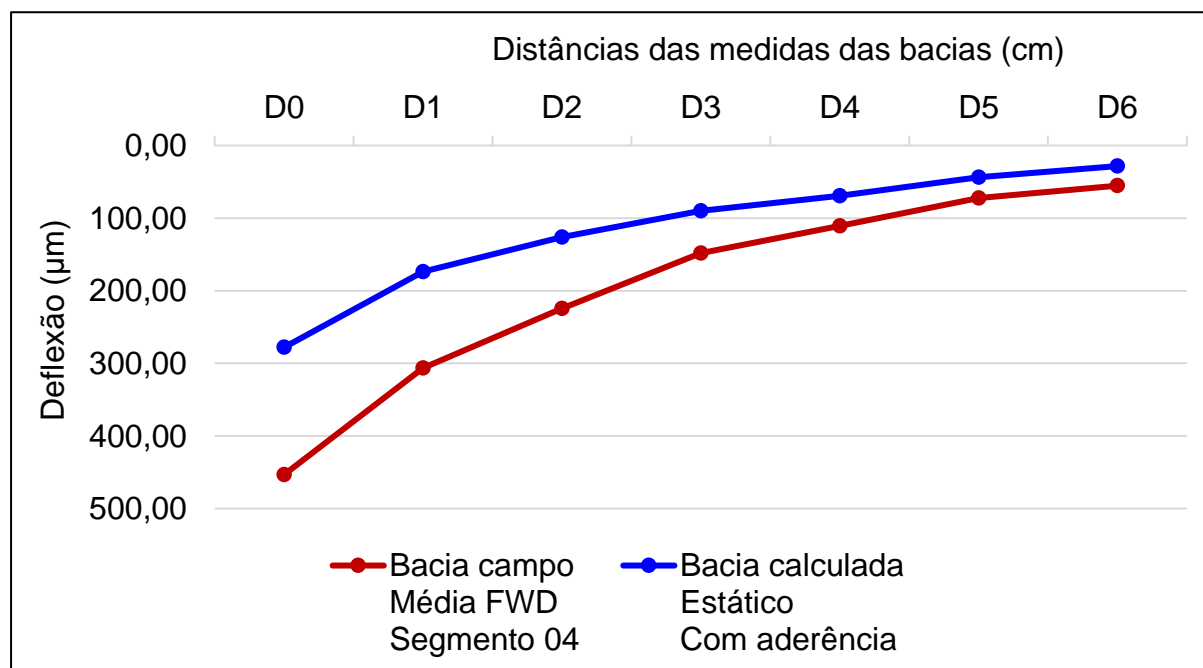
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 04

Modelo: Estático com aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 04	453,16	306,43	224,20	148,32	110,49	72,16	55,35
Bacia calculada Estático Com aderência	277,93	173,71	126,19	89,92	69,15	43,68	28,36

Diferença absoluta (µm)	175,23	132,72	98,02	58,40	41,34	28,48	26,99
Erro relativo absoluto (%)	38,67	43,31	43,72	39,37	37,42	39,47	48,76
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	38,67						
RMSE - D0 e D1 (%)	41,06						
RMSE - D0 a D2 (%)	41,96						
RMSE - D0 a D3 (%)	41,33						
RMSE - D0 a D4 (%)	40,58						
RMSE - D0 a D5 (%)	40,39						
RMSE - Completa (%)	41,69						



Dados MR: média FWD - BackMeDiNa - segmento 04

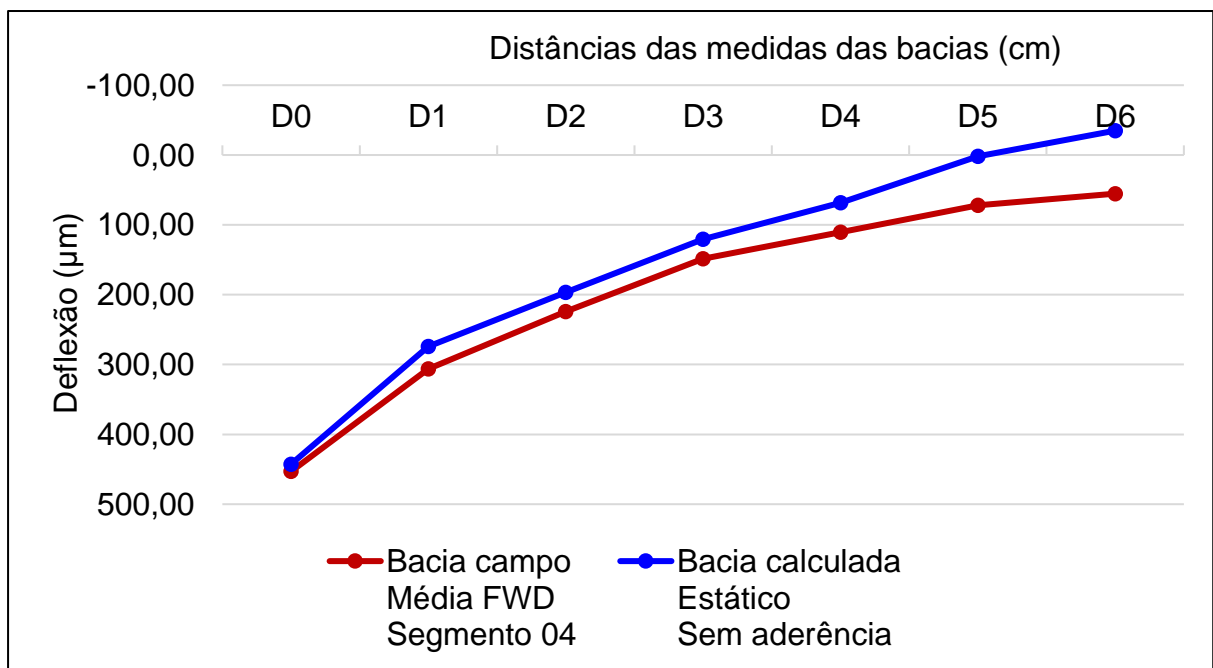
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 04

Modelo: Estático sem aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 04	453,16	306,43	224,20	148,32	110,49	72,16	55,35
Bacia calculada Estático Sem aderência	442,71	274,01	196,56	120,38	68,16	1,91	-34,87

Diferença absoluta (µm)	10,45	32,42	27,64	27,95	42,33	70,25	90,22
Erro relativo absoluto (%)	2,31	10,58	12,33	18,84	38,31	97,35	163,01
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	2,31						
RMSE - D0 e D1 (%)	7,66						
RMSE - D0 a D2 (%)	9,47						
RMSE - D0 a D3 (%)	12,49						
RMSE - D0 a D4 (%)	20,45						
RMSE - D0 a D5 (%)	43,91						
RMSE - Completa (%)	73,82						



Dados MR: média FWD - BackMeDiNa - segmento 04

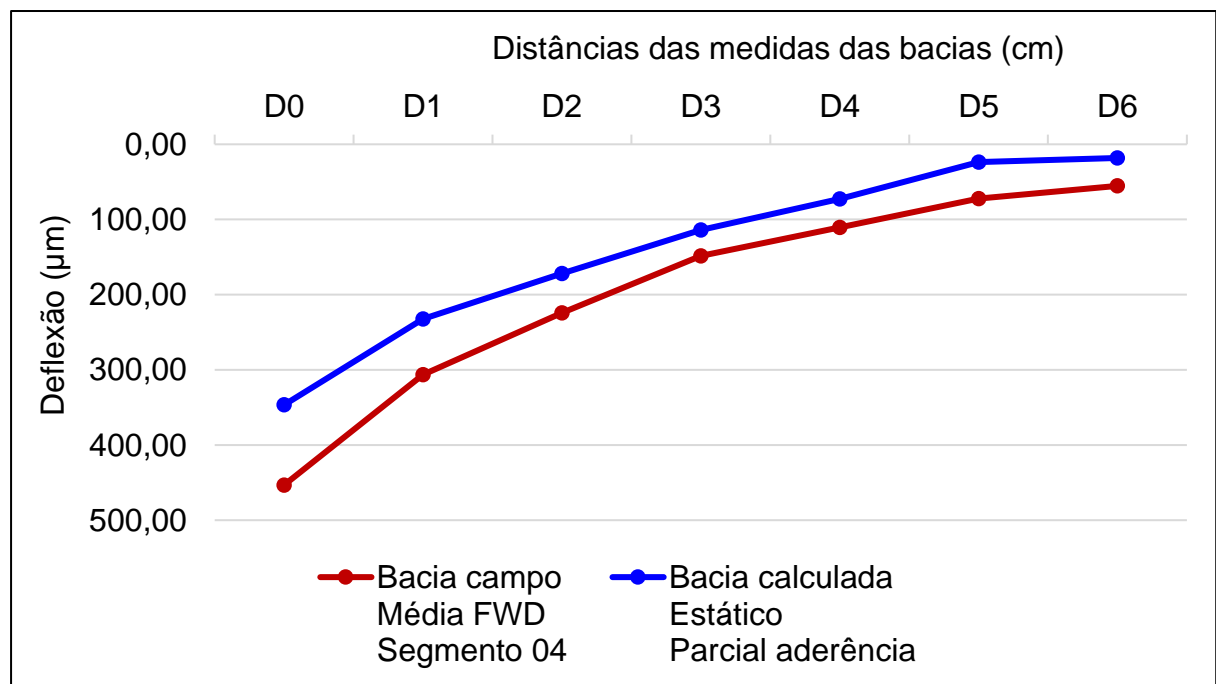
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 04

Modelo: Estático com aderência parcial

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 04	453,16	306,43	224,20	148,32	110,49	72,16	55,35
Bacia calculada Estático Parcial aderência	346,60	232,18	172,00	114,08	72,72	23,70	18,20

Diferença absoluta (µm)	106,56	74,25	52,20	34,25	37,77	48,46	37,14
Erro relativo absoluto (%)	23,52	24,23	23,28	23,09	34,19	67,16	67,11
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	23,52						
RMSE - D0 e D1 (%)	23,88						
RMSE - D0 a D2 (%)	23,68						
RMSE - D0 a D3 (%)	23,53						
RMSE - D0 a D4 (%)	26,02						
RMSE - D0 a D5 (%)	36,27						
RMSE - Completa (%)	42,08						



Dados MR: média FWD - BackMeDiNa - segmento 04

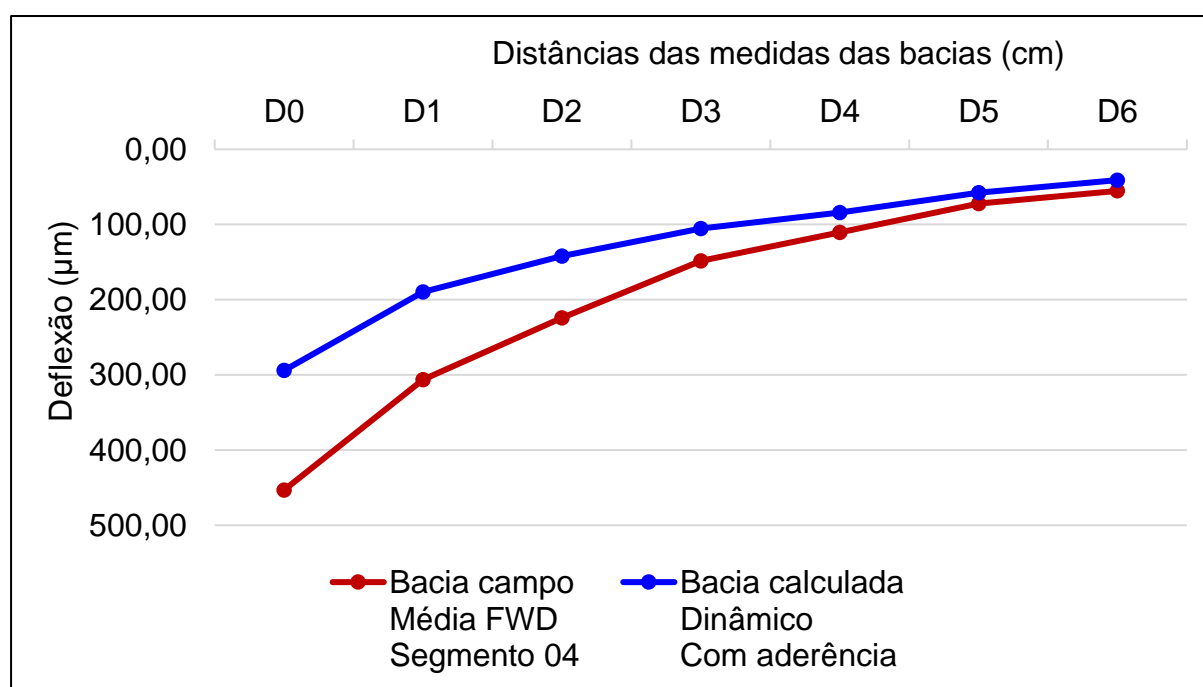
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 04

Modelo: Dinâmico com aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 04	453,16	306,43	224,20	148,32	110,49	72,16	55,35
Bacia calculada Dinâmico Com aderência	294,13	189,75	142,10	105,52	84,30	57,69	40,99

Diferença absoluta (µm)	159,04	116,68	82,11	42,81	26,19	14,47	14,35
Erro relativo absoluto (%)	35,09	38,08	36,62	28,86	23,70	20,05	25,94
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	35,09						
RMSE - D0 e D1 (%)	36,62						
RMSE - D0 a D2 (%)	36,62						
RMSE - D0 a D3 (%)	34,84						
RMSE - D0 a D4 (%)	32,92						
RMSE - D0 a D5 (%)	31,14						
RMSE - Completa (%)	30,45						



Dados MR: média FWD - BackMeDiNa - segmento 04

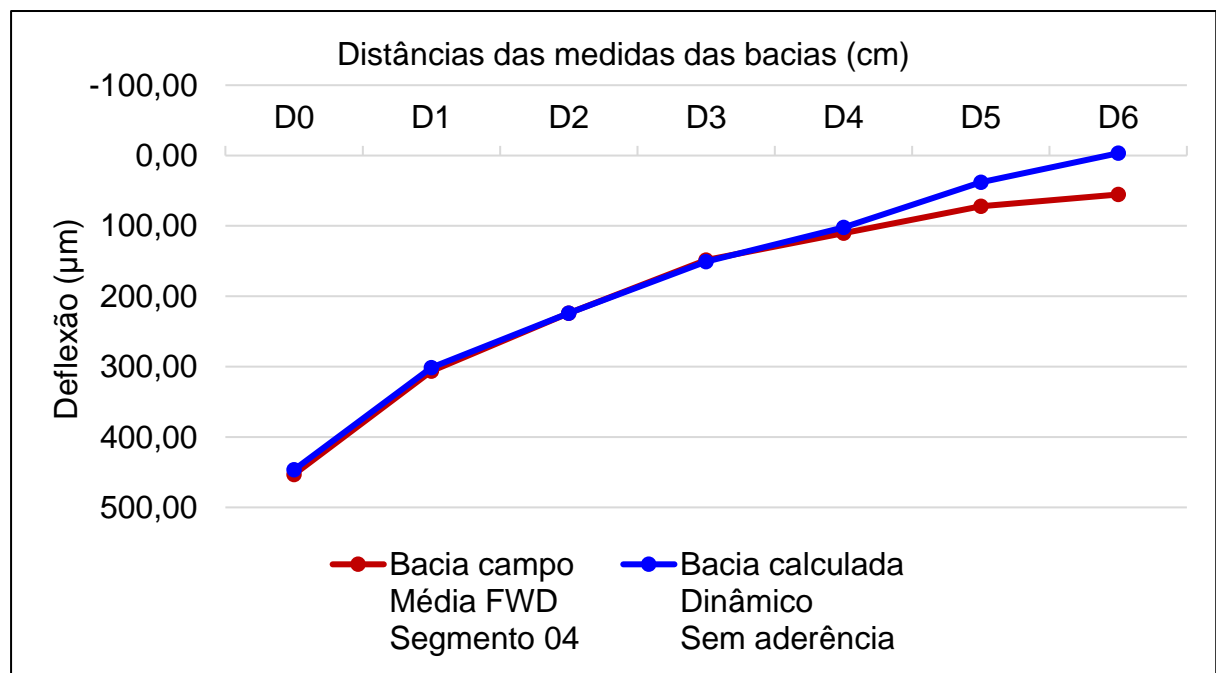
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 04

Modelo: Dinâmico sem aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 04	453,16	306,43	224,20	148,32	110,49	72,16	55,35
Bacia calculada Dinâmico Sem aderência	446,55	301,26	224,17	150,82	101,92	37,85	-3,28

Diferença absoluta (µm)	6,62	5,17	0,03	2,50	8,57	34,31	58,62
Erro relativo absoluto (%)	1,46	1,69	0,01	1,68	7,76	47,55	105,93
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	1,46						
RMSE - D0 e D1 (%)	1,58						
RMSE - D0 a D2 (%)	1,29						
RMSE - D0 a D3 (%)	1,40						
RMSE - D0 a D4 (%)	3,69						
RMSE - D0 a D5 (%)	19,70						
RMSE - Completa (%)	44,00						



Dados MR: média FWD - BackMeDiNa - segmento 04

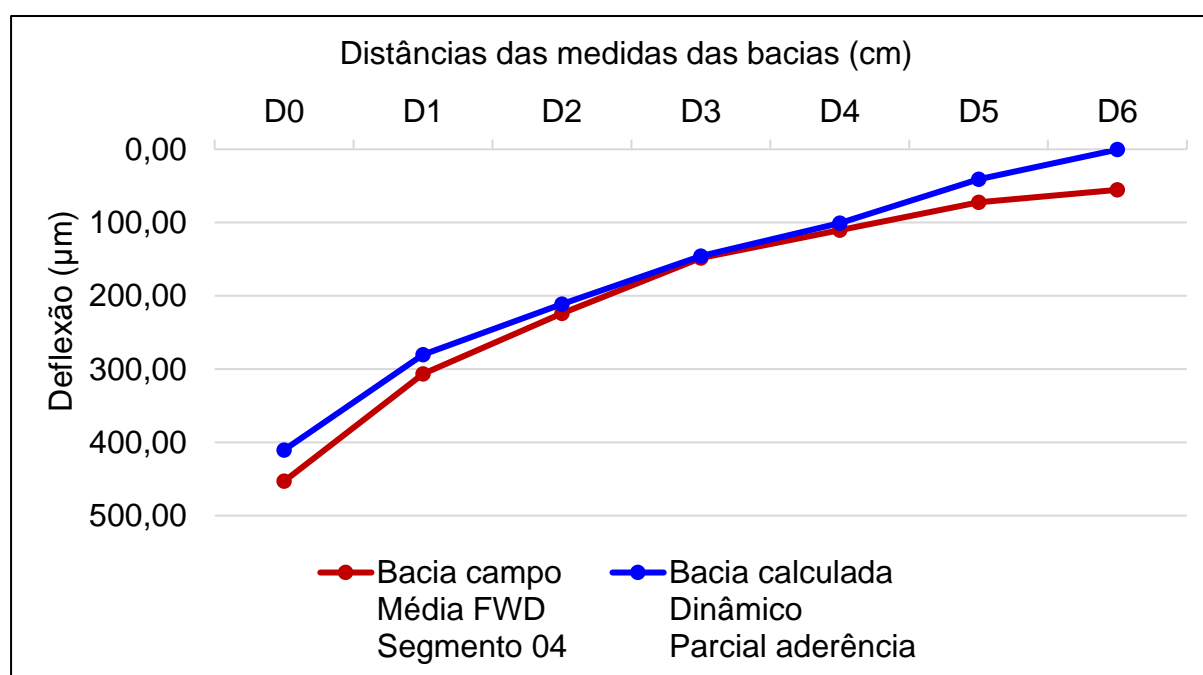
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 04

Modelo: Dinâmico com aderência parcial

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 04	453,16	306,43	224,20	148,32	110,49	72,16	55,35
Bacia calculada Dinâmico Parcial aderência	410,39	280,27	211,41	145,56	100,96	40,82	0,45

Diferença absoluta (µm)	42,77	26,16	12,80	2,77	9,53	31,34	54,89
Erro relativo absoluto (%)	9,44	8,54	5,71	1,87	8,63	43,43	99,18
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	9,44						
RMSE - D0 e D1 (%)	9,00						
RMSE - D0 a D2 (%)	8,05						
RMSE - D0 a D3 (%)	7,04						
RMSE - D0 a D4 (%)	7,38						
RMSE - D0 a D5 (%)	18,97						
RMSE - Completa (%)	41,40						



APÊNDICE J - BACIAS DE DEFLEXÃO - VALIDAÇÃO DO MEF - SEGMENTO 02

Dados MR: módulos sementes - valores mínimos

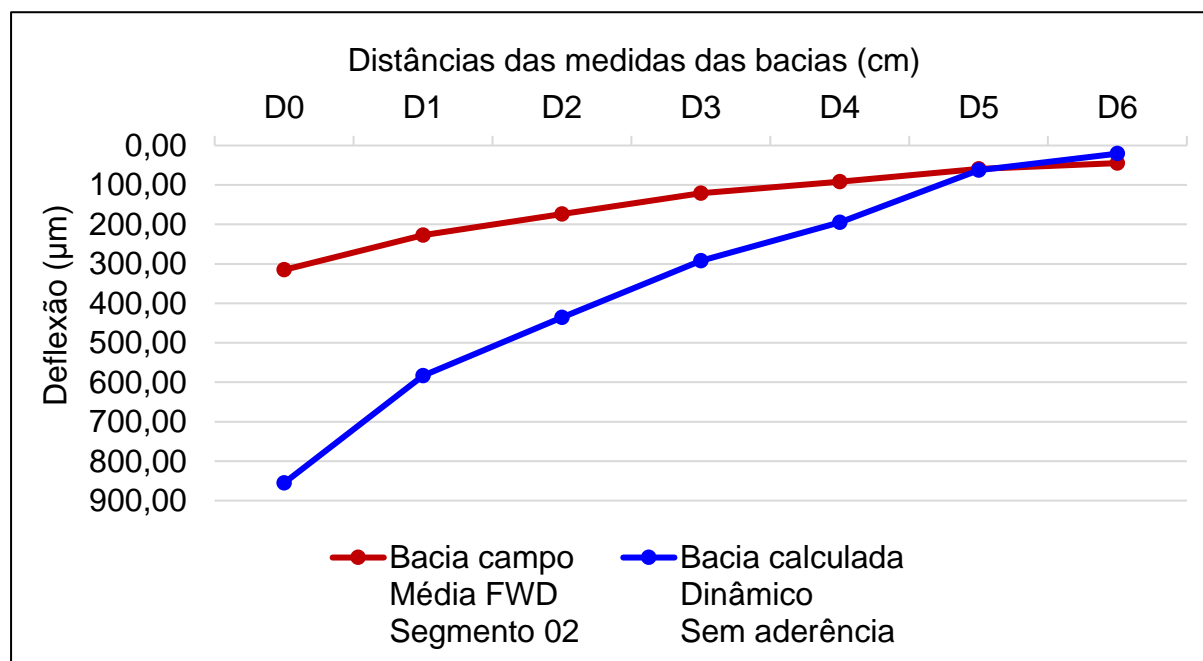
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 02

Modelo: Dinâmico sem aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 02	315,14	227,22	173,80	120,96	91,66	58,98	44,62
Bacia calculada Dinâmico Sem aderência	855,30	583,51	435,54	292,57	194,94	62,79	20,64

Diferença absoluta (µm)	540,16	356,29	261,74	171,61	103,28	3,82	23,98
Erro relativo absoluto (%)	171,40	156,80	150,59	141,88	112,68	6,47	53,74
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	171,40						
RMSE - D0 e D1 (%)	164,26						
RMSE - D0 a D2 (%)	159,84						
RMSE - D0 a D3 (%)	155,54						
RMSE - D0 a D4 (%)	147,96						
RMSE - D0 a D5 (%)	135,10						
RMSE - Completa (%)	126,72						



Dados MR: módulos sementes - valores intermediários

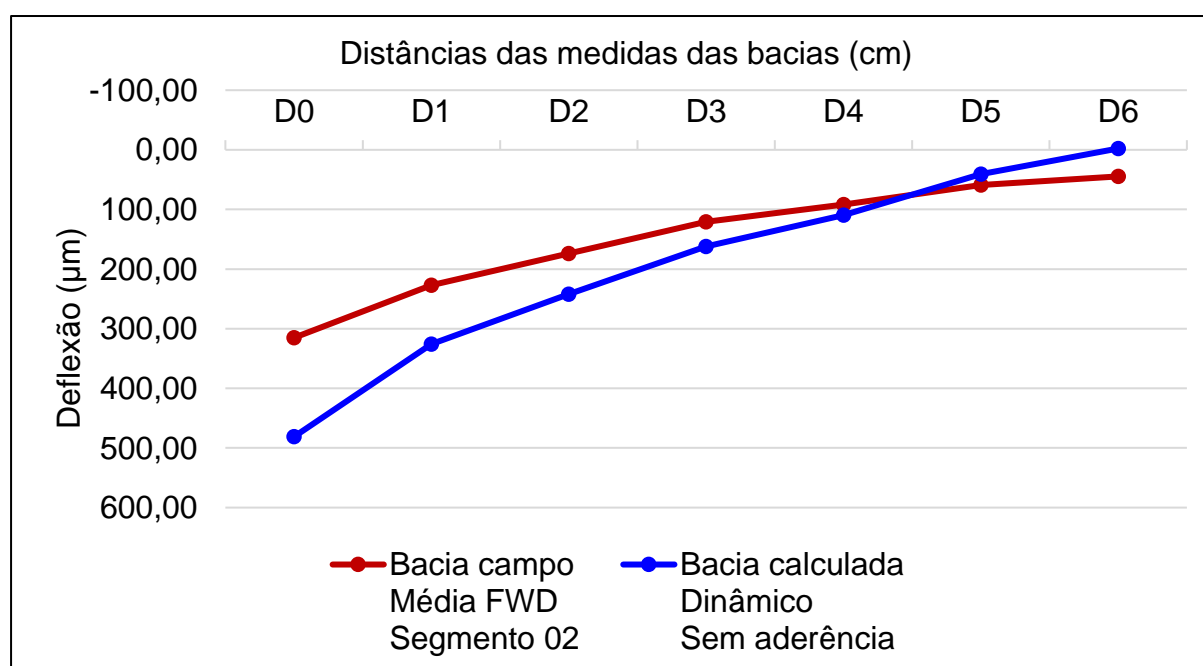
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 02

Modelo: Dinâmico sem aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 02	315,14	227,22	173,80	120,96	91,66	58,98	44,62
Bacia calculada Dinâmico Sem aderência	481,18	326,05	242,04	162,09	109,34	40,93	-2,20

Diferença absoluta (µm)	166,03	98,83	68,23	41,13	17,68	18,04	46,82
Erro relativo absoluto (%)	52,68	43,49	39,26	34,01	19,29	30,59	104,93
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	52,68						
RMSE - D0 e D1 (%)	48,31						
RMSE - D0 a D2 (%)	45,49						
RMSE - D0 a D3 (%)	42,91						
RMSE - D0 a D4 (%)	39,34						
RMSE - D0 a D5 (%)	38,02						
RMSE - Completa (%)	53,03						



Dados MR: módulos sementes - valores máximos

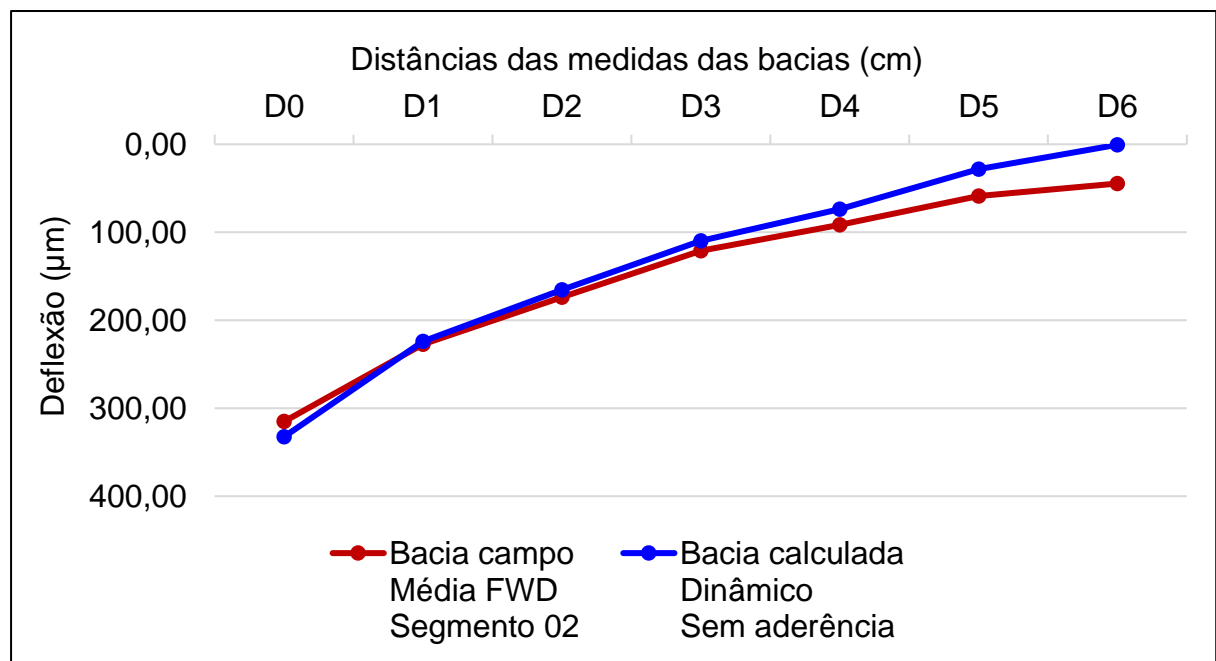
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 02

Modelo: Dinâmico sem aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 02	315,14	227,22	173,80	120,96	91,66	58,98	44,62
Bacia calculada Dinâmico Sem aderência	332,45	223,98	165,33	109,81	73,65	28,21	0,56

Diferença absoluta (µm)	17,30	3,25	8,47	11,15	18,01	30,77	44,06
Erro relativo absoluto (%)	5,49	1,43	4,87	9,22	19,65	52,17	98,75
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	5,49						
RMSE - D0 e D1 (%)	4,01						
RMSE - D0 a D2 (%)	4,32						
RMSE - D0 a D3 (%)	5,93						
RMSE - D0 a D4 (%)	10,27						
RMSE - D0 a D5 (%)	23,27						
RMSE - Completa (%)	43,09						



Dados MR: refinamento final da retroanálise

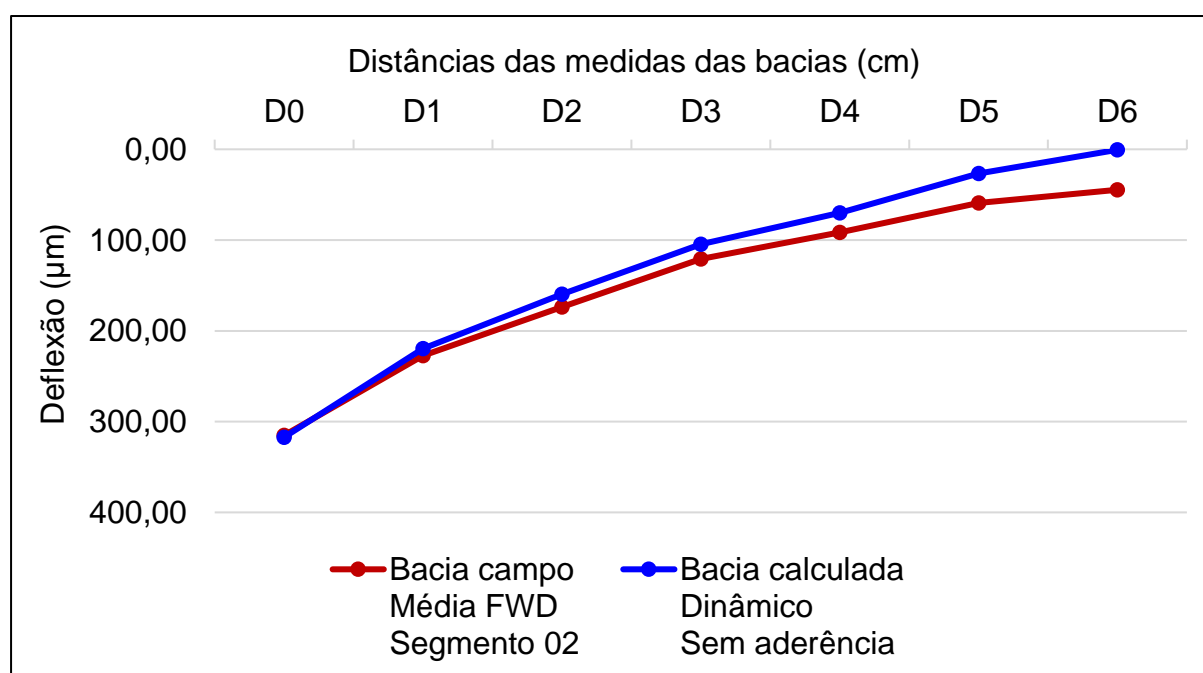
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 02

Modelo: Dinâmico sem aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 02	315,14	227,22	173,80	120,96	91,66	58,98	44,62
Bacia calculada Dinâmico Sem aderência	317,17	219,49	159,45	104,44	69,97	26,75	0,55

Diferença absoluta (µm)	2,02	7,74	14,35	16,51	21,69	32,23	44,07
Erro relativo absoluto (%)	0,64	3,40	8,26	13,65	23,66	54,65	98,76
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	0,64						
RMSE - D0 e D1 (%)	2,45						
RMSE - D0 a D2 (%)	5,17						
RMSE - D0 a D3 (%)	8,16						
RMSE - D0 a D4 (%)	12,86						
RMSE - D0 a D5 (%)	25,21						
RMSE - Completa (%)	44,02						



APÊNDICE K - BACIAS DE DEFLEXÃO - VALIDAÇÃO DO MEF - SEGMENTO 04

Dados MR: módulos sementes - valores mínimos

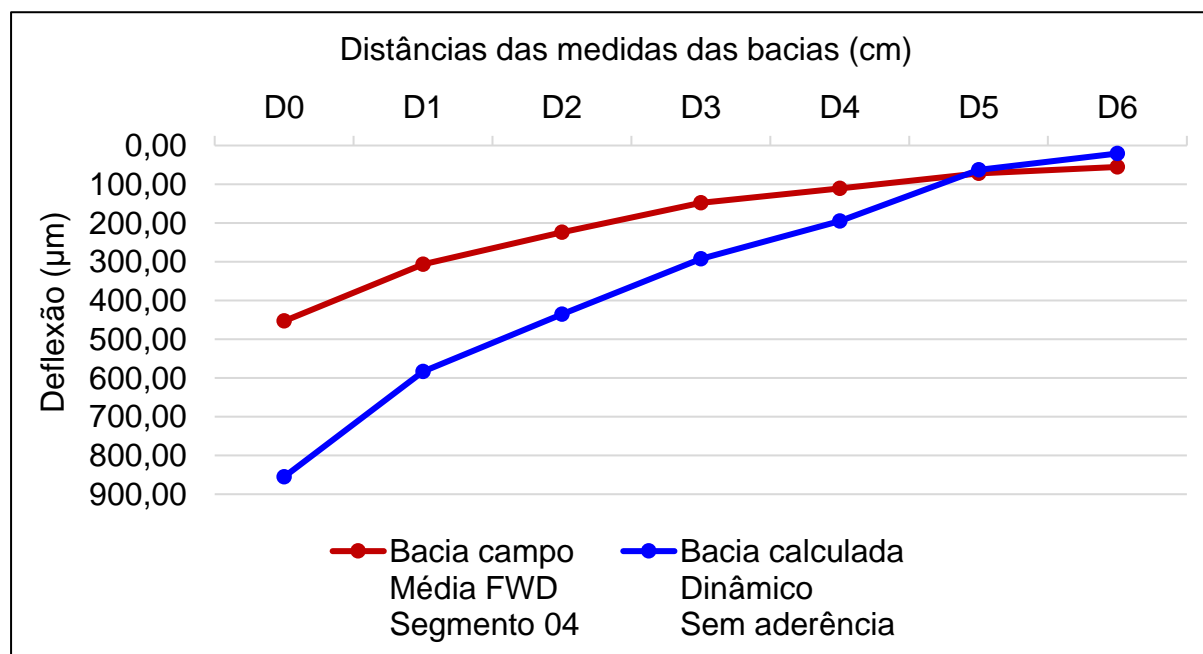
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 04

Modelo: Dinâmico sem aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 04	453,16	306,43	224,20	148,32	110,49	72,16	55,35
Bacia calculada Dinâmico Sem aderência	855,30	583,51	435,54	292,57	194,94	62,79	20,64

Diferença absoluta (µm)	402,14	277,08	211,34	144,25	84,45	9,37	34,71
Erro relativo absoluto (%)	88,74	90,42	94,26	97,25	76,43	12,98	62,71
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	88,74						
RMSE - D0 e D1 (%)	89,59						
RMSE - D0 a D2 (%)	91,17						
RMSE - D0 a D3 (%)	92,73						
RMSE - D0 a D4 (%)	89,71						
RMSE - D0 a D5 (%)	82,06						
RMSE - Completa (%)	79,58						



Dados MR: módulos sementes - valores intermediários

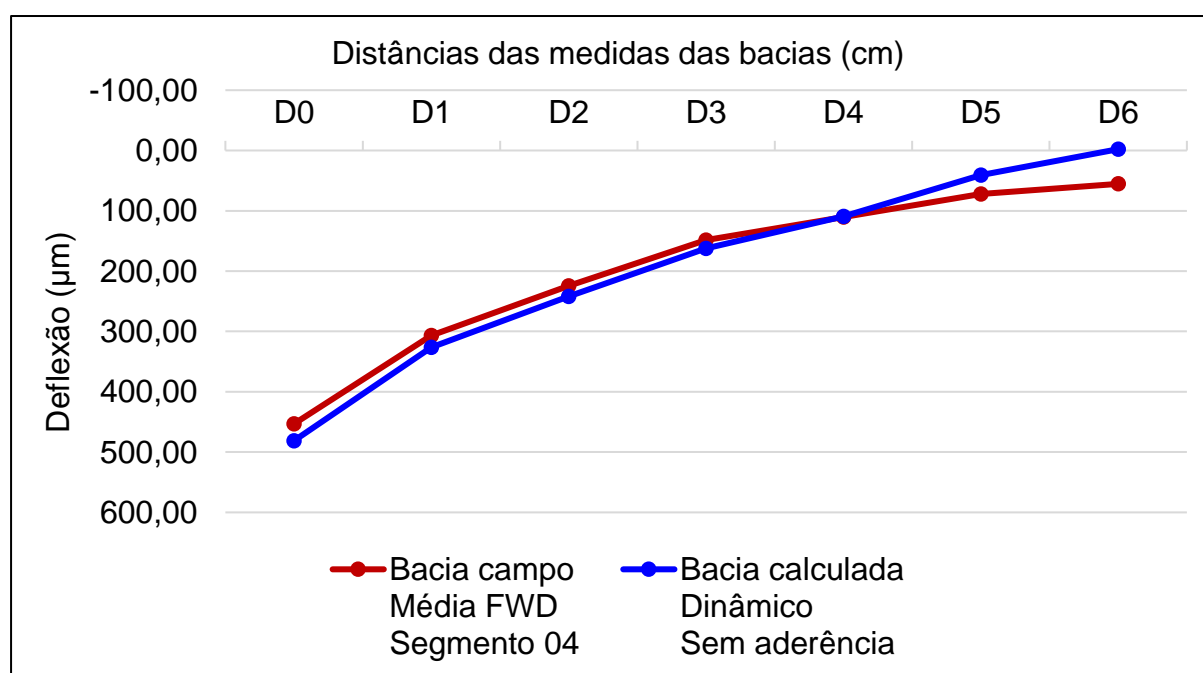
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 04

Modelo: Dinâmico sem aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 04	453,16	306,43	224,20	148,32	110,49	72,16	55,35
Bacia calculada Dinâmico Sem aderência	481,18	326,05	242,04	162,09	109,34	40,93	-2,20

Diferença absoluta (µm)	28,02	19,62	17,83	13,77	1,15	31,23	57,55
Erro relativo absoluto (%)	6,18	6,40	7,95	9,28	1,04	43,28	103,98
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	6,18						
RMSE - D0 e D1 (%)	6,29						
RMSE - D0 a D2 (%)	6,89						
RMSE - D0 a D3 (%)	7,56						
RMSE - D0 a D4 (%)	6,78						
RMSE - D0 a D5 (%)	18,72						
RMSE - Completa (%)	42,95						



Dados MR: módulos sementes - valores máximos

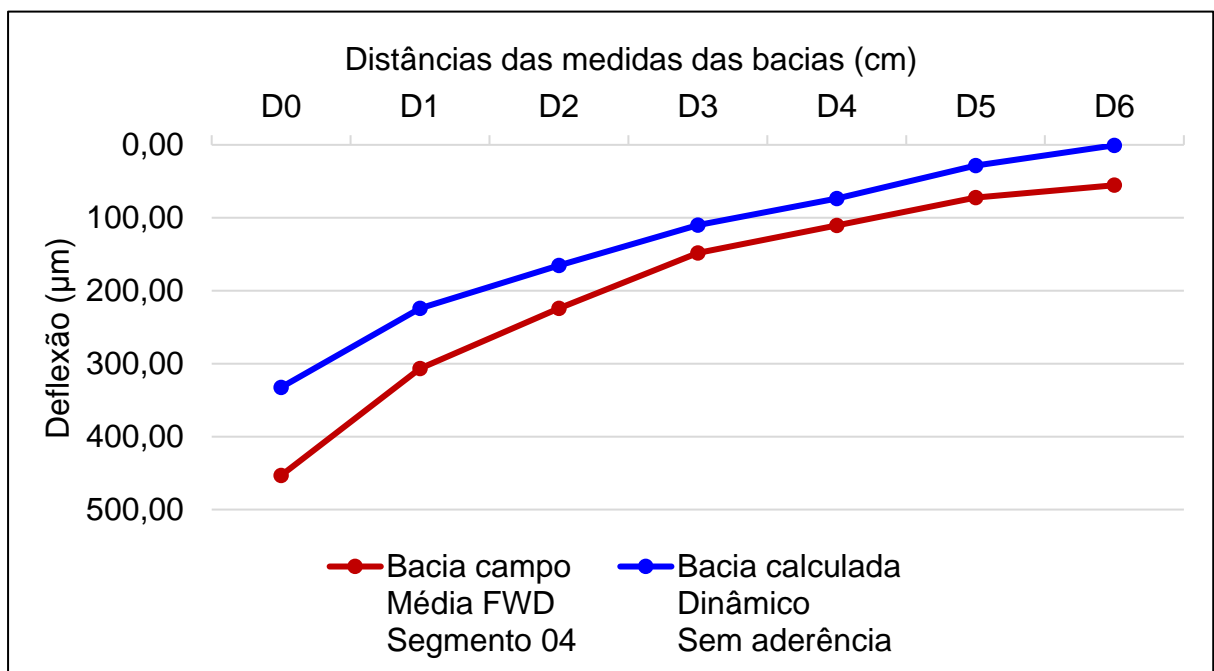
Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 04

Modelo: Dinâmico sem aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 04	453,16	306,43	224,20	148,32	110,49	72,16	55,35
Bacia calculada Dinâmico Sem aderência	332,45	223,98	165,33	109,81	73,65	28,21	0,56

Diferença absoluta (µm)	120,72	82,45	58,87	38,52	36,84	43,96	54,79
Erro relativo absoluto (%)	26,64	26,91	26,26	25,97	33,34	60,91	98,99
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	26,64						
RMSE - D0 e D1 (%)	26,77						
RMSE - D0 a D2 (%)	26,60						
RMSE - D0 a D3 (%)	26,45						
RMSE - D0 a D4 (%)	27,96						
RMSE - D0 a D5 (%)	35,64						
RMSE - Completa (%)	49,88						



Dados MR: refinamento final da retroanálise

Dados bacia de campo: média FWD (correção carga) - segmento 04

Modelo: Dinâmico sem aderência

	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Bacia campo Média FWD Segmento 04	453,16	306,43	224,20	148,32	110,49	72,16	55,35
Bacia calculada Dinâmico Sem aderência	453,06	306,72	227,48	152,14	102,59	38,85	-1,32

Diferença absoluta (µm)	0,11	0,29	3,28	3,81	7,90	33,31	56,67
Erro relativo absoluto (%)	0,02	0,09	1,46	2,57	7,15	46,16	102,39
Erro relativo admissível (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	50,00

Raiz quadrática média relativa (erro RMS)							
RMSE - D0 (%)	0,02						
RMSE - D0 e D1 (%)	0,07						
RMSE - D0 a D2 (%)	0,85						
RMSE - D0 a D3 (%)	1,48						
RMSE - D0 a D4 (%)	3,46						
RMSE - D0 a D5 (%)	19,11						
RMSE - Completa (%)	42,55						

