

Com o passar do tempo e com o elevado número de solicitações das vias tem-se uma natural degradação do pavimento. Avaliações funcionais e estruturais periódicas são necessárias para que o poder público possa gerenciar e priorizar políticas de investimento na manutenção e recuperação das vias. Atualmente uma das formas de analisar as condições estruturais de pavimentos é através da retroanálises das bacias de deflexão medidas no campo em distintos pontos da via. Na presente pesquisa foram empregados os softwares BackMedina e BAKFAA. Estes programas recebem como informação de entrada as bacias de deflexão determinadas no ensaio de FWD. Esta pesquisa teve como um de seus objetivos efetuar um comparativo entre estes programas computacionais através de retroanálises em levantamentos de bacias de deflexão com o uso da Viga Benkelman (VB) em três vias típicas do município de Joinville. Como resultado observou-se que o programa BackMedina inferiu módulos de resiliência menores às camadas dos pavimentos comparado ao BAKFAA, apresentando retroanálises mais significativas, com menores erros. Os dois softwares mostram que a consideração de interfaces não aderidas infere maiores rigidezes às camadas, causando um estado de tensões maior nos revestimentos e subleitos, ocasionando a diminuição da sua vida de fadiga.

Orientador: Edgar Odebrecht

JOINVILLE, 2020

ANO  
2020

GUSTAVO HENRIQUE  
VERONESE VIEIRA

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS URBANOS  
A PARTIR DE ENSAIOS DE CAMPO E RETROANÁLISE



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

## AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS URBANOS A PARTIR DE ENSAIOS DE CAMPO E RETROANÁLISE

GUSTAVO HENRIQUE VERONESE VIEIRA

JOINVILLE, 2020

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

**GUSTAVO HENRIQUE VERONESE VIEIRA**

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS URBANOS A PARTIR DE  
ENSAIOS DE CAMPO E RETROANÁLISE**

**JOINVILLE  
2020**

GUSTAVO HENRIQUE VERONESE VIEIRA

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS URBANOS A PARTIR DE  
ENSAIOS DE CAMPO E RETROANÁLISE**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na Universidade do Estado de Santa Catarina.  
Orientador: Prof. Dr. Edgar Odebrecht.

JOINVILLE  
2020

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

Vieira, Gustavo Henrique Veronese  
Avaliação estrutural de pavimentos urbanos a partir de  
ensaios de campo e retroanálise / Gustavo Henrique  
Veronese Vieira. -- 2020.  
197 p.

Orientador: Edgar Odebrecht  
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de  
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2020.

1. Pavimentos urbanos . 2. Avaliação estrutural . 3.  
Módulo  
de resiliência . 4. Retroanálise . I. Odebrecht , Edgar. II.  
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de  
Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil. III. Título.

**Avaliação Estrutural de Pavimentos Urbanos a partir de Ensaios de Campo e  
Retro Análise**

por

**Gustavo Henrique Veronese Vieira**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**

Área de concentração em “Engenharia Urbana e da Construção Civil”  
e aprovada em sua forma final pelo

**CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA CIVIL  
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.**

Banca Examinadora:

---

**ASSINADO DIGITALMENTE**  
Prof. Dr. Edgar Odebrecht  
CCT/UDESC  
(Orientador/Presidente)

---

**VIA VIDEOCONFERÊNCIA**  
Prof. Dr. Deividí da Silva Pereira  
UFSM

---

**VIA VIDEOCONFERÊNCIA**  
Profa. Dra. Heliana Barbosa  
Fontenele  
UEL

**Joinville, SC, 15 de maio de 2020.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por todas as oportunidades que vem proporcionando em minha vida.

À minha família, que não poupou esforços para me auxiliar e incentivar em mais uma etapa da minha formação. Sem este apoio nada seria possível.

Agradeço também aos professores do PPGEC da UDESC que compartilharam seus conhecimentos.

Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Edgar Odebrecht pela orientação e pelos conselhos.

Gratidão também à Profª. Drª. Adriana Goulart dos Santos por estar sempre presente e auxiliar no desenvolvimento deste trabalho.

A CAPES e a UDESC, por meio do PROMOP, pelas bolsas de mestrado concedidas.

Por fim, a todos os amigos e colegas que estiveram presentes e compartilharam esta jornada. Tornaram o processo mais agradável.

## RESUMO

O desenvolvimento de uma região ou de um município está diretamente ligado às condições de funcionalidade e à estrutura da malha viária. Com o passar do tempo e com o elevado número de solicitações das vias tem-se uma natural degradação do pavimento. Avaliações funcionais e estruturais periódicas são necessárias para que o poder público possa gerenciar e priorizar políticas de investimento na manutenção e recuperação das vias. Para tanto se faz necessário quantificar as condições em que se encontram estes pavimentos. Esta quantificação pode ser efetuada com base em levantamentos não destrutivos que após cuidadosa análise permitem a elaboração de projetos de recuperação. Atualmente uma das formas de analisar as condições estruturais de pavimentos é através da retroanálises das bacias de deflexão medidas no campo em distintos pontos da via. Estas retroanálises se fundamentam em modelos matemáticos baseados na Teoria da Elasticidade e estão implementadas em programas computacionais de uso corrente da engenharia de pavimentos. Na presente pesquisa foram empregados os softwares denominados de BackMedina e BAKFAA. Estes programas recebem como informação de entrada as bacias de deflexão determinadas no ensaio normatizado que utiliza o deflectômetro de impacto tipo *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Esta pesquisa teve como um de seus objetivos efetuar um comparativo entre estes programas computacionais através de retroanálises em levantamentos de bacias de deflexão com o uso da Viga Benkelman (VB) realizados por Rodrigues (2018) em três vias típicas do município de Joinville. Estas vias diferem das vias rodoviárias por terem sofrido adaptações e transformações ao longo do tempo tanto no que se refere às distintas características de composição e espessura das camadas e do tipo de material. Analisou-se uma via arterial recentemente construída de ligação entre bairros, uma via coletora da região central do município que recentemente recebeu um processo de recuperação e uma via local de bairro de periferia sujeita somente ao volume de tráfego local. Para que a retroanálise pudesse ser realizada as deflexões obtidas por carregamento de VB passaram por um processo adaptativo de carregamentos. Como resultado observou-se que o programa BackMedina inferiu módulos de resiliência menores às camadas dos pavimentos comparado ao BAKFAA, apresentando retroanálises mais significativas, com menores erros. Os dois softwares mostram que a consideração de interfaces não aderidas infere maiores rigidezes às camadas, causando um estado de tensões maior nos revestimentos e subleitos, ocasionando a diminuição da sua vida de fadiga. A correção das deflexões em função da temperatura é necessária para fins comparativos de diferentes estruturas ensaiadas em diferentes condições climáticas. Ficou claro que dados obtidos através do ensaio de VB podem ser analisados por programas mecanísticos. Observou-se uma redução dos valores dos módulos de resiliência com a redução da importância da via e que estes podem servir de base para avaliações estruturais de vias similares pelo órgão gestor do município, fornecendo um cenário real de vias urbanas da cidade de Joinville.

**Palavras-chave:** Pavimentos urbanos. Avaliação estrutural. Módulo de resiliência. Retroanálise.

## ABSTRACT

The development of a region or a county is directly related to the conditions of functionality and the structure of the roads. The degradation of pavement is directly related to age and traffic demands. Periodic functional and structural evaluations are necessary for the government must manage and prioritize investment policies in the maintenance and recovery of roads. Therefore, it is necessary to quantify the conditions of these pavements. This quantification can be performed based on non-destructive investigation that, after careful analysis, allows the development of recovery projects. Currently one of the ways to analyze the structural conditions of pavements is through retroanalysis of the deflection basins measured in the field at different points of the road. These retroanalysis are reasoned on mathematical models based on the Theory of Elasticity and are implemented in pavement engineering programs. In this research, were used the software's BackMedina and BAKFAA. These software's use the deflection basins determined in the test using the Falling Weight Deflectometer (FWD) equipment as input data. This research aimed to make a comparison between these software's through retroanalysis of deflection basins obtained by Viga Benkelman (VB) made by Rodrigues (2018) in three typical roads of Joinville city. These roads differ from highways in their characteristics of composition, thickness and type of material. Were searched an arterial road that connects neighborhoods, a collector road in the central region of the county that recently received a recovery process and a local road in the suburbs subject only to the volume of local traffic. In order for the retroanalysis to be carried out, the deflections obtained by VB loading went through an adaptive loading process. As a result, it was observed that the BackMedina inferred smaller resilience modules to the pavement layers compared to BAKFAA, presenting more significant retroanalysis, with smaller errors. The two softwares show that consideration of non-adhered interfaces infers greater rigidity to the layers, causing a state of greater stress in the asphalt coatings and subgrades, promoting the reduction of their fatigue life. The correction of deflections basins as a function of temperature is necessary for comparative purposes of different structures tested in different climatic conditions. It was clear that data obtained through the VB test can be analyzed by mechanistic programs. It was observed a reduction in the values of the resilience modules with the reduction of the importance of the road and these modules can serve as a base for structural evaluations of similar roads by the managing body of the municipality, providing a real scenario of urban roads in the city of Joinville

**Keywords:** Urban pavements. Structural evaluation. Resilience module. Retroanalysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esforços em camadas do pavimento .....	21
Figura 2 - Camadas dos pavimentos rígido e flexível.....	22
Figura 3 - Resposta mecânica de pavimentos .....	22
Figura 4 - Perfis de pavimentos.....	25
Figura 5 - Ensaio de compressão diametral.....	31
Figura 6 - Esquema do equipamento triaxial .....	32
Figura 7 - Corpos de prova submetidos a forças axiais .....	34
Figura 8 - Viga Benkelman .....	38
Figura 9 - Ensaio com viga Benkelman.....	39
Figura 10 - Bacia de deflexão da viga Benkelman .....	40
Figura 11 - Placa circular do FWD .....	42
Figura 12 - Sensores do FWD.....	42
Figura 13 - Bacias de deflexões .....	46
Figura 14 - Correção de deflexões em função da temperatura .....	50
Figura 15 - Tensões em um pavimento.....	52
Figura 16 - Parâmetros de entrada para a TSCE .....	57
Figura 17 - Interface BackMedina .....	59
Figura 18 - Sistema de referência do BackMedina.....	59
Figura 19 - Interface BAKFAA .....	61
Figura 20 - Área equivalente de carregamento VB .....	63
Figura 21 - Adequação das bacias de deflexões.....	64
Figura 22 - Comparação dos módulos obtidos.....	66
Figura 23 - Características do pavimento do ELSYM5.....	69
Figura 24 - Carregamento no ELSYM5 .....	69
Figura 25 - Posições das análises no ELSYM5.....	70
Figura 26 - Influência da aderência entre camadas .....	73
Figura 27 - Localização das vias .....	82
Figura 28 - Perfil trecho 1 .....	83
Figura 29 - Perfil Trecho 2.....	83
Figura 30 - Perfil trecho 3.....	84
Figura 31 - Marcação de estação de ensaio .....	85
Figura 32 - Ensaio viga Benkelman.....	86
Figura 33 - Tela do BackMedina .....	89

Figura 34 - Tela do BAKFAA .....	92
Figura 35 - Metodologia adotada.....	95
Figura 36 - Tensões de acordo com a aderência entre camadas .....	156

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Termos aplicáveis à camada de revestimento asfáltico .....	24
Tabela 2 - Valores típicos de coeficiente de Poisson .....	35
Tabela 3 - Módulos de resiliência BR 101/SC .....	55
Tabela 4 - Módulos de resiliência BR 101/SE .....	56
Tabela 5 - Conversão dos carregamentos de VB para FWD .....	63
Tabela 6 - Módulos e espessuras arbitrados.....	65
Tabela 7 - Deflexões medidas por levantamento de VB .....	67
Tabela 8 - Módulos de resiliência Trecho 1 .....	67
Tabela 9 - Deflexões adaptadas para FWD .....	67
Tabela 10 - Módulos de resiliência Trecho 1 com adaptação C2.....	68
Tabela 11 - Resumo das camadas dos trechos .....	84
Tabela 12 - Coeficientes de Poisson adotados .....	90
Tabela 13 - Parâmetros de entrada do programa .....	91
Tabela 14 - Correção da posição das leituras .....	96
Tabela 15 - Adaptação das bacias do Trecho 1 .....	97
Tabela 16 - Adaptação das bacias do Trecho 2 .....	97
Tabela 17 - Adaptação das bacias do Trecho 3 .....	97
Tabela 18 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas aderidas .....	99
Tabela 19 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas não aderidas .....	99
Tabela 20 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas aderidas .....	102
Tabela 21 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas não aderidas .....	102
Tabela 22 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas aderidas .....	105
Tabela 23 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas não aderidas .....	106
Tabela 24 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas aderidas .....	109
Tabela 25 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas não aderidas .....	109
Tabela 26 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas aderidas .....	112
Tabela 27 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas não aderidas .....	112
Tabela 28 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas aderidas .....	115
Tabela 29 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas não aderidas .....	115
Tabela 30 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas aderidas com correção de temperatura .....	124
Tabela 31 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas não aderidas com correção de temperatura .....	124

Tabela 32 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas aderidas com correção de temperatura .....	128
Tabela 33 - Módulo de resiliência Trecho 2 - camadas não aderidas com correção de temperatura .....	129
Tabela 34 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas aderidas com correção de temperatura .....	132
Tabela 35 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas não aderidas com correção de temperatura .....	132
Tabela 36 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas aderidas com correção de temperatura .....	136
Tabela 37 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas não aderidas com correção de temperatura .....	137
Tabela 38 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas aderidas com correção de temperatura .....	140
Tabela 39 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas não aderidas com correção de temperatura .....	141
Tabela 40 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas aderidas com correção de temperatura .....	145
Tabela 41 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas não aderidas com correção de temperatura .....	145
Tabela 42 - Análise macanística para o cálculo da vida de fadiga .....	162
Tabela 43 – Estimativa de vida dos pavimentos .....	163

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensão-deformação de materiais granulares .....	33
Gráfico 2 - Bacias de deflexão Rua São Borja .....	87
Gráfico 3 - Trecho 1 - BackMedina.....	100
Gráfico 4 - Trecho 1 - revestimento.....	100
Gráfico 5 - Trecho 1 - camadas granulares .....	101
Gráfico 6 - Trecho 1 - subleito .....	101
Gráfico 7 - Trecho 2 BackMedina.....	103
Gráfico 8 - Trecho 2 - revestimento.....	104
Gráfico 9 - Trecho 2 - camadas granulares .....	104
Gráfico 10 - Trecho 2 - subleito .....	104
Gráfico 11 - Trecho 3 BackMedina.....	106
Gráfico 12 - Trecho 3 - revestimento.....	107
Gráfico 13 - Trecho 3 - camadas granulares .....	107
Gráfico 14 - Trecho 3 - subleito .....	107
Gráfico 15 - Trecho 1 - BAKFAA .....	110
Gráfico 16 - Trecho 1 - revestimento.....	110
Gráfico 17 - Trecho 1 - camadas granulares .....	111
Gráfico 18 - Trecho 1 - subleito .....	111
Gráfico 19 - Trecho 2 - BAKFAA .....	113
Gráfico 20 - Trecho 2 - revestimento.....	113
Gráfico 21 - Trecho 2 - camadas granulares .....	114
Gráfico 22 - Trecho 2 - subleito .....	114
Gráfico 23 - Trecho 3 - BAKFAA .....	116
Gráfico 24 - Trecho 3 - revestimento.....	116
Gráfico 25 - Trecho 3 - camadas granulares .....	117
Gráfico 26 - Trecho 3 - subleito .....	117
Gráfico 27 - Correção das deflexões para temperatura de 20°C.....	123
Gráfico 28 - Trecho 1 – BackMedina com correção de temperatura .....	125
Gráfico 29 - Trecho 1 - revestimento com correção de temperatura .....	126
Gráfico 30 - Trecho 1 - camadas granulares com correção de temperatura .....	127
Gráfico 31 - Trecho 1 - subleito com correção de temperatura .....	127
Gráfico 32 - Módulos de resiliência Trecho 2 - BackMedina com correção de temperatura .....	129

Gráfico 33 - Trecho 2 - revestimento com correção de temperatura .....	130
Gráfico 34 - Trecho 2 - camadas granulares com correção de temperatura .....	131
Gráfico 35 - Trecho 2 - subleito com correção de temperatura .....	131
Gráfico 36 - Módulos de resiliência Trecho 3 - BackMedina com correção de temperatura .....	133
Gráfico 37 - Trecho 3 - revestimento com correção de temperatura .....	134
Gráfico 38 - Trecho 3 - camadas granulares com correção de temperatura .....	134
Gráfico 39 - Trecho 3 - subleito com correção de temperatura .....	135
Gráfico 40 - Trecho 1 - BAKFAA com correção de temperatura .....	137
Gráfico 41 - Trecho 1 - revestimento com correção de temperatura .....	138
Gráfico 42 - Trecho 1 - camadas granulares com correção de temperatura .....	139
Gráfico 43 - Trecho 1 - subleito com correção de temperatura .....	139
Gráfico 44 - Trecho 2 - BAKFAA com correção de temperatura .....	141
Gráfico 45 - Trecho 2 - revestimento com correção de temperatura .....	142
Gráfico 46 - Trecho 2 - camadas granulares com correção de temperatura .....	143
Gráfico 47 - Trecho 2 - subleito com correção de temperatura .....	144
Gráfico 48 - Trecho 3 - BAKFAA com correção de temperatura .....	146
Gráfico 49 - Trecho 3 - revestimento com correção de temperatura .....	146
Gráfico 50 - Trecho 3 - camadas granulares com correção de temperatura .....	147
Gráfico 51 - Trecho 3 - subleito com correção de temperatura .....	148
Gráfico 52 - Módulos de resiliência inferidos antes e depois da correção da temperatura .....	150
Gráfico 53 - Comparativo dos módulos de resiliência dos revestimentos - BackMedina.....	152
Gráfico 54 - Comparativo dos módulos de resiliência das camadas granulares - BackMedina.....	153
Gráfico 55 - Comparativo dos módulos de resiliência dos subleitos - BackMedina.153	
Gráfico 56 - Comparativo dos módulos de resiliência dos revestimentos - BAKFAA .....	154
Gráfico 57 - Comparativo dos módulos de resiliência das camadas granulares - BAKFAA .....	154
Gráfico 58 - Comparativo dos módulos de resiliência dos subleitos - BAKFAA .....	155
Gráfico 59 – Tensões de tração na fibra inferior do revestimento .....	158
Gráfico 60 – Tensões de compressão no subleito .....	158
Gráfico 61 - Comparaçao das bacias de deflexão 3 - Trecho 1 .....	160

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	18
1.2	OBJETIVOS .....	19
1.2.1	Geral .....	19
1.2.2	Específicos.....	19
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>20</b>
2.1	CONSTITUIÇÃO DOS PAVIMENTOS .....	20
2.1.1	Camada de revestimento .....	23
2.1.2	Camadas de base, sub-base e reforço do subleito .....	25
2.1.3	Subleito .....	27
2.2	PARÂMETROS ELÁSTICOS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS .....	28
2.2.1	Módulo de resiliência.....	29
2.2.2	Coeficiente de Poisson.....	34
2.3	AVALIAÇÃO ESTRUTURAL NÃO DESTRUTIVA DE PAVIMENTOS .....	36
2.3.1	Ensaios empregados na avaliação deflectométrica não destrutiva .....	37
2.3.1.1	Viga Benkelman .....	38
2.3.1.2	<i>Falling Weight Deflectometer – FWD</i> .....	41
2.3.1.3	<i>Light Weight Deflectometer – LWD</i> .....	44
2.3.2	Bacias deflectométricas .....	45
2.3.3	Fatores que influenciam os valores de deflexão .....	47
2.3.3.1	Efeitos da temperatura nas medidas de deflexão .....	48
2.3.4	Mecanismos de ruptura de pavimentos.....	51
2.4	RETROANÁLISE DE BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS .....	52
2.4.1	Valores típicos de módulos de resiliência obtidos por retroanálise .....	55
2.4.2	Programas de retroanálise de módulo de resiliência .....	56
2.4.2.1	BackMedina .....	58
2.4.2.2	BAKFAA.....	60
2.4.3	Adaptações necessárias para a utilização do BackMedina e BAKFAA .....	62
2.4.3.1	Escolha do método de adaptação do carregamento.....	65
2.4.4	ELSYM5 .....	68

2.4.5	Fatores de influência na retroanálise .....	70
2.4.5.1	Aderência entre camadas do pavimento.....	72
2.5	MODELOS DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS.....	75
2.5.1	Vida de fadiga .....	76
2.5.2	Deformação permanente.....	77
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>80</b>
3.1	DESCRIÇÃO DA PESQUISA.....	80
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO ESTUDADO .....	80
3.2.1	Trecho 1 .....	82
3.2.2	Trecho 2 .....	83
3.2.3	Trecho 3 .....	84
3.3	LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS COM VIGA BENKELMAN .....	85
3.4	RETROANÁLISES .....	87
3.4.1	Retroanálise utilizando o <i>software</i> BackMedina.....	88
3.4.2	Retroanálise utilizando o <i>software</i> BAKFAA .....	90
3.5	CORREÇÃO DAS BACIAS DE DEFLEXÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA .....	92
3.6	VERIFICAÇÃO DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA E ANÁLISE DE TENSÕES PELO SOFTWARE AEMC .....	94
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>96</b>
4.1	ADAPTAÇÃO DE CARREGAMENTOS VIGA BENKELMAN PARA FWD...96	
4.2	RETROANÁLISE DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA.....	98
4.2.1	Módulos de resiliência retroanalisados pelo BackMedina .....	98
4.2.1.1	Trecho 1 .....	98
4.2.1.2	Trecho 2.....	102
4.2.1.3	Trecho 3.....	105
4.2.2	Módulos de resiliência retroanalisados pelo BAKFAA.....	108
4.2.2.1	Trecho 1 .....	108
4.2.2.2	Trecho 2.....	112
4.2.2.3	Trecho 3.....	114
4.2.3	Comparação entre os diferentes <i>softwares</i> .....	118
4.2.3.1	Trecho 1 .....	118
4.2.3.2	Trecho 2.....	119
4.2.3.3	Trecho 3.....	120
4.3	CORREÇÃO DAS DEFLEXÕES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA .....	122

4.3.1	Módulos de resiliência retroanalisados pelo BackMedina a partir das bacias corrigidas em função da temperatura.....	123
4.3.1.1	Trecho 1.....	124
4.3.1.2	Trecho 2.....	128
4.3.1.3	Trecho 3.....	132
4.3.2	Módulos de resiliência retroanalisados pelo BAKFAA a partir das bacias corrigidas em função da temperatura.....	136
4.3.2.1	Trecho 1.....	136
4.3.2.2	Trecho 2.....	140
4.3.2.3	Trecho 3.....	144
4.3.3	Influência da correção das deflexões em função da temperatura .....	148
4.4	<b>INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO DE ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS .....</b>	151
4.4.1	Módulos de resiliência retroanalisados pelo BackMedina .....	152
4.4.2	Módulos de resiliência retroanalisados pelo BAKFAA.....	154
4.4.3	Efeito da aderência entre camadas no estado de tensões dos pavimentos	
	157	
4.5	AVALIAÇÃO DAS RETROANÁLISES.....	159
4.6	ANÁLISE DE VIDA ÚTIL .....	161
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>164</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>167</b>
	<b>ANEXO A – PLANILHA DE ENSAIO DA VIGA BENKELMAN PARA OS TRECHOS 1, 2 E 3 .....</b>	<b>177</b>
	<b>APÊNDICE A – CORREÇÃO DAS DEFLEXÕES MEDIDAS PARA A TEMPERATURA DE REFERÊNCIA DE 20°C.....</b>	<b>179</b>
	<b>APÊNDICE B – DIFERENÇA PERCENTUAL DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA APÓS A CORREÇÃO DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS.....</b>	<b>182</b>
	<b>APÊNDICE C – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE MÓDULOS DE RESILIÊNCIA ANTES E APÓS A CORREÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....</b>	<b>185</b>
	<b>APÊNDICE D – ANÁLISE DE TENSÕES DOS TRECHOS .....</b>	<b>187</b>
	<b>APÊNDICE E – COMPARAÇÃO ENTRE BACIAS DE DEFLEXÃO MEDIDAS EM CAMPO E CALCULADAS PELO SOFTWARE AEMC .....</b>	<b>189</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das finalidades de um pavimento urbano é proporcionar conforto e segurança aos que por ele trafegam em qualquer época do ano e em quaisquer condições climáticas e, para isso, o usuário não deve ser exposto a pavimentos defeituosos. Existem dificuldades na manutenção das boas condições de rodagem nas ruas de uma cidade, sendo um desafio tanto para as prefeituras municipais que têm o dever de garantir uma trafegabilidade adequada aos cidadãos, quanto para os usuários das vias que muitas vezes transitam por trechos com pavimentos defeituosos e inseguros. A dificuldade de se conservar vias urbanas em condições adequadas de uso vem do seu estado de carregamento em função do tráfego de veículos e das condições ambientais e climáticas, que acarretam em irregularidades e defeitos nas pistas.

A qualidade das condições de rodagem de pavimentos urbanos é fundamental para o desenvolvimento de uma cidade. Muitos são os casos de obras de pavimentação que apresentam problemas prematuros em relação às expectativas de projeto, principalmente em pavimentos sujeitos a condições climáticas adversas e com elevado volume de tráfego, comprometendo o conforto e a segurança do tráfego, além de aumentar os custos de operação dos veículos. Réus, Silva e Fontenele (2014) apontam a necessidade da produção de pesquisas que aproximem as condicionantes de projetos à realidade de campo, a fim de determinar estruturas bem dimensionadas que suportem as solicitações do tráfego, apresentando comportamento estrutural adequado às perspectivas do período de projeto. Já Preussler (2007) sugere a realização de estudos de controle tecnológico visando à análise de quais são as causas do aparecimento de defeitos e irregularidades em pistas pavimentadas através da avaliação do comportamento estrutural das suas camadas. Porém, este controle muitas vezes não fornece subsídios suficientes para a avaliação das propriedades mecânicas de todos os estratos dos pavimentos.

É importante que se estude o comportamento estrutural em campo dos pavimentos observando se as premissas de projeto são atendidas (PREUSSLER, 2007). Para que isso seja possível, além da composição do tráfego, as espessuras das camadas e os parâmetros elásticos dos materiais constituintes devem ser

analisados sob uma abordagem mecanística, estimando as respostas estruturais pelo cálculo de tensões, deformações e deslocamentos gerados na estrutura. Com a investigação do comportamento da relação tensão deformação dos materiais que compõe uma estrutura de pavimento pode-se estimar os esforços gerados pelo tráfego e obter as propriedades mecânicas destes materiais. Bueno (2016) afirma que uma ferramenta de cálculo amplamente empregada para estas estimativas é a Teoria da Elasticidade, porém deve-se lembrar de que os materiais utilizados em pavimentação são muitas vezes heterogêneos, anisotrópicos e com descontinuidades, podendo não apresentar respostas elásticas.

Uma forma de manter o controle tecnológico de estruturas de pavimentos existentes e obter os parâmetros elásticos dos materiais evitando a coleta de amostras é o processo de retroanálise a partir de ensaios deflectométricos. Estes ensaios são feitos por equipamentos com metodologias não destrutivas de carregamento estático ou dinâmico que tentam simular as solicitações impostas pelo tráfego. Estes equipamentos permitem a averiguação dos níveis de deflexões sofridos pelas estruturas devido aos carregamentos, além de possibilitar a avaliação da resistência e da deformabilidade das camadas dos pavimentos através da análise de módulos de resiliência retroanalisados (PREUSSLER, 2007). Dentre os equipamentos utilizados para a determinação de deflexões e controle tecnológico das camadas dos pavimentos podem-se mencionar a viga Benkelman, o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), o *Light Weight Deflectometer* (LFWD) e o ensaio de carga estática sobre placa para a avaliação da deformabilidade.

Os equipamentos mais utilizados para avaliação deflectométrica no Brasil são a viga Benkelman, usada desde o século passado, e atualmente o FWD. Balbo (2007) considera a metodologia de ensaio da viga Benkelman questionável uma vez que a precisão da leitura dos deslocamentos pode apresentar problemas sistemáticos de acuidade visual e problemas grosseiros no posicionamento do equipamento e na anotação de resultados. Já o FWD é capaz de aplicar um carregamento sobre a pista similar as cargas de rodas em movimento, gerando deslocamentos próximos aos reais, entretanto é um equipamento sofisticado com custo inicial elevado e onerosa manutenção e calibração.

Na restauração de pavimentos já existentes e até mesmo no dimensionamento de novas estruturas, as técnicas de obtenção dos módulos de resiliência por retroanálise e a possibilidade do cálculo de tensões e deformações

através de softwares trouxeram novas possibilidades para os projetistas, suprindo as antigas metodologias puramente empíricas. Entretanto, a obtenção dos módulos de resiliência das camadas de uma estrutura de pavimento ainda é um processo que depende da experiência do projetista e dos parâmetros elásticos utilizados nos softwares.

Atualmente centros de pesquisas rodoviárias tendem a utilizar métodos de dimensionamento mecanísticos-empíricos, tendo como base estudos analíticos e experimentais que levam em conta as condições das solicitações dinâmicas impostas aos pavimentos e os efeitos climáticos. Medina e Motta (2015) afirmam que nos casos de reforços de pavimentos existentes o uso de métodos mecanísticos-empíricos é crucial para um dimensionamento eficaz, uma vez que o simples aumento das espessuras das camadas de revestimento pode não ser uma solução adequada, podendo ser necessário um redimensionamento da estrutura como um todo.

Um método mecanístico-empírico para projetos de reforços requer a análise não só dos valores máximos de deflexões sofridas pelos pavimentos, mas também a investigação das bacias de deflexões de toda a extensão estudada. Além disso, um projeto de reforço necessita de técnicas de retroanálise para a obtenção dos módulos de resiliência dos materiais das camadas e cálculos de tensões nos trechos, sendo que as soluções encontradas podem não ser apenas o aumento da espessura do revestimento, mas ações combinadas, como fresagem ou reciclagem, que podem gerar resultados satisfatórios e econômicos (MEDINA E MOTTA, 2015).

O desempenho de um pavimento depende de um complexo conjunto de fatores, como o tráfego atuante, o meio ambiente em que a via está inserida e as propriedades físicas e mecânicas das camadas que o constitui. A análise e entendimento das propriedades de um pavimento é essencial para o seu projeto e manutenção, pois diferentes tipos de materiais e diferentes espessuras de camadas determinam a distribuição de tensões e consequentemente o comportamento a fadiga e ao acúmulo de deformações plásticas (VASSOLER; CHONG; SPECHT, 2011).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O crescimento populacional nas cidades acarreta em um aumento da frota de veículos e das solicitações de tráfego, o que torna a infraestrutura viária alvo de atenção e preocupação no que diz respeito ao seu estado de conservação. Assim, é necessário estudar e adotar metodologias que avaliem a qualidade das vias de acordo com os seus aspectos estruturais e do ambiente onde está inserida. Fazendo uso de metodologias não destrutivas de avaliação de capacidade de carga e também de programas de análise elástica de camadas de pavimentos, é possível a investigação da condição estrutural de vias urbanas existentes.

O desempenho de um pavimento ao longo da sua vida em serviço depende do comportamento mecânico das camadas que o constituem, quando submetidas aos efeitos das ações do tráfego e do clima. Destaca-se, assim, a importância do estudo das propriedades mecânicas das camadas dos pavimentos em relação ao seu comportamento estrutural, em particular as deflexões recuperáveis e seus módulos de resiliência. Com a avaliação racional destas estruturas e com o emprego de análises mecanísticas-empíricas, torna-se viável o estudo dos parâmetros que influenciam as respostas mecânicas das estruturas, como a temperatura dos revestimentos e as condições de aderência entre as interfaces das camadas, possibilitando a análise de tensões e deformações dos pavimentos urbanos e também a previsão da sua vida útil.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Geral

Avaliar a estrutura de três vias urbanas distintas do município de Joinville através da estimativa de módulos de resiliência por retroanálise com base em resultados de ensaios de campo com o uso da viga Benkelman, adaptados para programas de análise mecanística.

### 1.2.2 Específicos

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa apresentam-se os seguintes objetivos específicos.

- Avaliar metodologias de conversão das condições de carregamento do ensaio de viga Benkelman para FWD a fim da utilização dos seus resultados em programas de retroanálise;
- Obter os módulos de resiliência dos materiais que compõem as camadas dos pavimentos através de retroanálise por dois diferentes softwares de análise elástica;
- Corrigir as deflexões medidas em campo para uma temperatura padrão, fazer sua retroanálise e comparar com os módulos de resiliência sem correção de temperatura;
- Avaliar o impacto que a condição de aderência entre camadas gera nos módulos de resiliência retroanalisados;
- Validar os módulos de resiliência retroanalisados comparando as bacias de deflexão medidas em campo e as bacias teóricas geradas pelo software AEMC;
- Estimar a vida útil de fadiga e de deformação permanente dos pavimentos estudados.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 CONSTITUIÇÃO DOS PAVIMENTOS

Um pavimento é uma estrutura constituída por várias camadas de diferentes materiais e com diferentes espessuras onde geralmente os estratos mais próximos à superfície tendem a apresentar materiais mais nobres. Normalmente são construídos sobre uma superfície final de terraplenagem e têm como propósito resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e ao clima, assegurando boas condições de rolamento, com conforto, segurança e economia aos usuários (BERNUCCI *et al.*, 2008).

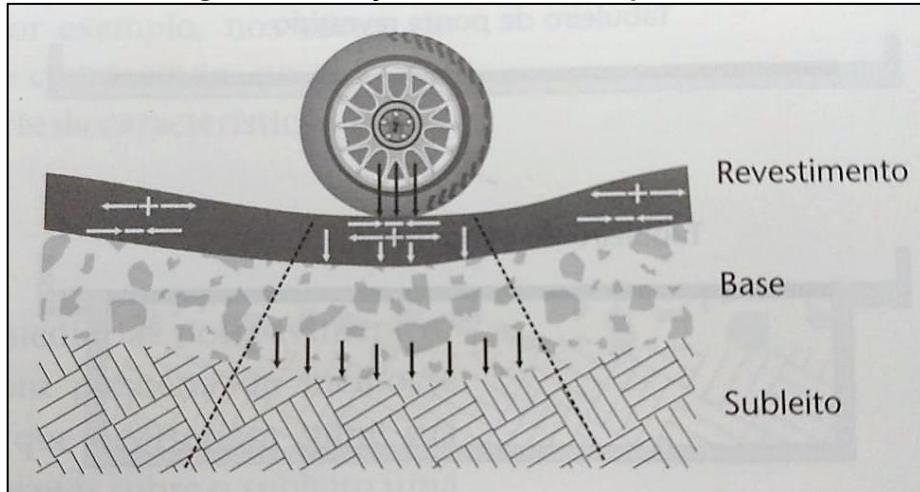
Balbo (2007) aponta uma terminologia consagrada em estudos rodoviários das camadas que compõe uma estrutura de pavimento, são elas: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito, onde este último é considerado a fundação. O autor também afirma que, dependendo do caso, o pavimento pode não possuir camada de sub-base ou de reforço subleito, entretanto a existência de revestimento e subleito são condições mínimas para que a estrutura possa ser chamada de pavimento.

Os pavimentos são destinados, de acordo com Medina e Motta (2015), a resistir e distribuir os esforços verticais produzidos pelo tráfego, melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança dos usuários e a resistir aos esforços horizontais, tornando-o mais durável. Historicamente o objetivo da pavimentação de estradas era melhorar as ruas de terra fazendo com que fossem protegidas da ação da água e do desprendimento de pedras e poeira. Ainda segundo os mesmos autores as primeiras estradas de solo argiloso se enlameavam em decorrência da chuva, assim passaram a ser cobertas com cascalhos e saibros e, posteriormente, passaram a ser revestidas com macadame ou pedra brita, dando uma perspectiva de como funcionaria o sistema de camadas de pavimentos da atualidade.

De acordo com Balbo (2007), estruturalmente os pavimentos recebem e transmitem cargas de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, que normalmente são menos resistentes. Este processo de transmissão de esforços visa otimizar o desempenho de um pavimento de modo a evitar defeitos decorrentes de

grandes deformações. Todas as partes que compõe este tipo de estrutura devem trabalhar deformações compatíveis com sua natureza e capacidade de suporte de maneira que os processos de ruptura não aparecem precocemente. A Figura 1 mostra como as camadas que compõe o pavimento transmitem os esforços do tráfego para as camadas inferiores.

**Figura 1 - Esforços em camadas do pavimento**

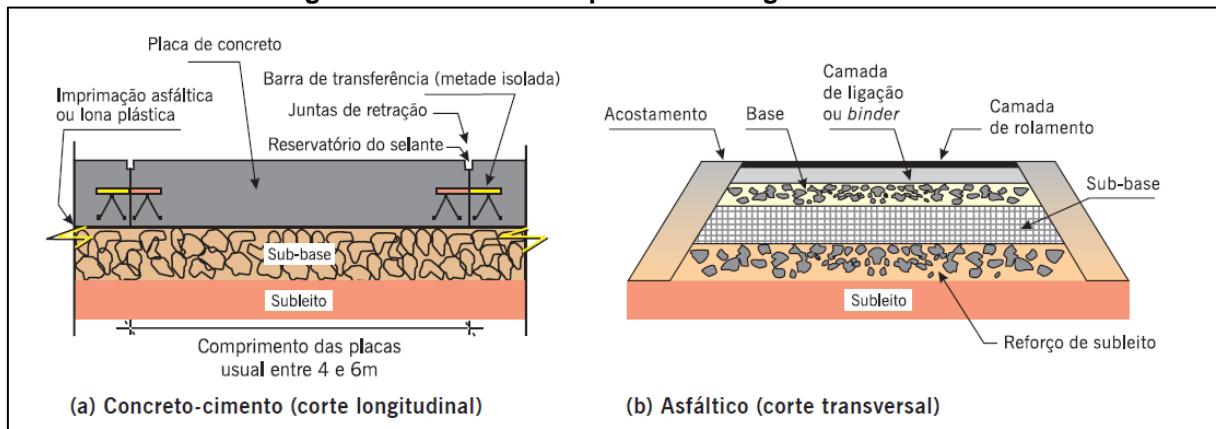


**Fonte:** Balbo (2007).

Para o projeto e construção de uma estrutura de pavimento devem ser considerados o tipo de material que será utilizado em cada uma das camadas constituintes e o carregamento ao qual esta estrutura estará submetida. Assim, a relação entre tensão e deformação do conjunto de materiais constituintes de todas as camadas é importante, pois permitem o estabelecimento de um modelo de cálculo real (MACHADO, 2012).

Bernucci *et al.* (2008) e Yoder e Witczak (1975) apontam que, tradicionalmente, os pavimentos são classificados em dois tipos, os rígidos ou de concreto e os flexíveis ou asfálticos. Os pavimentos rígidos são compostos por placas de concreto que têm a sua espessura fixada em função da resistência à flexão das placas e sua estrutura contém uma sub-base, como mostra a Figura 2 (a). Já os pavimentos flexíveis têm seu revestimento composto por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos, além disso, a sua estrutura é formada por uma base, uma sub-base e, quando necessário, uma camada de reforço do subleito, mostrados na Figura 2 (b).

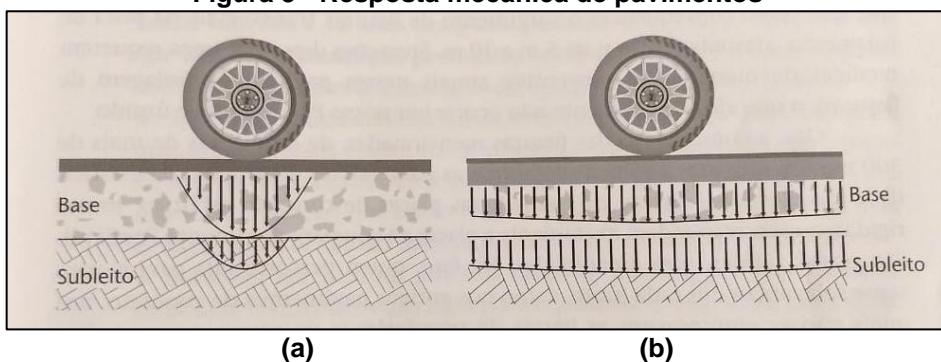
**Figura 2 - Camadas dos pavimentos rígido e flexível**



Fonte: Bernucci et al. (2008)

Contudo, tanto no meio profissional quanto no acadêmico, há quem conteste esta terminologia baseada no tipo de revestimento empregado no pavimento. Balbo (2007) e Yoder e Witczak (1975) apontam uma maneira alternativa quanto às nomenclaturas das estruturas baseada na forma como cada qual distribui os esforços sobre si aplicados no subleito. Se uma carga atuante impõe um campo de tensões muito concentrado nas proximidades do seu ponto de aplicação, o pavimento é chamado de flexível, como mostra a Figura 3 (a), já um pavimento rígido é representado por um campo de tensões mais disperso, independente do material de revestimento, proporcionando menores magnitudes de esforços verticais sobre o subleito, como mostra a Figura 3 (b).

**Figura 3 - Resposta mecânica de pavimentos**



Fonte: Balbo (2007).

Os pavimentos têm como função atender os requisitos técnicos de natureza funcional e estrutural. A funcionalidade de um pavimento pode ser definida como a “capacidade de permitir o movimento de veículos entre dois pontos sob condições de segurança e conforto ao usuário, com velocidade compatível ao padrão da rodovia e custos operacionais baixos” (PREUSSLER, 2007, p. 6).

Já a condição estrutural do pavimento está relacionada às cargas impostas e a capacidade de suporte das camadas constituintes e do subleito às condições de tráfego e do meio. Portanto, o bom desempenho estrutural de um pavimento está ligado à capacidade de manter sua estrutura íntegra por determinado período de tempo, sem apresentar defeitos significativos (PREUSSLER, 2007).

Todas as camadas de um pavimento têm uma ou mais funções específicas para que proporcionem ao usuário da via as condições adequadas de rolamento e de suporte em qualquer condição climática. Os requisitos técnicos de um pavimento são atendidos com um projeto apropriado da sua estrutura, onde cada estrato trabalha de maneira conjunta e compatível com as cargas solicitantes.

### 2.1.1 Camada de revestimento

É a camada que recebe diretamente as cargas dos veículos e a ação do clima, assim deve ser tanto quanto possível impermeável e resistente às solicitações causadas entre o contato pneu-pavimento, que variam de acordo com a carga e velocidade dos veículos. A maioria dos pavimentos no Brasil utiliza como revestimento uma mistura de agregados minerais com ligantes asfálticos que garantem os requisitos de impermeabilidade, estabilidade, flexibilidade, durabilidade e resistência à derrapagem, à fadiga e ao trincamento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O revestimento recebe as cargas estáticas e dinâmicas impostas pelo tráfego, não podendo sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de materiais, ou ainda perda de compactação, portanto necessita ser composta por materiais bem aglutinados e dispostos de maneira a evitar sua movimentação horizontal. Alguns materiais que possibilitam essas condições são os blocos pré-moldados de concreto, paralelepípedos, concreto compactado com rolo e as misturas asfálticas (BALBO, 2007).

Bernucci *et al.* (2008) comentam sobre a dificuldade de se caracterizar os materiais que compõem uma estrutura de pavimento devido a diversos fatores, como meio ambiente, estado de tensões, magnitude dos materiais, entre outros. Especificamente nas misturas asfálticas dos revestimentos, esta complexidade de avaliação é aumentada pelo envelhecimento gradativo do ligante devido a sua oxidação. Assim, a caracterização requer um equilíbrio apropriado entre rigor e praticidade, já que nem todas as variáveis podem ser levadas em consideração simultaneamente. Contudo, dois parâmetros mecânicos importantes para a

caracterização dos revestimentos são a sua resistência à tração, ou seja, a tensão máxima suportada pelo material, e o módulo de resiliência, capacidade do revestimento retornar ao seu estado original quando cessado o carregamento.

As expressões “camada de rolamento” e “camada de ligação” são usuais em revestimentos compostos por diferentes tipos de materiais. Para Balbo (2007) estas subdivisões dos revestimentos em duas ou mais camadas ocorre por razões técnicas, construtivas e de custo. A Tabela 1 faz algumas distinções entre as possíveis camadas de revestimento de acordo com a terminologia empregada no meio rodoviário.

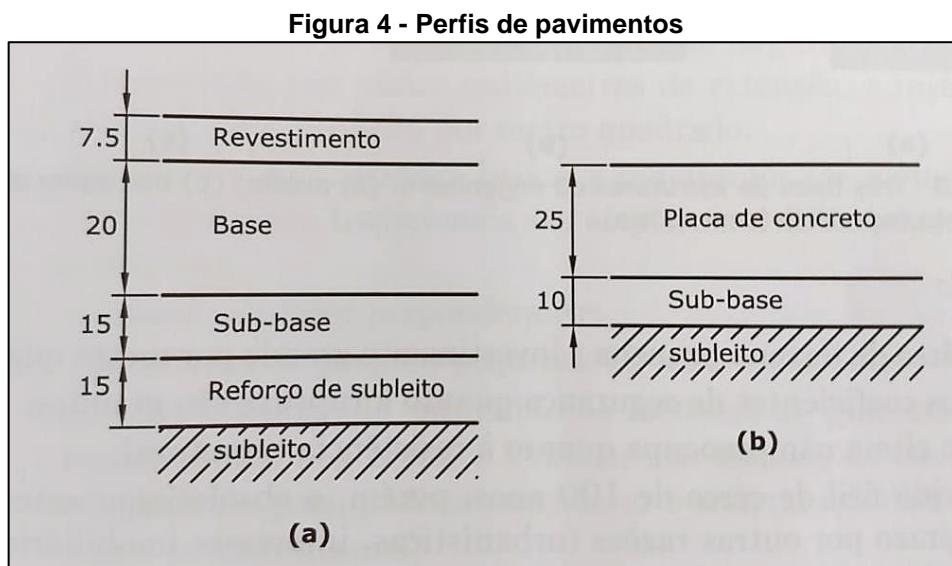
**Tabela 1 - Termos aplicáveis à camada de revestimento asfáltico**

Designação do revestimento	Definição	Associações
Camada de rolamento	Camada superficial do pavimento, diretamente em contato com as cargas e com ações climáticas	Camada de desgaste, capa de rolamento, revestimento
Camada de ligação	Camada intermediária, também em mistura asfáltica, entre a camada de rolamento e a base	Camada de <i>binder</i> ou simplesmente <i>binder</i>
Camada de nivelamento	Primeira camada de mistura asfáltica empregada em reforços, cuja função é nivelar o perfil do greide para posterior execução de nova camada de rolamento	Camada de reperfilagem ou simplesmente reperfilagem
Camada de reforço	Nova camada de reforço executadas por razões funcionais, estruturais ou ambas	Recape ou recapeamento

**Fonte:** adaptado de Balbo (2007).

Medina e Motta (2015) definem que existem duas categorias de pavimentos que se diferenciam pelo seu revestimento, o pavimento flexível e o rígido. O primeiro é constituído por revestimento asfáltico sobre base granular ou de solo estabilizado granulometricamente, já o segundo apresenta revestimento de placas de concreto de cimento *Portland* assentes sobre o subleito ou sub-base intermediária, como

mostra a Figura 4 (a) e (b). Os autores ainda explicam que quando há uma base cimentada sobre o revestimento betuminoso trata-se de um pavimento semirrígido.



Fonte: Medina e Motta (2015).

Assim, quando o revestimento é de concreto asfáltico a estrutura é chamada de pavimento asfáltico ou betuminoso e quando o revestimento é de concreto de cimento *Portland* a estrutura é chamada de pavimento de concreto. Esta nomenclatura se justifica historicamente, pois o pavimento flexível seria aquele que a ruptura era o afundamento resultante das deformações permanentes, já o pavimento rígido a ruptura era o trincamento pela repetição das deformações elásticas (MEDINA E MOTTA, 2015).

### 2.1.2 Camadas de base, sub-base e reforço do subleito

O comportamento estrutural de um pavimento depende da espessura e rigidez de cada camada, bem como da interação entre elas. Estas diferentes camadas devem resistir aos esforços solicitantes e transferi-los aos estratos subjacentes. Bernucci *et al.* (2008) apontam que no caso de pavimentos com revestimento de concreto as camadas granulares são chamadas de sub-base e reforço do subleito, já em pavimentos com revestimento asfáltico as camadas granulares são a base, sub-base, e o reforço do subleito. Dependendo do volume de tráfego, do tipo de revestimento (flexível ou rígido) e da capacidade de suporte do subleito, uma ou mais destas camadas intermediárias podem ser suprimidas.

Balbo (2007) indica que quando uma camada granular se torna muito espessa na tentativa de cumprir sua função, é conveniente dividi-la em dois estratos, a base e a sub-base, facilitando questões construtivas e gerando economia financeira. As bases e sub-bases são empregadas em estruturas de pavimentos com o intuito de aliviar as pressões sofridas pelas camadas de solo inferiores, e desempenham também um papel importante na drenagem subsuperficial.

Medina e Motta (2015) afirmam que é comum a utilização de macadames hidráulicos e secos, solo-brita, lateritas, e britas graduadas como camadas de base e sub-base em pavimentos no Brasil. A este respeito, Balbo (2007) declara:

As bases podem ser constituídas por solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concretos, etc. Para as sub-bases, podem ser utilizados os mesmos materiais citados para o caso das bases. (p. 38).

Quando há um subleito composto por solo de pequena resistência aos esforços verticais impostos pelo tráfego é necessário executar uma camada de solo de melhor qualidade que sirva de reforço à camada de fundação subjacente. De acordo com Balbo (2007) a camada de reforço do subleito não é obrigatória, uma vez que espessuras maiores das camadas de base e sub-base poderiam aliviar as pressões sobre o subleito, entretanto a utilização de solo de reforço pode implicar em menores custos na execução das camadas superiores.

Para a escolha dos materiais granulares utilizam-se métodos de seleção e de caracterização de propriedades. A seleção visa averiguar a disponibilidade dos materiais quanto às características das propriedades geotécnicas no estado compactado para que possam ser empregados na estrutura dos pavimentos. De maneira geral, os materiais granulares na pavimentação devem ser compactados para que sejam resistentes pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com a sua função na estrutura (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A caracterização e seleção dos materiais a serem empregados nestas camadas são feitas por tecnologias tradicionais pautadas na distribuição granulométrica, na resistência, forma e durabilidade dos grãos. Bernucci *et al.* (2008) apontam que a utilização de materiais granulares com presença de finos não é usual na construção de pavimentos, pois essas frações finas reduzem a permeabilidade e

rigidez dos materiais e aumentam a sua deformabilidade e expansão volumétrica, gerando redução de resistência.

No que diz respeito às propriedades mecânicas dos materiais de base, sub-base e reforço do subleito para o dimensionamento de estruturas de pavimentos, é comum a utilização do Índice de Suporte Califórnia (CBR) e do Módulo de Resiliência (MR). O CBR foi concebido na década de 1920 para avaliar o potencial de ruptura das camadas granulares através de ensaio de penetração de um cilindro padronizado em uma amostra, já o módulo de resiliência, em pavimentação, indica uma propriedade básica do material e pode ser utilizada na análise macanística de sistemas de múltiplas camadas, sendo um parâmetro aceito internacionalmente para caracterizar materiais de pavimentação (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O conhecimento do comportamento resiliente dos materiais granulares é fator principal na modelagem elástica linear das camadas de base, sub-base e reforço do subleito. Macedo (1996) afirma que os módulos de resiliência das camadas granulares, em relação aos esforços impostos pelo tráfego, são definidos por curvas tensão-deformação não lineares, ou seja, o estado de tensões das camadas pode variar de acordo com as propriedades dos materiais.

### 2.1.3 Subleito

É o terreno de fundação do pavimento, onde os esforços sofridos sobre sua superfície serão aliviados em sua profundidade, segundo Balbo (2007) normalmente estas pressões se dispersam no primeiro metro, portanto as camadas superiores devem receber maiores atenções. O subleito pode ser constituído por materiais naturais consolidados ou compactados e, geralmente, este material é o solo da região em questão.

Por se tratar da última camada da estrutura de um pavimento que irá finalizar o processo de alívio de tensões, as principais preocupações com este estrato se dão com as questões climáticas. Medina e Motta (2015) salientam, por exemplo, que a água da chuva pode chegar ao subleito através de acostamentos não revestidos, por infiltração em trincas, juntas mal vedadas, poros de superfície envelhecida e pela não interceptação de drenos.

Outros fatores importantes a se considerar em relação ao ambiente em que o subleito está inserido são os lençóis freáticos e os gradientes de temperatura. A oscilação dos lençóis d'água devido às chuvas pode acarretar na variação da

umidade dos solos deixando-os mais instáveis, já se o pavimento estiver localizado em regiões com grandes variações térmicas a movimentação de água em forma de vapor pode ser elevada, possibilitando a condensação deste vapor sob o revestimento (MEDINA E MOTTA, 2015).

O comportamento dos subleitos, assim como os materiais granulares, não apresenta linearidade na relação tensão-deformação. Medina e Motta (2015) atestam que o módulo de resiliência das camadas de fundação depende da constituição mineralógica, textura e arranjo das partículas do solo, massa específica e umidade, e também das tensões impostas ao estrato.

Para que o subleito atinja valores desejáveis de resistência e de módulo de resiliência os solos devem ser compactados, pois com diferentes níveis de densificação o comportamento mecânico dos estratos se adequam ao carregamento imposto pelo tráfego. Balbo (2007) aponta a importância de estudos prévios dos solos que irão compor o subleito ou outras camadas, assim, com levantamentos geotécnicos, se podem obter às características de resistência e módulo de resiliência em laboratório, parâmetros que suportam um projeto de pavimentação.

## 2.2 PARÂMETROS ELÁSTICOS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Motta (1991) afirma que os métodos mecanísticos de dimensionamento de estruturas de pavimentos fazem uso da análise de tensões e deformações em suas camadas, sendo que o cálculo destes parâmetros serve para a interpretação do desempenho da estrutura. A análise da deformabilidade de uma estrutura vincula-se com a relação tensão-deformação e os módulos de resiliência dos materiais que compõe os estratos.

O conhecimento e compreensão das propriedades mecânicas dos materiais que compõe uma estrutura de pavimento são necessárias a fim de se garantir níveis aceitáveis de deformações. Estas propriedades podem ser verificadas por ensaios laboratoriais que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço, levando em consideração a natureza e duração das cargas aplicadas. Bueno (2016) aponta que performances ruins de alguns projetos podem ser atribuídas às incertezas das propriedades dos materiais que constituem as camadas do pavimento.

Na engenharia de pavimentos os dois parâmetros mais usuais para descrever de maneira macanística um material são o módulo de elasticidade (módulo de Young) e o coeficiente de Poisson. Medina e Motta (2015) afirmam que Francis Hveem, precursor dos estudos de deformabilidade de pavimentos, preferiu utilizar o termo módulo de resiliência para tratar de deformações elásticas em pavimentos, tendo como argumento que as deformações nessas estruturas são muito maiores que os sólidos elásticos de concreto ou de aço.

### 2.2.1 Módulo de resiliência

Desde a década de 1920 o parâmetro Índice de Suporte Califórnia, CBR na sigla em inglês, era utilizado no dimensionamento de pavimentos e na caracterização dos materiais que o compõe. Este ensaio envolve uma aplicação lenta e por um grande período de tempo de uma tensão crescente, causando grandes deslocamentos. Entretanto, este estado de tensões não corresponde aos efeitos das ações impostas pelo tráfego que geralmente são repetidas e de curta duração, com intensidades variadas e com diferentes frequências (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Já no final da década de 1930, devido aos impactos negativos das rupturas causadas por cargas repetidas, iniciaram-se pesquisas sobre deslocamentos verticais decorrentes do tráfego em pistas pavimentadas. A estes deslocamentos dá-se o nome de deflexão, termo aplicado para movimentos verticais passageiros em pavimentos sujeitos à carga de rodas. Depois que a aplicação do carregamento cessa, parte deste deslocamento é permanente, ou não recuperável, e parte é resiliente, ou recuperável (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Uma das constantes elásticas mais empregadas e pesquisadas na análise de sistemas de camadas é o módulo de resiliência (MR) dos materiais de pavimentação. Balbo (2007, p. 227) define o MR como “a capacidade de o material não resguardar deformações depois de cessada a ação da carga”. O autor ainda mostra que a determinação dos MR dos materiais pode ser feita de duas maneiras: em laboratório ou em campo (retroanálise), mas sempre levando em consideração um regime de trabalho de respostas elásticas, fora de zonas de intensa plastificação.

Bernucci *et al.* (2008) recomendam o uso do módulo de resiliência dos materiais no dimensionamento de pavimentos, em substituição ao método do CBR, pois o MR indica uma propriedade básica dos materiais, que pode ser utilizada na

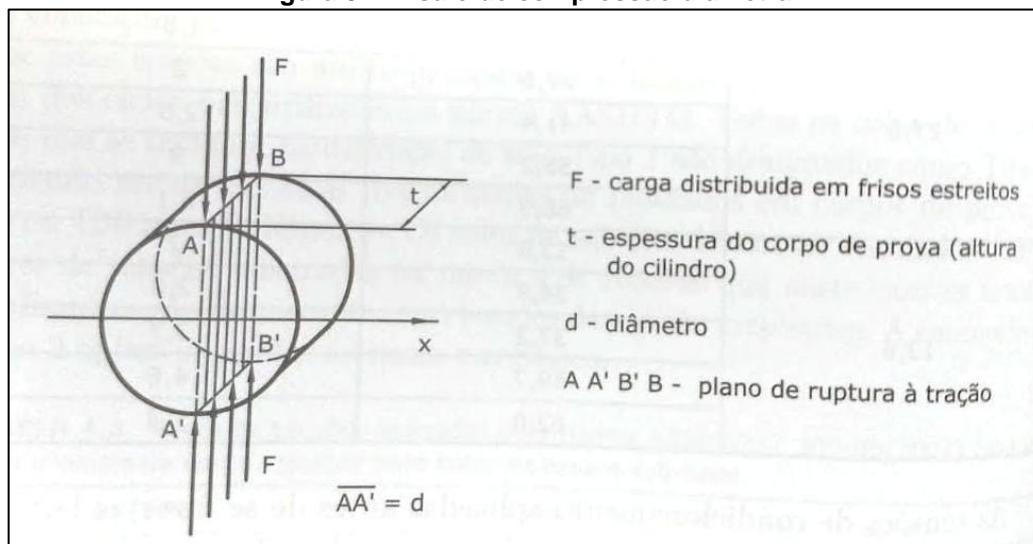
análise mecanística de sistemas de múltiplas camadas. Além disso, o dimensionamento através do MR é um método reconhecido internacionalmente por existirem diferentes técnicas de se fazer sua estimativa, tanto em laboratório como em campo, com ensaios não destrutivos.

O módulo de resiliência é um parâmetro que pode ser obtido através de testes de cargas repetidas e serve para caracterizar os materiais de um pavimento, ou seja, o comportamento resiliente dos solos e das camadas do pavimento é função das cargas aplicadas (PINTO; PREUSSLER, 2002). O MR é um dos principais elementos na metodologia de projeto de pavimentos flexíveis e auxilia a compreensão do comportamento das misturas asfálticas (KARAMI *et al.*, 2018, tradução nossa).

Medina e Motta (2015, p. 178) definem que “o termo resiliente significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões”. Os ensaios utilizados para a obtenção dos MR 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 diametal e o ensaio triaxial de carga repetida.

O ensaio de compressão diametal de carga repetida foi desenvolvido no Brasil em 1943, servindo para a obtenção da resistência à tração indireta de corpos de prova cilíndricos de concreto. A Figura 5 esquematiza o funcionamento do ensaio. Este ensaio é utilizado para a determinação dos módulos de resiliência de revestimentos asfálticos através da relação entre tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametal vertical de uma amostra cilíndrica e a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada. Após seu surgimento amostras de solos coesivos estabilizados com cimento ou cal foram ensaiadas à compressão diametal e, desde a década de 1980, este ensaio tem sido empregado no Brasil para medir a resistência a tração indireta das misturas asfálticas (MEDINA E MOTTA, 2015).

**Figura 5 - Ensaio de compressão diametral**



Fonte: Medina e Motta (2015).

Já o ensaio triaxial de cargas repetidas foi idealizado na década de 1950 por H. Bolton Seed da Universidade da Califórnia e é utilizado para a obtenção dos módulos de resiliência de solos e materiais granulares (MEDINA E MOTTA, 2015). Foi definido que o módulo de resiliência é a razão entre a tensão desvio e a deformação recuperável, mostrada na Equação 1, adaptada de Motta (1991). Os valores deste parâmetro podem ser obtidos por ensaios em campo ou em laboratório como, por exemplo, o ensaio triaxial de carga repetida onde se aplica uma tensão vertical pulsante de duração preestabelecida (tensão desvio) e uma tensão confinante constante em uma amostra de solo (MOHAMMAD *et al.*, 2014, tradução nossa).

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon} \quad (1)$$

Onde:

MR – módulo de resiliência;

$\sigma_d$  – tensão desvio repetida;

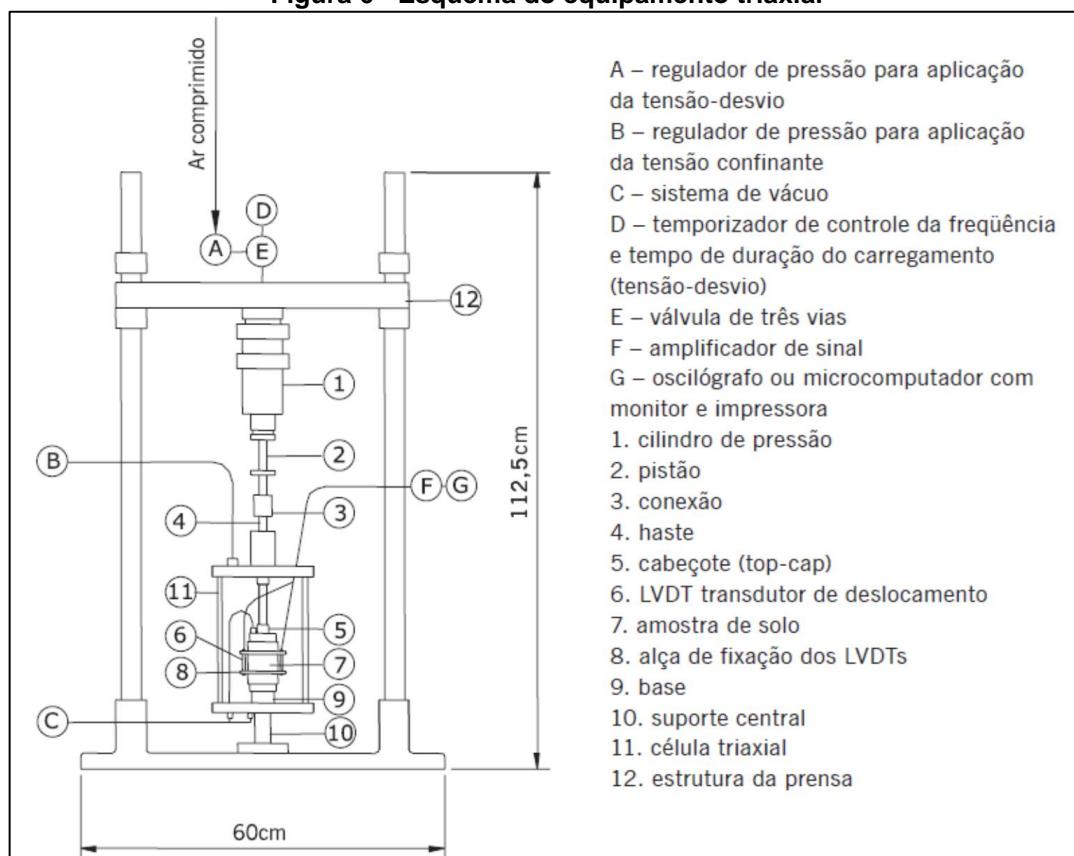
$\varepsilon$  – deformação elástica ou resiliente correspondente a um certo número de aplicações de  $\sigma_d$ .

O método para a realização do ensaio triaxial é o definido pela AASHTO em que as tensões são aplicadas sob a amostra por determinado período de tempo e em diversos ciclos. Esta metodologia se aplica nos dias atuais e também pode ser chamada de ensaio triaxial cíclico. Nguyen e Mohajerani (2016, tradução nossa)

mencionam este método como padrão, onde são repetidos 16 ciclos para cada uma das 18 cargas aplicadas, que representam uma ampla variedade de carregamento de tráfego, entretanto, os autores mostram em seu trabalho que apenas 5 ciclos são necessários para a obtenção de um módulo de resiliência que represente o material. O mesmo preconiza a norma brasileira DNIT 134 (2017), onde se aplicam no mínimo 10 ciclos de 18 cargas diferentes, porém só se utilizam 5 ciclos para a obtenção das deformações específicas.

A Figura 6 mostra um esquema do primeiro equipamento de ensaios triaxiais de carga repetida da Universidade Federal do Rio de Janeiro de 1977.

**Figura 6 - Esquema do equipamento triaxial**

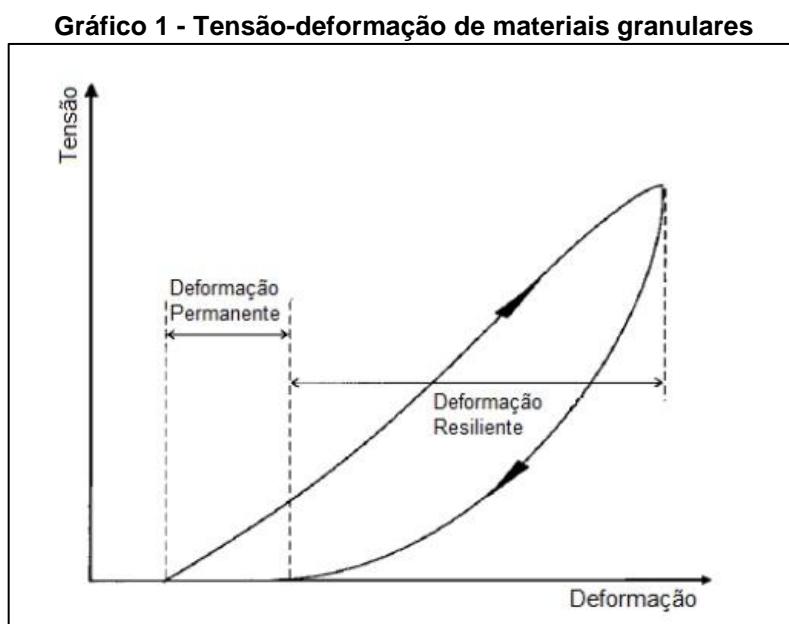


**Fonte:** Medina e Motta (2015).

Uma maneira de se estimar com maior precisão os módulos de resiliência de um pavimento foi proposta por Kakuda, Parreira e Fabbri (2010) que desenvolveram um equipamento de grandes dimensões para a obtenção das deformações das estruturas de pavimentos. Com este equipamento pode-se simular uma pequena seção que imita o pavimento em estudo e, por retroanálise, é possível a obtenção do

MR das camadas, sendo que este MR se aproxima de maneira satisfatória ao encontrado em campo.

No que diz respeito a camadas granulares, é recorrente a modelagem dos MR de maneira elástica linear. Entretanto, Yoder e Witczak (1975) apontam como definitiva a teoria de que os módulos das camadas granulares são caracterizados por curvas tensão-deformação correspondentes a relações não lineares. As deformações provenientes de um carregamento são caracterizadas convenientemente por uma deformação recuperável e uma deformação permanente, conforme o Gráfico 1, mostrando o comportamento elástico não linear destes materiais.



Yoder e Witczak (1975) propõem modelos que permitem o cálculo dos MR de materiais granulares em função de seus estados de tensões. Estes modelos são representados pelas Equações 2 e 3. Já Macedo (1996) traz um modelo muito difundido que também é utilizado para a obtenção de MR de camadas de solos, expresso pela Equação 4.

$$MR = k_1 * \theta^{k2} \quad (2)$$

$$MR = k_1 * \sigma_3^{k2} \quad (3)$$

$$MR = k_1 * \sigma_3^{k2} * \sigma_d^{k3} \quad (4)$$

Onde:

$\theta$  – somatório de tensões principais =  $\sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$ ;

$\sigma_d$  – tensão de desvio;

$\sigma_1$  – tensão principal maior;

$\sigma_3$  – tensão confinante;

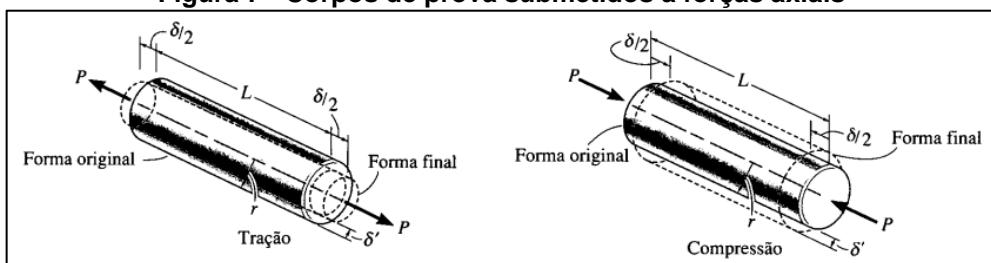
$k_1, k_2$  e  $k_3$  – constantes obtidas em laboratório.

Os módulos de resiliência de todos os materiais empregados em estruturas de pavimentos podem ser obtidos por ensaios laboratoriais, desde os solos de subleito e materiais granulares de bases e sub-bases que podem ser alcançados através do ensaio triaxial cíclico, até as camadas compostas por misturas asfálticas que têm seus módulos obtidos pelo ensaio de compressão diametral. Entretanto, em pavimentos existentes, a prática mais corriqueira para a determinação dos módulos de resiliência dos materiais é através da interpretação das bacias deflectométricas causadas por carregamentos de ensaios não destrutivos (FERNANDES JR., 1994).

## 2.2.2 Coeficiente de Poisson

Um corpo deformável quando submetido a uma força axial se deforma tanto longitudinalmente quanto lateralmente. Hibbeler (2004) exemplifica com a Figura 7, onde um corpo de prova com raio  $r$  e comprimento  $L$  sujeito a uma força  $P$  muda de comprimento na porção  $\delta$  e seu raio na porção  $\delta'$ .

**Figura 7 - Corpos de prova submetidos a forças axiais**



Fonte: Hibbeler (2004).

As deformações na direção longitudinal e na direção radial são dadas, respectivamente, pela Equação 5:

$$\epsilon_{long} = \frac{\delta}{L} \quad \text{e} \quad \epsilon_{lat} = \frac{\delta'}{r} \quad (5)$$

No início do século XIX, o francês S. D. Poisson constatou que as deformações  $\delta$  e  $\delta'$  são proporcionais, sendo assim a razão entre elas é uma constante. Esta constante foi chamada de coeficiente de Poisson e todo material homogêneo e isotrópico tem um valor de coeficiente associado. O coeficiente de Poisson é expresso pela Equação 6, onde o sinal negativo é usado devido ao alongamento longitudinal (deformação positiva) provocar contração lateral (deformação negativa) e vice-versa (HIBBELER, 2004).

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{long}} \quad (6)$$

Onde:

$\nu$  – coeficiente de Poisson;

$\varepsilon_{lat}$  – deformação latitudinal sofrida pelo corpo de prova, durante aplicação de uma força axial;

$\varepsilon_{long}$  – deformação longitudinal imposta ao material.

Balbo (2007) afirma que o conhecimento do coeficiente de Poisson é necessário para as análises de sistemas de camadas elásticas, entretanto, na atualidade, não é comum a realização de ensaios para a obtenção deste parâmetro visto que cada material apresenta uma faixa de valores já analisados por estudos anteriores. O mesmo autor ainda traz valores típicos de coeficientes de Poisson para alguns materiais de pavimentação, mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Valores típicos de coeficiente de Poisson**

Material	Faixa de variação
Concreto asfáltico	0,32 – 0,38
Concreto de cimento Portland	0,15 – 0,20
BGS, MH, BC	0,35 – 0,40
CCR, BGTC	0,15 – 0,20
SC, SMC	0,20 – 0,30
SCA	0,25 – 0,30
Solos arenosos	0,30 – 0,35
Areias compactadas	0,35 – 0,40
Solos finos	0,40 – 0,45

**Fonte:** adaptado de Balbo (2007).

## 2.3 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL NÃO DESTRUTIVA DE PAVIMENTOS

A caracterização da estrutura de um pavimento consiste na determinação dos materiais e espessuras de cada camada, bem como a averiguação das suas condições de integridade por meio de parâmetros estruturais, como as medidas de deformações. Balbo (2007) define a expressão avaliação estrutural como:

a caracterização completa de elementos e variáveis estruturais dos pavimentos que possibilite uma descrição objetiva de seu modo de comportamento em face das cargas do tráfego e ambiente, de modo a possibilitar a emissão de julgamento abalizado sobre a capacidade portante de um pavimento existente diante as futuras demandas do tráfego. (p. 403).

Portanto, a caracterização de uma estrutura de pavimento é realizada pela determinação das deformações sofridas na superfície quando solicitada por uma carga conhecida. Juntamente com a avaliação visual da superfície do pavimento, a avaliação estrutural permite que conclusões sobre a integridade dos materiais das camadas subjacentes ao revestimento sejam obtidas.

A avaliação de uma estrutura de pavimento existente pode ser feita por métodos destrutivos, semidestrutivos e não destrutivos. Os ensaios destrutivos e semidestrutivos de prospecção são úteis quando se necessita de maiores informações sobre as camadas e suas espessuras e quando se desejam amostras para ensaios laboratoriais. Entretanto estas metodologias só podem ser empregadas em alguns poucos pontos das vias analisadas, uma vez que causam danos às estruturas (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Bernucci *et al.* (2008) afirmam que a avaliação mais adequada a ser feita em grandes extensões de pistas são as não destrutivas representadas pelas medidas de deflexão, pois possibilitam inúmeras repetições de análise no mesmo ponto permitindo o acompanhamento da variação da capacidade de carga com o tempo. Além disso, Macedo (1996) aponta a conveniência deste tipo de avaliação visto que os ensaios não destrutivos provocam menores interrupções no tráfego de veículos.

Os ensaios não destrutivos de avaliação de pavimentos permitem a análise dos deslocamentos verticais das pistas causados por um carregamento. Os deslocamentos são compostos por dois componentes, uma parcela elástica, também chamada de deflexão que é a principal medida para avaliar um pavimento estruturalmente, e uma parcela plástica que resulta em afundamentos de trilhas de rodas medida por uma treliça de alumínio com régua móvel. (BERNUCCI *et al.*,

2008). Fazendo a medida de vários deslocamentos elásticos a partir do ponto de aplicação de um carregamento obtém-se uma bacia de deflexão, ou ainda, uma linha de influência da carga sobre um ponto do pavimento (DNIT, 2010). O DER (2006) indica como um parâmetro avaliativo de um pavimento os segmentos homogêneos onde as deflexões não excedam 30% do seu valor médio.

### 2.3.1 Ensaios empregados na avaliação deflectométrica não destrutiva

Existe uma ampla variedade de equipamentos no mercado capazes de simular as condições de carregamento rodoviário, possibilitando a medição das deflexões sofridas pelos pavimentos. Bernucci *et al.* (2008) classificam estes equipamentos em três categorias: os de carregamento quase estático, como ensaio de placa e viga Benkelman, os de carregamento vibratório, como o dynaflect e os de carregamento por impacto, como o *falling weight deflectometer* – FWD.

Os equipamentos de carregamento quase estáticos medem as deflexões que os pavimentos sofrem em decorrência de um carregamento aplicado por um veículo que se desloca lentamente. Os equipamentos de carregamento vibratório aplicam uma carga dinâmica de regime permanente sobre a superfície do pavimento com determinada frequência, podendo ser utilizada para uma mesma carga diferentes frequências. Já os equipamentos de carregamento por impacto medem as deflexões dos pavimentos a partir de um pulso de carga gerado pela liberação de um peso elevado a determinada altura, onde este impacto pode ser variado pela alteração do conjunto de massas e pela altura de queda (GOMES; ALBERNAZ; FERNANDES, 2013).

Já Momm e Domingues (1996) classificam os mesmos equipamentos de medição de deflexão em cinco categorias: equipamentos estáticos, utilizados quando a carga é estática ou de baixa velocidade, como a viga Benkelman, equipamentos automáticos, que automatizam digitalmente o processo da viga Benkelman, equipamentos estáticos com carga dinâmica, onde a superfície passa por processo de vibração, equipamento por impulso, que lança um conjunto de massas a determinada altura sobre o pavimento, como o FWD e LWD, e equipamentos por propagação de onda, que medem as fases da propagação da onda de tensões e deformações.

Os equipamentos empregados nos ensaios de avaliação não destrutiva são úteis para o levantamento da condição de pavimentos para sistemas de gerência em

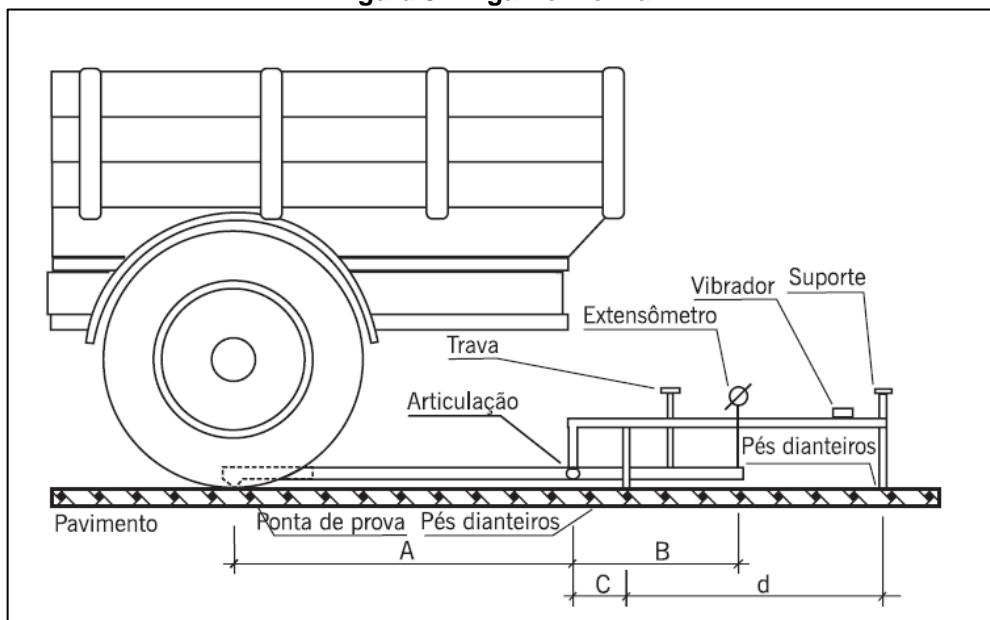
nível de rede e para análises de rotina ou projeto de reabilitação. Lembrando que existem diferenças entre os valores numéricos dos resultados de cada categoria de equipamento utilizado e que todos eles devem ser calibrados por processos específicos inerentes a cada tipo de carregamento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Bueno (2016) e Bernucci *et al.* (2008) afirmam que os equipamentos de medição de deflexão superficial de pavimentos mais utilizados no país são a viga Benkelman e o FWD, porém, mais recentemente, também se emprega a verão portátil deste último, o *light weight deflectometer* – LWD.

### 2.3.1.1 Viga Benkelman

A viga Benkelman é um “aparelho utilizado para medir deflexões produzidas em um extensômetro acionado por uma alavanca interfixa” (DNIT, 2010, p. 2). A viga Benkelman é composta de uma parte fixa apoiada por três pés reguláveis e uma viga móvel acoplada por uma articulação, como mostra a Figura 8, assim, uma extremidade fica em contato com o pavimento e a outra acionando um extensômetro com precisão de centésimos de milímetro, além disso, ela é equipada com um pequeno vibrador para evitar a inércia do ponteiro do extensômetro. O caminhão padronizado para este ensaio tem seu eixo simples com rodas duplas – ESRD com pneus calibrados à pressão de 0,56 MPa e carga de 80 KN no eixo traseiro (DNER, 1994).

**Figura 8 - Viga Benkelman**



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

O ensaio consiste em: colocar a ponta de prova da viga entre os pneus traseiros do caminhão carregado, fazer a leitura inicial de deslocamento vertical no extensômetro, afastar o caminhão lentamente até que o extensômetro não acuse mais variação da leitura e por fim fazer a leitura final do extensômetro. A Figura 9 apresenta um ensaio com viga Benkelman sendo realizado. A deformação elástica do pavimento, ou deflexão, é calculada pela diferença entre a leitura inicial e final do extensômetro, multiplicada por uma constante inerente as dimensões da viga (DNIT, 2010).

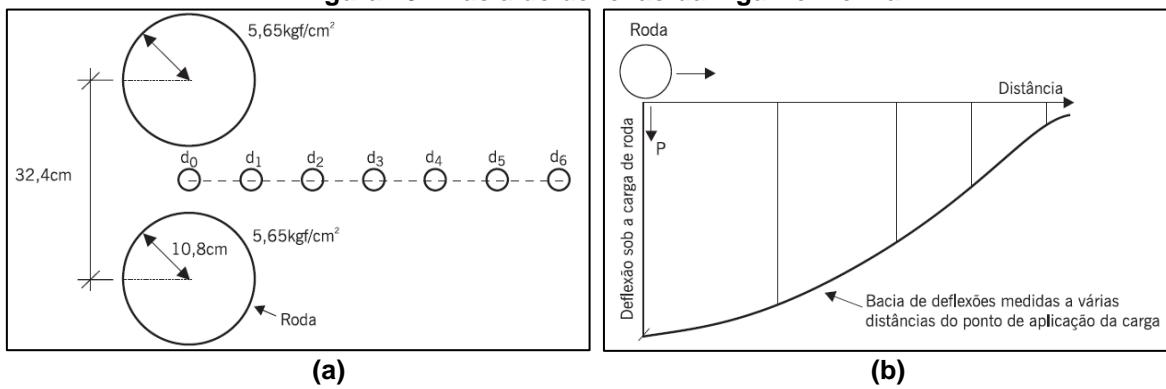
**Figura 9 - Ensaio com viga Benkelman**



**Fonte:** Salviano (2015).

Para uma melhor compreensão do comportamento estrutural do pavimento pode-se realizar, além da leitura sobre o carregamento, algumas leituras afastadas do ponto de carga, gerando uma bacia de deflexões, como mostra a Figura 10 (a) que representa os locais da leitura em planta e (b) o resultado da bacia defectométrica.

**Figura 10 - Bacia de deflexão da viga Benkelman**



Fonte: Bernucci et al. (2008).

Por ser um equipamento versátil e de simples operação, este teste de campo para avaliação de deflexões no pavimento é um dos mais utilizados por engenheiros e projetistas. Para Albernaz (1997) a necessidade de agilizar e reduzir os custos das verificações dos pavimentos através de provas de carga levou à substituição do ensaio de placa por um procedimento simples, onde o carregamento é feito com os próprios pneus de um caminhão carregado.

A utilização da viga Benkelman no Brasil iniciou-se nos anos 60 por iniciativa dos engenheiros Nestor José Aratangy e Francisco Bolivar Lobo Carneiro e hoje em dia, seu uso é normatizado pelo Departamento de Estradas de Rodagem e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (BORGES, 2001).

Com o decorrer do tempo algumas modificações foram feitas neste método com o intuito de melhorar a precisão e a velocidade do ensaio. Uma das melhorias foi a criação de uma versão chamada de viga eletrônica que é “capaz de fazer a medição automática da linha de influência através de cinco sensores verticais denominados LVDT, registrando automaticamente a temperatura da superfície do pavimento” (GOMES, 2012, p. 15).

Outra inovação em relação a este método e objetivando reduzir os custosos trabalhos de campo, é possível realizar uma modelagem computacional como ferramenta de cálculo. Esta metodologia foi empregada por Martínez e Piusseaut (2014, tradução nossa) em uma rodovia em Cuba. O autor utilizou os valores da carga exercida pelo tráfego, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a espessura das camadas do pavimento no software SIGMA/W e comparou os valores registrados em campo pela viga Benkelman, onde pôde verificar que o modelo computacional se aproximou das deformações medidas.

O ensaio com viga Benkelman pode apresentar erros, representados por diferenças entre o valor apurado e o valor verdadeiro do deslocamento medido. Segundo Balbo (2007) os erros podem ser aleatórios ou sistemáticos. Os erros aleatórios são aqueles que apresentam alterações aleatórias em relação ao valor real, decorrente de variações indeterminadas e imprevisíveis que não podem ser eliminados, apenas amenizados. Já os erros sistemáticos são aqueles que apresentam um desvio do valor medido em relação ao valor real de maneira constante, podendo ocorrer pela falta de calibração da viga, pela falta de controle da pressão dos pneus e da carga aplicada, ou ainda, por um método de observação inconsistente.

#### 2.3.1.2 *Falling Weight Deflectometer – FWD*

O FWD ou deflectômetro de impacto é um equipamento utilizado na determinação de deflexões recuperáveis na superfície do pavimento tendo em vista uma avaliação estrutural da condição do pavimento. Esta metodologia busca simular o efeito dinâmico de cargas de rodas em movimento. “Isto é obtido pela queda de um conjunto de massas, a partir de alturas pré-fixadas, sobre um sistema de amortecedores de borracha que transmitem a força aplicada a uma placa circular apoiada no pavimento” (DNER, 1996, p. 1). Na placa circular, mostrada na Figura 11, existe uma célula de carga que mede o impacto da queda do conjunto de massas. Este aparelho é montado sob um trailer que é puxado por um automóvel.

Este equipamento é totalmente automatizado, sendo rebocado por um veículo leve. O veículo também carrega um computador conectado aos sensores que fazem a aquisição dos dados deflectométricos. Como descreve a normatização, uma carga de impacto é aplicada na superfície da estrutura do pavimento e os deslocamentos verticais são lidos por vários sensores colocados ao longo de um suporte em posição convenientemente adequada para se obter uma bacia de deflexões, como mostra a Figura 12 (BERNUCCI *et al.*, 2008).

**Figura 11 - Placa circular do FWD**



Fonte: Salviano (2015).

**Figura 12 - Sensores do FWD**



Fonte: Bernucci et al. (2008).

Este tipo de avaliação da condição estrutural do pavimento tem a finalidade de testar o pavimento de maneira não destrutiva, tendo em vista obter valores de deformações conforme o carregamento do pneu de um veículo. Com estes

resultados é possível determinar o módulo de elasticidade, verificar a durabilidade e integridade do pavimento. Entretanto, vale ressaltar que apesar de apresentar os mesmos objetivos que a viga Benkelman, estes equipamentos se diferenciam pelo modo de aplicação da carga, o que resulta em deflexões diferentes na mesma estrutura, sendo que não existe uma correlação simples e universal entre as medidas realizadas por eles (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Bernucci *et al.* (2008) ainda destacam as principais vantagens do FWD, como acurácia nas medições, possibilidade de vários níveis de carga, ensaio não influenciável pelo operador e o registro automático dos dados levantados. Além disso, no meio comercial, a Solocap (2014) afirma que este equipamento se destaca pela maior produtividade e agilidade e pela adaptabilidade aos diversos tipos de pavimentos. Entretanto, existem algumas desvantagens como o seu custo e a necessidade de calibrações mais sofisticadas.

A versatilidade deste ensaio foi abordada por Suleiman, Gopalakrishnan e Kevern (2011, tradução nossa), onde os autores construíram um estacionamento com concreto permeável em duas espessuras diferentes sobre um subleito natural. O seu intuito foi comparar os resultados das deflexões nos pavimentos de concreto permeável com diferentes espessuras, com um pavimento de concreto tradicional. A conclusão foi que o pavimento de concreto permeável mais espesso sofre deflexões menores.

Os deflectômetros de impacto do tipo FWD vêm sendo incorporados ao meio rodoviário nacional desde a década de 80 e sua utilização tem sido crescente. Nos anos de 1990, Macedo (1996) apontava que o FWD era uma nova fase nos ensaios não destrutivos para avaliação estrutural de pavimentos asfálticos e de concreto e, hoje em dia, continuam sento fundamentais para o controle de qualidade durante a execução de pavimentos.

Os dados de deformação obtidos pelo ensaio do FWD também são utilizados na análise estrutural das condições dos pavimentos e em projetos de reabilitação de vias. A utilização de softwares de elementos finitos torna possível a avaliação empírico-mecanicista de pavimentos existentes, como mostram Sarker e Tutumluer (2016, tradução nossa) que obtiveram dados de deflexão de estradas de Illinois e propuseram um método capaz de recomendar valores de espessuras de novos revestimentos que sobreponem os antigos.

### 2.3.1.3 Light Weight Deflectometer – LWD

Também existe o LWD ou deflectômetro de peso leve, também chamado de deflectômetro de impacto ligeiro é um sistema de ensaio dinâmico de placa de carga que mede a capacidade de suporte das camadas da infraestrutura do pavimento através da deformação da sua superfície. É um dispositivo emergente na avaliação da qualidade de camadas compactadas (MAZARI *et al.*, 2016, tradução nossa). Este tipo de equipamento surgiu na década de 1990 como uma ferramenta de análise utilizando uma carga dinâmica, mas em um formato ligeiro, induzindo a uma aplicação menor de forças sobre a superfície do pavimento. Estas características o tornam um equipamento de fácil transporte e de baixo custo (LOPES, 2010).

O LWD é um equipamento portátil e de precisão que fornece diretamente dados impressos de deflexão e módulo de resiliência, podendo atingir até 2000 MPa. A deflexão recuperável avaliada é provocada por um golpe de uma massa de 10, 15 ou 25 kg, dependendo do modelo do equipamento, que cai de uma altura constante sobre uma placa de 30 cm de diâmetro, tal impacto gera deformações na superfície em estudo. As propriedades avaliadas são detalhadas e mostradas através de um gráfico, podendo ser impresso *in loco*, com resultados em milímetros (SANTOS, 2014).

Lopes (2010) afirma que o LWD é útil na avaliação estrutural de pavimentos durante sua execução, uma vez que a dimensão do equipamento e a sua forma de funcionamento permitem a realização de ensaios sem interferir com os trabalhos. O autor também aponta uma desvantagem devido a pouca capacidade de carga de aplicação do equipamento, mas que ainda permite caracterizar bases granulares e sondar estradas de baixo volume de tráfego.

O Módulo de Resiliência de uma estrutura de pavimento também pode ser estimado através das deflexões obtidas pelo ensaio do LWD, como mostram Mousavi, Gabr e Borden (2017, tradução nossa). Os autores realizaram os ensaios de LWD em algumas seções teste de uma pista na Carolina do Norte, com o intuito de monitorar a variação dos módulos do subleito e, paralelamente, fizeram ensaios laboratoriais de Módulo de Resiliência das mesmas seções teste. Contudo, concluíram que a predição do Módulo de Resiliência apenas pela

análise do ensaio de campo não é satisfatório, mas uma abordagem conjunta dos dados de laboratório e de campo pode mostrar valores significativos.

Não existe uma padronização do LWD, assim existem inúmeros fabricantes deste equipamento que utilizam diversas metodologias para a obtenção da deflexão superficial de pavimentos. Apesar da existência de diferentes tipos deste equipamento, a sua finalidade é a mesma, porém, a não padronização acaba gerando resultados diferentes de instrumento para instrumento (STAMP; MOONEY, 2013, tradução nossa).

Assim como o FWD, o LWD é um ensaio de carga dinâmica, onde a força é aplicada através de uma energia potencial que gera impacto na superfície do pavimento, diferente da viga Benkelman que é um ensaio de carga estática, onde a força é aplicada sobre a superfície gradativamente com a passagem dos pneus de um caminhão. Guzzarlapudi, Adigopula e Kumar (2016, tradução nossa) fazem a comparação entre estes métodos distintos e concluem que o ensaio de LWD fornece resultados mais confiáveis na avaliação estrutural de pavimentos.

Por se tratar de uma aplicação de carga pontual sobre uma superfície, Grasmick *et al.* (2015, tradução nossa) apontam que o ensaio de LWD resulta em dados pouco satisfatórios. Para contornar esta situação, os autores sugerem a inclusão de sensores radiais ao centro de aplicação da carga com o intuito de tornar o ensaio mais parecido com o FWD e para enriquecer os dados resposta. Com esta técnica, eles conseguiram uma melhor estimativa da rigidez da camada de subleito.

### 2.3.2 Bacias deflectométricas

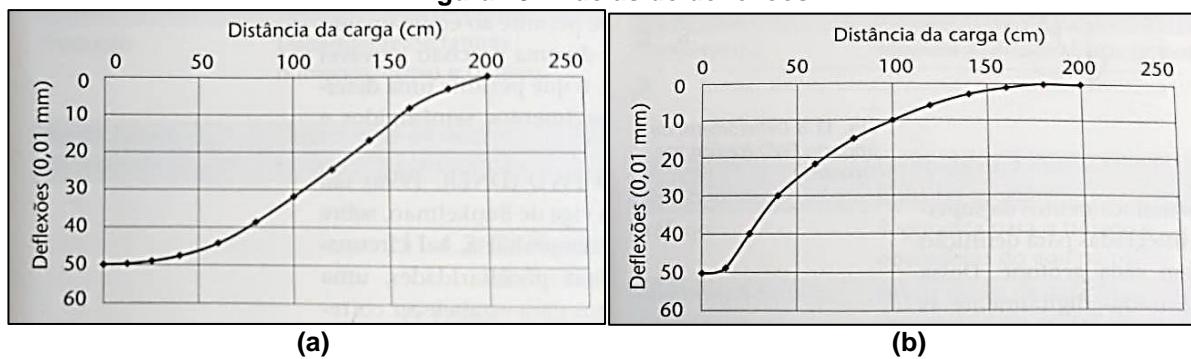
O controle de qualidade durante os procedimentos de execução de um pavimento deve se basear em critérios relacionados aos parâmetros usados no seu dimensionamento, assegurando que seu comportamento seja adequado. “O desempenho de um material depende de sua rigidez e, portanto, é interessante controlar-se em campo o comportamento quanto à deformabilidade, ou seja, controlar os deslocamentos elásticos frente à ação de cargas” (PREUSSLER, 2007, p. 25).

Durante a análise das características dos materiais para a construção e restauração de pavimentos, alguns pontos devem ser levados em consideração para

que se garanta um produto final adequado, para que defeitos não surjam em curto prazo e para que os desgastes sejam minimizados. Um destes parâmetros é a bacia de deflexões, exemplificada anteriormente na Figura 10, que consiste na medição de deslocamentos verticais sofridos pelo pavimento em posições mais afastadas do local de carregamento.

Balbo (2007) afirma que nos anos de 1950 era comum a utilização de valores únicos de deflexão, porém a partir da década de 1960, passou-se a dar mais valor à análise de deflexões como um todo, ou seja, considerando toda a bacia de deflexões. Os valores máximos de deflexão exprimem as respostas dos pavimentos quando submetidos a um carregamento, entretanto estes valores não são capazes de explicar com clareza o comportamento estrutural de uma estrutura de pavimento. Como, por exemplo, a Figura 13 (a) que apresenta uma bacia com deflexão máxima de 50 centésimos de milímetro e denota uma boa distribuição de esforços sobre as camadas inferiores, uma vez que há uma redução gradual das deflexões com o afastamento da carga.

**Figura 13 - Bacias de deflexões**



Fonte: Balbo (2007).

Já a Figura 13 (b) apresenta um ponto de inflexão de maneira mais brusca logo após um pequeno afastamento do ponto de carregamento, revelando um pavimento que concentra a reação da carga em uma área muito próxima ao ponto de aplicação da mesma. Sendo assim, apesar de as bacias apresentarem o mesmo valor de deflexão máxima, a segunda denota um comportamento mais flexível em comparação com a primeira (BALBO, 2007).

Devido ao tráfego o pavimento é submetido a forças exercidas pelos carros acarretando em tensões que por sua vez originam deflexões. Segundo Borges (2001) existem diversos equipamentos deflectométricos capazes de gerar dados de bacias de deflexão que permitem a caracterização mecânica dos materiais, definição

da capacidade estrutural do pavimento, estimativa de vida útil, detecção de vazios sob placas de concreto em pavimentos rígidos, entre outros. As técnicas de avaliação e controle de qualidade se baseiam tanto na rigidez quanto na densidade das camadas de pavimentos que podem ser medidas por diversos equipamentos (KUMAR; ADIGOPULA; GUZZARLAPUDI, 2017, tradução nossa).

Outra forma de se fazer a caracterização mecânica de um pavimento é através de softwares que estimam as deformações sofridas em decorrência das tensões de tráfego, ou seja, um programa faz o cálculo das bacias deflectométricas dos pavimentos de acordo com o seu estado de tensões. Um exemplo é o ELSYM5 que calcula tensões, deformações e deslocamentos em sistemas de camadas lineares. Silva *et al.* (2011) fizeram a utilização deste programa em uma via de Viçosa - MG tendo como dados de entrada a carga exercida por um eixo carregado aplicada no pavimento, coeficientes inerentes aos materiais das camadas e diferentes pressões nos pneus, assim, puderam estimar as tensões e deflexões sofridas pela via.

Portanto, as bacias de deflexão são uma das respostas obtidas pelas metodologias não destrutivas de avaliação estrutural de pavimentos. Como afirma Santos (2014), para o alcance dos valores das deflexões recuperáveis máximas e bacias de deflexão da superfície e das camadas do pavimento e do subleito, devem ser utilizados equipamentos deflectométricos através da realização de ensaios *in loco*, não destrutivos.

### 2.3.3 Fatores que influenciam os valores de deflexão

As medidas de deflexões são fatores de grande importância para a avaliação estrutural de um pavimento. Por serem coletadas na pista sob as condições de campo estas deflexões retratam a realidade no instante do ensaio, portanto existe a influência de fatores externos que podem modificar os valores dos deslocamentos verticais, não representando as condições globais da estrutura do pavimento (BUENO, 2016).

Rocha Filho (1996) afirma que os fatores ambientais são os que mais influenciam as medidas deflectométricas obtidas pelos equipamentos. Mesmo que o carregamento utilizado para a aquisição das deflexões seja o mesmo não se pode esperar que os valores obtidos se repitam em períodos diferentes, uma vez que existem alguns fatores que influenciam nos deslocamentos verticais, como

temperatura e umidade, além do modo do carregamento, confiabilidade e acurácia do equipamento.

A temperatura afeta diretamente o comportamento da camada asfáltica pela variação da viscosidade do ligante betuminoso, uma vez que as misturas asfálticas apresentam comportamento viscoelástico. A rigidez dos revestimentos é fortemente influenciada pelo gradiente de temperatura, quando ela diminui o ligante se torna mais viscoso e consequentemente a camada mais rígida, aumentando a capacidade de distribuição de carga, diminuindo a magnitude das deflexões (ROCHA FILHO, 1996).

Já no que diz respeito aos efeitos da sazonalidade, Ullidtz (1987, apud Rocha Filho, 1996) aponta que em estações chuvosas o teor de umidade do subleito pode aumentar, causando a diminuição da sua capacidade de suporte. Os níveis de deflexões dependem das características de todas as camadas que constituem o pavimento, porém o subleito é responsável pela maior parcela da resistência de estrutura. Assim, a capacidade de suporte da camada de subleito varia com a umidade e, como esta varia com o decorrer do ano, os deslocamentos não são constantes durante todo o ano.

### 2.3.3.1 Efeitos da temperatura nas medidas de deflexão

Como já abordado, uma estrutura de pavimento é composta por um sistema de camadas e por um subleito onde cada material destas camadas possui propriedades distintas e variáveis. Zheng, Zhang e Liu (2017, tradução nossa) afirmam que principalmente os revestimentos asfálticos são sensíveis à temperatura e suas propriedades e desempenho sofrem alterações devido às variações de gradientes térmicos, portanto as respostas às cargas de tráfego serão diferentes em diferentes temperaturas dos pavimentos. Assim, os mesmos autores asseguram que a avaliação estrutural de um pavimento feita através de bacias de deflexão medidas em campo não seria consistente, uma vez que existem variações nas temperaturas dos pavimentos.

A rigidez das misturas asfálticas é muito suscetível a mudanças de temperatura, sejam elas ocorridas em grandes períodos de tempo, como as alterações sazonais, ou em curtos períodos, como nas mudanças diurnas. O aumento da temperatura dos pavimentos causa o aumento das deflexões medidas, desde que outros fatores permaneçam os mesmos, ou seja, as deflexões medidas

no verão quente são maiores que as deflexões medidas em épocas de temperaturas mais amenas. Portanto, dada a influência da temperatura no comportamento das estruturas de pavimento, é importante conhecer esta temperatura ao medir a deflexão, seja por meio de termopares, seja pelo uso de modelos de previsão de temperaturas (MINHOTO *et al.*, 2005, tradução nossa).

Um modelo de previsão de temperatura utilizado no Brasil é o proposto por Medina (1989) que realizou medições sistemáticas de temperaturas de pavimentos brasileiros, objetivando verificar a influência deste fator nas deflexões sofridas pelas estruturas. O autor desenvolveu equações que preveem a temperatura superficial dos pavimentos em função da temperatura do ar, para cada região do Brasil. Na região Sul, por exemplo, a previsão de temperatura dos revestimentos é dada pela Equação 7.

$$T_{rev} = -0,03 + 1,31T_{ar} \text{ (°C)} \quad r = 0,89 \quad (7)$$

Onde:

$T_{rev}$  – temperatura na superfície do revestimento;

$T_{ar}$  – temperatura do ar.

Tendo em vista que as medições das deflexões são realizadas em diferentes temperaturas, é necessário considerar a correção para uma única temperatura de referência, trazendo-as para uma condição padrão. Foi o que fizeram Pais *et al.* (2018, tradução nossa), que desenvolveram um modelo mecanístico para o ajuste das deflexões obtidas por FWD para uma temperatura de referência de 20°C. Os autores elaboraram o coeficiente (DR) que multiplicado pelos valores de deflexão medidos em campo gera uma deflexão corrigida. O coeficiente é expresso pela Equação 8 que considera, além da temperatura do pavimento no momento do ensaio, o afastamento entre o ponto de carga e o ponto da leitura, a rigidez do subleito e a espessura da camada de revestimento.

$$DR = (-0,346 - 3,957 \times 10^{-3}(T-20)d) * (-0,2112 + 2,318 \times 10^{-3}(T-20)\log(H)) * (49,37 + 2,006 \times 10^{-3}(T-20)E) * ((8,021 \times 10^{-5})T^2 - 0,01342T + 0,5136) \quad (8)$$

Onde:

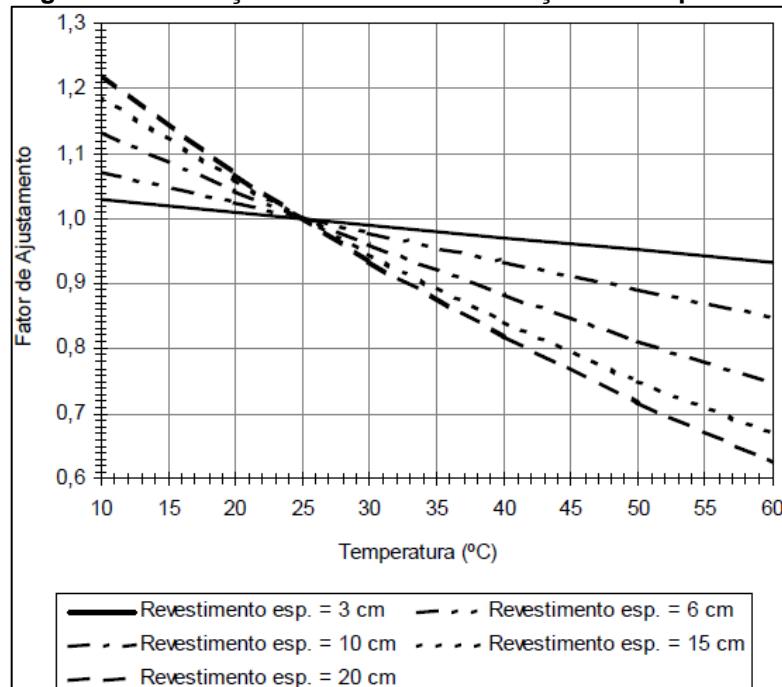
DR – razão de deflexão;

T – temperatura do pavimento;

- d – afastamento da leitura em relação ao carregamento;  
 H – espessura da camada de revestimento;  
 E – módulo de elasticidade do subleito.

Outros autores também propõem metodologias capazes de corrigir bacias deflectométricas em relação à temperatura do pavimento. Como, por exemplo, o DER – SP (2006) que, com o objetivo de uniformizar as leituras de deflexão para uma temperatura de referência de 25°C, apresentam esta correção através de um fator de ajuste obtido pelo ábaco mostrado na Figura 14.

**Figura 14 - Correção de deflexões em função da temperatura**



**Fonte:** DER (2006).

Este ábaco pode ser expresso pela Equação 9, que já resulta nas deflexões corrigidas.

$$D_{25} = \frac{D_p}{\left( \left( \frac{h_{ca}}{1000} \right) * (T-25) + 1 \right)} \quad (9)$$

Onde:

- $D_{25}$  – deflexão corrigida para uma temperatura de 25°C ( $\times 10^{-2}\text{mm}$ );  
 $D_p$  – deflexão medida em campo ( $\times 10^{-2}\text{mm}$ );  
 $h_{ca}$  – espessura da camada asfáltica (cm);  
 $T$  – temperatura da superfície do pavimento (°C).

Outros autores como Johnston (2001) e Kim, Hibbs e Lee (1995) fazem diferentes proposições para correção de bacias deflectométricas em relação a diferentes temperaturas de referência. Entretanto, existem questionamentos quanto à necessidade da correção completa das bacias, uma vez que, o comportamento térmico dos revestimentos asfálticos influencia apenas as deflexões medidas nos primeiros pontos de leitura, ou seja, medidas feitas mais próximas ao carregamento. Assim, uma maneira de manter a integridade dos valores obtidos nos ensaios de campo é fazer uso das deflexões sem correção, ou também corrigir os próprios módulos de resiliência retroanalisados, como fez Johnston (2001, apud Bueno, 2016).

#### 2.3.4 Mecanismos de ruptura de pavimentos

As estruturas de pavimentos geralmente não apresentam ruptura súbita, e sim uma deterioração gradual dos seus aspectos funcionais e estruturais a partir da abertura ao tráfego. Bernucci *et al.* (2008) afirmam que os defeitos observados em vias pavimentadas decorrem do carregamento imposto pelo tráfego:

Os defeitos estruturais resultam especialmente da repetição das cargas e vinculam-se às deformações elásticas ou recuperáveis e plásticas ou permanentes. As deformações elásticas [...] são responsáveis pelo surgimento da maioria dos trincamentos ao longo da vida do pavimento, e que podem levar à fadiga do revestimento. As deformações plásticas são acumulativas durante os anos de vida de um pavimento e resultam em defeitos do tipo afundamento localizado ou em trilhas de rodas. (p. 442).

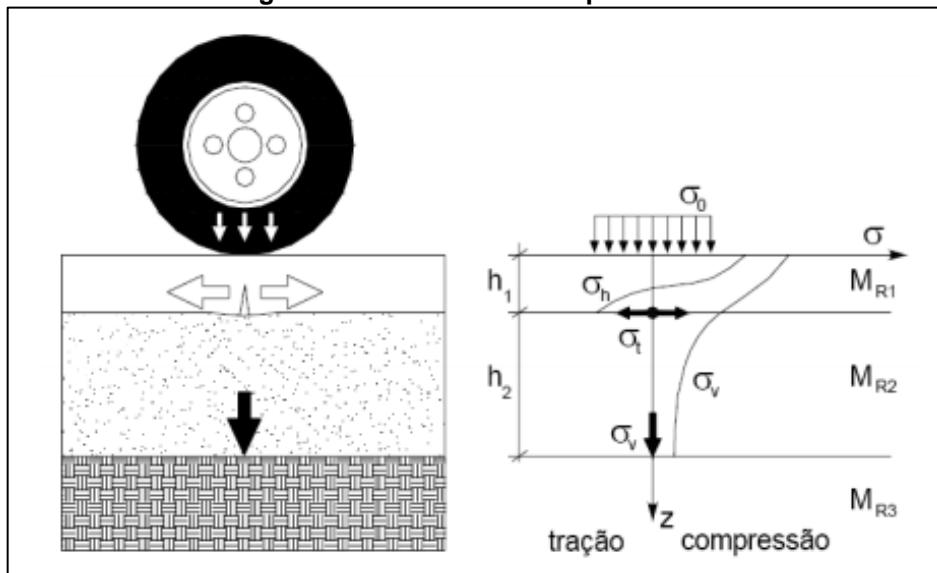
O fenômeno da fadiga é um processo de deterioração estrutural que um material sofre quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas. Após um número suficiente de repetições de carregamentos podem surgir trincas, fraturas e afundamentos, ou seja, o material sofre perda de resistência quando solicitado repetidas vezes por uma carga (PINTO, 1991 apud. KAKUDA, 2010).

As trincas em camadas de revestimentos acontecem predominantemente devido as elevadas deflexões reversíveis que os pavimentos estão sujeitos, sendo que não necessariamente também ocorrem deformações permanentes. Quase sempre o trincamento por fadiga se inicia nas fibras inferiores da camada do revestimento, propagando-se gradualmente por toda sua espessura até o aparecimento de trincas na superfície. Entretanto as trincas também podem se

iniciar a partir do topo do revestimento quando a superfície do pavimento for solicitada por tensões críticas, podendo ainda ser agravadas pelo enrijecimento devido ao envelhecimento do ligante asfáltico e também pela espessura da camada (KAKUDA, 2010).

Por serem menos rígidas, as camadas subjacentes ao revestimento são mais sensíveis aos efeitos dos carregamentos, assim grandes deformações no subleito e nas camadas inferiores também aumentam a probabilidade da ocorrência de fadiga, gerando afundamentos de trilhas de rodas (SILVA, 2014). A Figura 15 mostra a distribuição de tensões geradas em uma estrutura de pavimento pela solicitação de um carregamento vertical. Destacam-se as tensões nas fibras inferiores do revestimento que podem ser de tração ou compressão, devido ao carregamento cíclico, e também a tensão de compressão na camada de subleito, parâmetros importantes para a análise de fadiga que a estrutura está sujeita.

**Figura 15 - Tensões em um pavimento**



Fonte: Medina e Motta (2015).

## 2.4 RETROANÁLISE DE BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS

Um pavimento é uma estrutura formada por um sistema de camadas que trabalham em conjunto e que podem ser compatibilizadas em termos de rigidez dos materiais. Para se utilizar o cálculo de tensões e deformações no dimensionamento de reforço de pavimentos é necessário conhecer a rigidez de todas as suas camadas, ou seja, seus módulos de resiliência, além dos coeficientes de Poisson

dos materiais e as espessuras das camadas. Entretanto, por alguns pavimentos serem muito antigos, não se conhece as características dos materiais e, além disso, os módulos de resiliência são variáveis com o tempo, assim, uma forma de solucionar este problema é por meio da interpretação da bacia de deformação, a retroanálise (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A metodologia da retroanálise consiste na aplicação de uma carga conhecida sobre um pavimento e a aferição da sua bacia deflectométrica e, conhecendo as características físicas dos materiais e as espessuras das camadas da estrutura é possível inferir os módulos de resiliência através da Teoria da Elasticidade. Portanto, a retroanálise é a especificação de “uma determinada combinação de módulos das camadas de modo a fazer coincidirem a bacia teórica calculada e a bacia de campo determinada” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 454).

A obtenção dos módulos de resiliência dos materiais a partir da retroanálise serve como parâmetro no dimensionamento e avaliação de estruturas de pavimentos, evitando a coleta de material em campo, preservando o pavimento de novos defeitos. Albernaz (1997) afirma que a retroanálise dos módulos de resiliência a partir de bacias de deflexão é uma ferramenta útil na avaliação estrutural de pavimentos, pois permite a comparação dos comportamentos de trechos de uma pista pela determinação dos parâmetros de rigidez das camadas. Bueno (2016) diz que este objetivo é alcançado quando os módulos de resiliência são determinados e, assim, podem ser verificados quais os parâmetros do modelo teórico representam com fidelidade os observados em campo.

Bernucci *et al.* (2008) salientam que os métodos de retroanálise existem desde a década de 70, porém com o surgimento de novos equipamentos medidores de deflexões e com o avanço da computação houve um acelerado desenvolvimento dessa tecnologia. Os autores ainda destacam como vantagens que o ensaio é não-destrutivo e que o método possibilita a obtenção dos módulos nas condições de campo.

A retroanálise objetiva a caracterização do comportamento de cada uma das camadas constituintes do pavimento através dos seus módulos de resiliência. Em seu trabalho, Preussler (2007) faz a retroanálise das deflexões como um sistema interativo utilizando as deflexões medidas em campo, as espessuras das camadas e seus respectivos coeficientes de Poisson, fazendo o cálculo através da Teoria da Elasticidade de um sistema de módulos de resiliência para as diversas camadas

constituintes de um pavimento. O módulo de cada camada é obtido pela comparação da deflexão teórica pela medida em campo.

Utilizando a Teoria da Elasticidade é possível empregar o método em diversos tipos de pavimentos e com diferentes tipos de materiais. Como exemplo pode-se citar a pesquisa de Salles e Balbo (2016, tradução nossa) que analisou um pavimento de concreto continuamente armado construído pelos autores com a finalidade de observar seu desempenho em clima tropical. Após três anos de uso do pavimento, o seu Módulo de Resiliência foi estimado para verificar as suas condições estruturais. Foram feitos ensaios não destrutivos e a retroanálise computacional foi realizada pelo software EverFE, assim concluíram que a porcentagem de armadura está relacionada com a rigidez do pavimento.

Santos *et al.* (2017) utilizaram o software Kenlayer com o objetivo de avaliar o comportamento de pavimentos restaurados em Goiás. Três estradas em estudo receberam serviços de recuperação das suas bases, pois apresentavam defeitos, entretanto, os autores puderam averiguar através da análise da resistência à tração e do módulo de resiliência que esta restauração foi ineficaz uma vez que o controle de tráfego não foi levado em consideração no projeto.

Em seu estudo, Yu *et al.* (2018, tradução nossa) analisam como a retroanálise dos módulos podem ter uma maior precisão, uma vez que os módulos de campo são diferentes dos módulos calculados pois fatores como temperatura, umidade, espessura da camada e características do tráfego influenciam os ensaios de campo. Concluíram que o modelo de regressão para as bacias de deformação que proporciona os melhores resultados são os polinômios de grau cinco.

Existem diferentes tipos de softwares que fazem a retroanálise dos módulos de resiliência dos pavimentos. Cada programa realiza sua rotina de cálculos de maneira diferente e este fato foi abordado por Pandolfo, Echeverria e Specht (2016) que compararam os softwares BackSispav e Evercalc. Os autores realizaram a medição da bacia de deformação de dez pavimentos pela viga Benkelman e posteriormente fizeram a retroanálise dos resultados pelos dois programas e, apesar de encontrarem diferenças, concluíram que os valores convergem, validando a utilização de ambos.

O processo de retroanálise pode ser vantajoso por eliminar a necessidade de prospecção e retirada de amostras, além de melhor representar das condições encontradas em campo levando em consideração o histórico de tensões e

deformações já ocorridas no pavimento, sendo um processo não oneroso e com rápida obtenção de resultados. Porém, também apresenta certas desvantagens como, os cálculos simplificados, limitação do número de camadas, necessidade de sensibilidade na escolha dos parâmetros iniciais ao processo, necessidade do conhecimento das espessuras dos estratos, grande variedade de soluções compatíveis com a bacia de campo (PREUSSLER *et al.*, 2000).

#### 2.4.1 Valores típicos de módulos de resiliência obtidos por retroanálise

Com o intuito de observar os valores de módulos de resiliência de materiais típicos constituintes de estruturas de pavimentos, obtidos por retroanálise, alguns trabalhos são aqui revisados. Fernandes e Trichês (2000) fizeram o levantamento deflectométrico com viga Benkelman da BR 101 em Santa Catarina em um trecho entre Biguaçu e Palhoça, durante a construção da sua duplicação. A estrutura é composta por revestimento asfáltico de 7 cm em CAUQ, camada de ligação de 10,5 cm em PMQ, base de 15 cm em BGS, sub-base de 20 cm em pedra pulmão ou rachão e subleito de solo residual de granito com CBR = 8%. Os autores consideraram as deflexões medidas sobre a camada de PMQ e fizeram a retroanálise utilizando o software Elsym5, obtendo os resultados apresentados na Tabela 3, com valores máximos, mínimos e médios de cada camada. Os autores ainda afirmam que a grande variabilidade dos módulos do PMQ se devem as deflexões máximas medidas serem bastante heterogêneas.

**Tabela 3 - Módulos de resiliência BR 101/SC**

Camada	Módulo de resiliência (MPa)			
	Máximo	Médio	Mínimo	CV
Ligação	4960	2321	548	55,0
Base	319	175	90	41,1
Sub-base	334	146	83	43,6
Subleito	145	76	40	43,0

**Fonte:** adaptado de Fernandes e Trichês (2000).

Já Costa *et al.* (2014) fizeram a avaliação de outra duplicação na mesma BR, porém em um trecho localizado em Sergipe. A estrutura é composta por um revestimento de 5 cm em CAUQ modificado por polímero, camada de ligação de 7,5 cm em CAUQ, base de 15 cm em BGTC, sub-base de 15 cm em solo granular e subleito de solo arenoso-argiloso. Os levantamentos deflectométricos foram feitos por FWD em cinco pontos diferentes, estaca 1 a 5, e posteriormente retroanalisisados

pelo programa Evercalc 5.0. Os resultados encontrados pelas retroanálises são mostrados na Tabela 4, onde podem ser comparados com módulos obtidos em laboratório.

Salviano e Motta (2015) avaliaram a partir de ensaios de FWD a execução do anel viário que contorna a região metropolitana do Rio de Janeiro. A estrutura é composta por camada de revestimento de 5 cm em CAUQ modificado com polímero, camada de ligação de 7 cm em CAUQ modificado por polímero, base de 12 cm em BGS, sub-base de 18 cm em BGTC e subleito de solo com CBR > 8%. Os autores fizeram a retroanálise utilizando o software BAKFAA, encontrando módulos de resiliência médio de 6141 MPa para o revestimento, 397 MPa para a base, 6969 MPa para a sub-base e 106 MPa para o subleito.

**Tabela 4 - Módulos de resiliência BR 101/SE**

Camada	Laboratório	Módulo de resiliência (MPa)				
		Est.1	Est.2	Est.3	Est.4	Est.5
Revestimento	4273	1002	1429	1198	1000	1190
Ligação	9309	10937	10096	10837	4357	11233
Base	4032	5729	4228	8385	1519	8322
Sub-base	293	1765	1809	546	1979	535
Subleito	136	305	403	578	477	578

Fonte: adaptado de Costa et al. (2014).

Os diferentes valores de módulos de resiliência dos materiais obtidos a partir de retroanálise pelos autores citados mostram a heterogeneidade dos materiais, onde os mesmos materiais apresentam módulos distintos. Até mesmo os módulos obtidos em laboratório por Costa et al. (2014) são diferentes dos módulos inferidos, afirmindo a variabilidade do comportamento elástico dos materiais em campo.

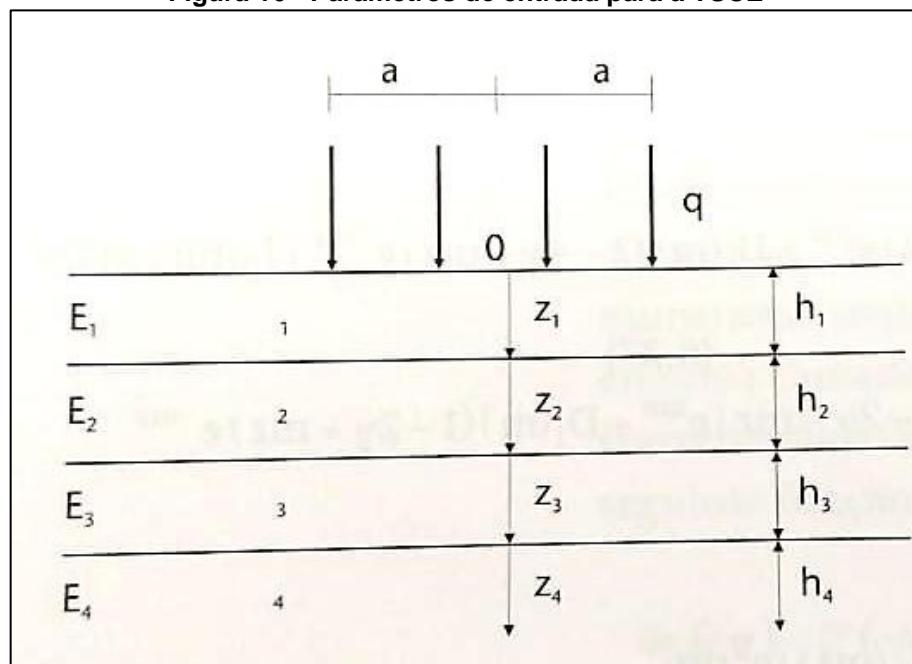
#### 2.4.2 Programas de retroanálise de módulo de resiliência

Alguns equipamentos de análise deflectométrica de pavimentos fornecem diretamente os resultados de módulos equivalentes da estrutura como um todo, entretanto é necessário o auxílio de um software para a determinação dos módulos de cada uma das camadas que compõe o pavimento. Programas de análise de tensões, deformações e deslocamentos são capazes de inferir uma combinação de módulos de resiliência dos estratos que gerarão deflexões semelhantes às obtidas em campo sob ação de um carregamento específico (BUENO, 2016).

Os processos de cálculo dos programas de retroanálise utilizam os conceitos gerais da Teoria da Elasticidade que, quando utilizada para a análise de estruturas de pavimentos, pode ser chamada de TSCE – Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas. Foi por meio dos estudos realizados em meados do século XX por Donald Burmister que se teve base para o desenvolvimento do que hoje é a TSCE, possibilitando um grande salto qualitativo nas análises de pavimentos (BALBO, 2007).

O procedimento de retroanálise envolve os conceitos gerais da TSCE, onde os dados de entrada requeridos para a solução de problemas são os coeficientes de Poisson e módulos de elasticidade de cada material de cada camada, as espessuras das camadas e a magnitude e distribuição de cargas, como exemplifica a Figura 16 (BALBO, 2007).

**Figura 16 - Parâmetros de entrada para a TSCE**



Fonte: adaptado de Balbo (2007).

O modelo de Burmister para a TSCE se apoia nas seguintes hipóteses:

- Todas as camadas são elásticas e lineares em termos de respostas dos materiais;
- Todas as camadas são infinitas na direção horizontal;
- Todas as camadas possuem espessura constante;
- Não existem descontinuidades a menos na superfície do pavimento;

- Não existem forças de gravidade agindo no sistema;
- Não existem nem deformações nem tensões iniciais residuais.

As respostas obtidas pela TSCE são uma aproximação das deformações, tensões e deflexões sofridas pelo pavimento em decorrência do carregamento. Existem métodos, de acordo com Macedo (1996), mais bem elaborados do que a Teoria da Elasticidade que consideram o comportamento não linear dos materiais das camadas dos pavimentos, tais como o método da teoria probabilística de tensões e o método de elementos finitos.

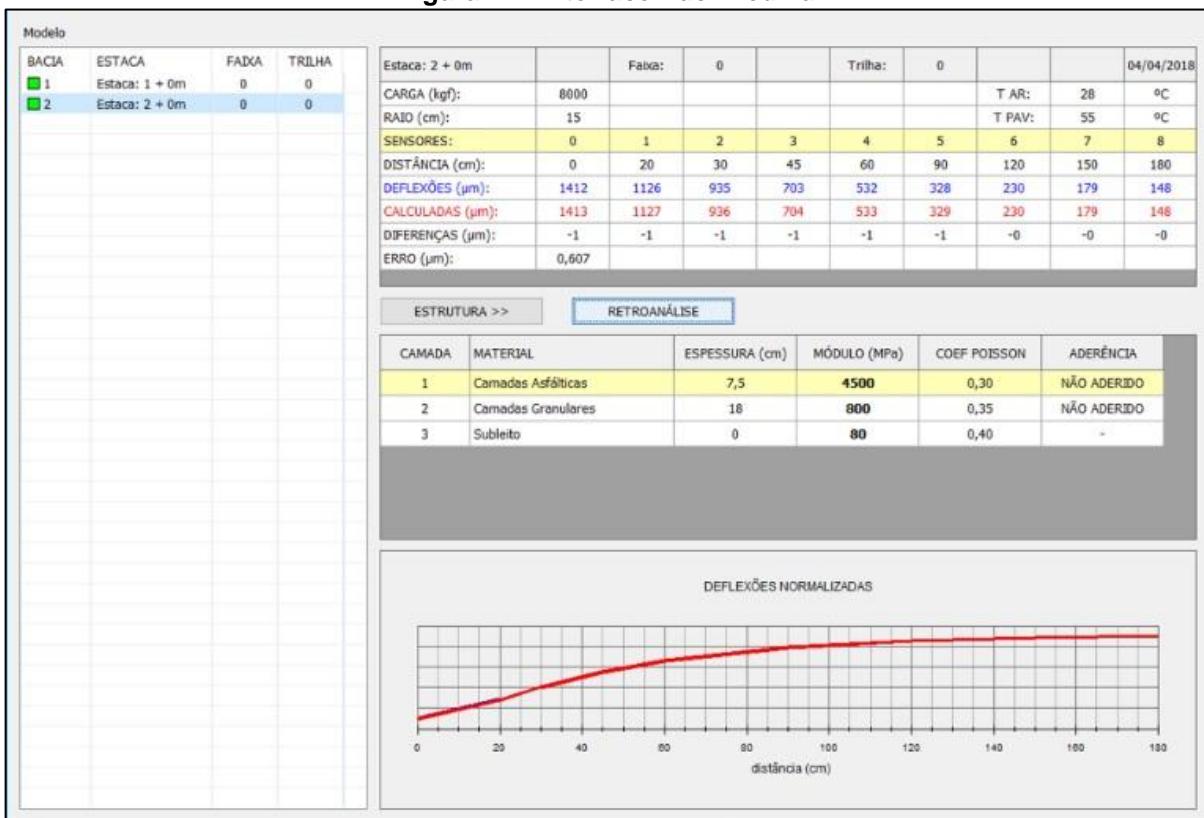
Existem diversos programas empregados para o dimensionamento e avaliação de pavimentos que, além de serem baseados na TSCE, podem ser embasados em métodos de elementos finitos. Softwares baseados em elementos finitos permitem uma modelagem avançada, podendo representar bem o meio real se a malha for discretizada em muitos elementos, porém exigem alto grau de processamento. Dentre estes programas podem ser citados o PANDA, CRACKTIP e CAP3D. Já os softwares baseados na TSCE usam considerações mais simplificadas, com modelagens mais simples e menores capacidades de processamento, mas gerando resultados satisfatórios. Dentre estes programas podem ser citados o MeDiNa, MnLayer, BISAR, ILLI-PAVE e JULEA (SCHERER, 2018).

#### 2.4.2.1 BackMedina

O BackMedina é a extensão do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MeDiNa para a retroanálise de bacias de deflexão obtidas com ensaio de FWD. O cálculo dos módulos de resiliência é feito de maneira iterativa através da ferramenta de Análise Elástica de Múltiplas Camadas – AEMC, a partir da TSCE de Burmister, onde os módulos de resiliência são variados em torno de um valor central, até a obtenção de uma bacia de deflexão teórica próxima da bacia de deflexão de campo (FRANCO, 2018).

A interface do software reúne em uma tela todas as informações que serão utilizadas no processo da retroanálise, como a lista de bacias deflectométricas, dados da bacia em análise, estrutura do pavimento e o gráfico do formato da bacia medida, em vermelho e da bacia calculada, em azul, como mostra a Figura 17.

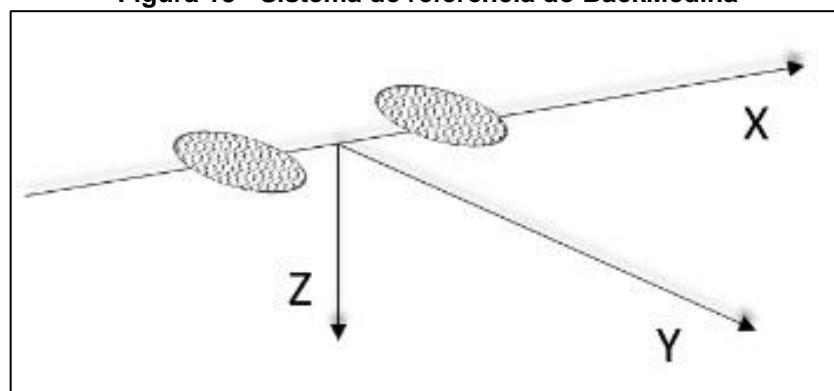
**Figura 17 - Interface BackMedina**



Fonte: Franco (2018).

A estrutura das camadas pode ser alterada quanto ao tipo em: camadas asfálticas, com tratamento superficial, granulares, estabilizadas e de solos naturais, que irão definir um valor de módulo base para o cálculo dos módulos retroanalisisados. São aceitos um máximo de seis estratos e um mínimo de um, sendo que o subleito é uma camada obrigatória. O usuário deve preencher os dados de espessuras, e pode modificar os coeficientes de Poisson, módulos base e condições de aderência. O programa usa o sistema de referência de acordo com a Figura 18.

**Figura 18 - Sistema de referência do BackMedina**



Fonte: Franco (2018).

O software começa o processo de retroanálise a partir dos módulos iniciais, variando-os em uma faixa que depende do erro do cálculo. Para erros elevados a faixa de variação de cada módulo também é elevada, já para erros menores a faixa de variação é menor. O processo de retroanálise pode ser executado diversas vezes para que o programa teste todos os intervalos possíveis de módulos de todas as camadas, isso faz com que o erro diminua e, consequentemente, a precisão dos resultados aumente, assim a bacia calculada se aproxima da bacia medida (FRANCO, 2018).

O erro da retroanálise é obtido pelo método da raiz média quadrática – RMS que é calculado a partir das diferenças entre as deflexões calculadas e as deflexões medidas. O RMS é dado pela Equação 10.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (d_{calculada} - d_{medida})^2} \quad (10)$$

Quando o erro for menor que 5 µm o programa mostra a cor verde no quadro de listagem das bacias, indicando que a retroanálise conseguiu uma boa correlação. Se o erro encontrado for de 5 µm a 10 µm o programa mostra a cor amarela, representando que a retroanálise conseguiu uma correlação razoável. Já quando o erro for maior que 10 µm o programa mostra a cor vermelha na listagem das bacias, indicando que a retroanálise não conseguiu uma correlação satisfatória (FRANCO, 2018). Fernandes (2000) aponta o RMS como o melhor critério de aproximação das bacias teóricas e calculadas devido a sua magnitude ser independente do número de sensores que medem as deflexões.

#### 2.4.2.2 BAKFAA

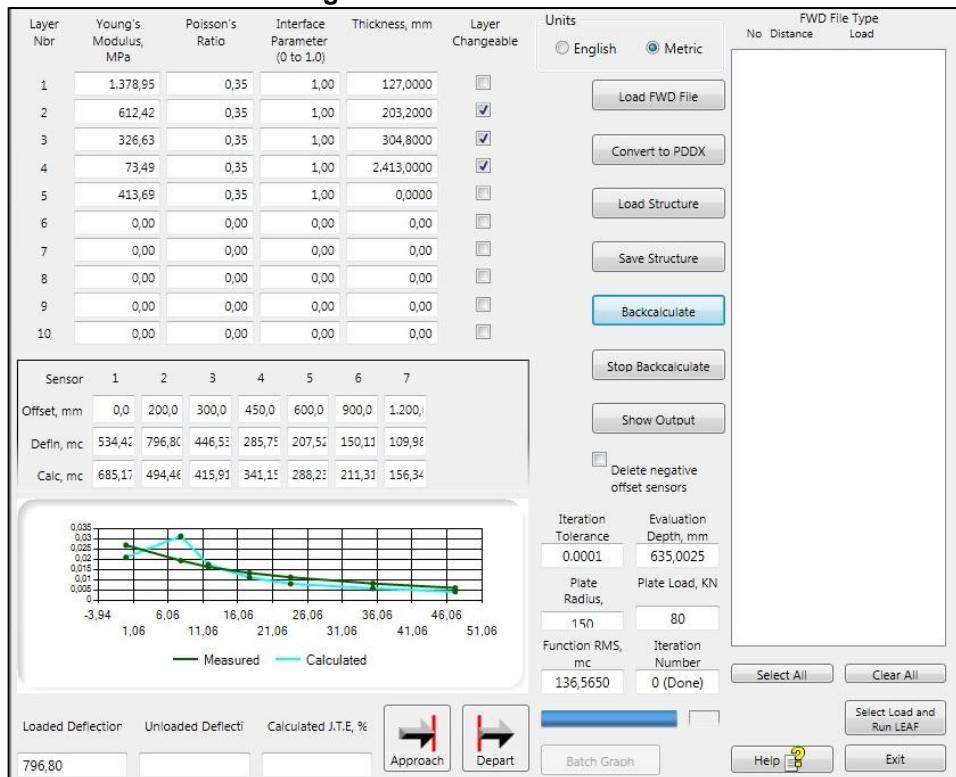
O BAKFAA é uma ferramenta computacional criada pela *Federal Aviation Administration* – FAA que, a princípio, era utilizada na avaliação de pistas aeroportuárias, porém pode ser utilizada para qualquer pavimento asfáltico. O software permite a realização de retroanálise dos módulos de resiliência das camadas que constituem o pavimento, a partir de levantamento deflectométrico com ensaio de FWD. O programa é disponibilizado gratuitamente na internet e apresenta

uma única página gráfica todas as informações necessárias ao processo de retroanálise.

O software calcula as deflexões a partir da sub-rotina de cálculos do programa, o LEAF – FAA *layered elastic analysis*, juntamente com um algoritmo de minimização multidimensional. Esta função minimizadora soma os quadrados das diferenças entre desvios de superfície de pavimentos, medidos com FWD (USDOT, 2011).

Os parâmetros de entrada são as deflexões medidas em cada ponto de leitura, a intensidade da carga aplicada sobre o pavimento, bem como o raio de aplicação desse carregamento, como mostra a Figura 19. Além disso, o processo de retroanálise só pode ser iniciado com a atribuição de valores iniciais de módulo de resiliência dos materiais, coeficientes de Poisson, e respectivas espessuras de todas as camadas. O processo de minimização de erros também é o RMS que é feito através da determinação dos valores das diferenças entre as deflexões medidas em campo com as deflexões calculadas pelo programa (FAA, 2017).

**Figura 19 - Interface BAKFAA**



**Fonte: FAA (2017).**

Bueno (2016) aponta a necessidade de certa sensibilidade do usuário do programa na obtenção de resultados com valores razoáveis, uma vez que o *software* permite encontrar valores fora da realidade, com módulos muito altos ou até mesmo negativos.

#### 2.4.3 Adaptações necessárias para a utilização do BackMedina e BAKFAA

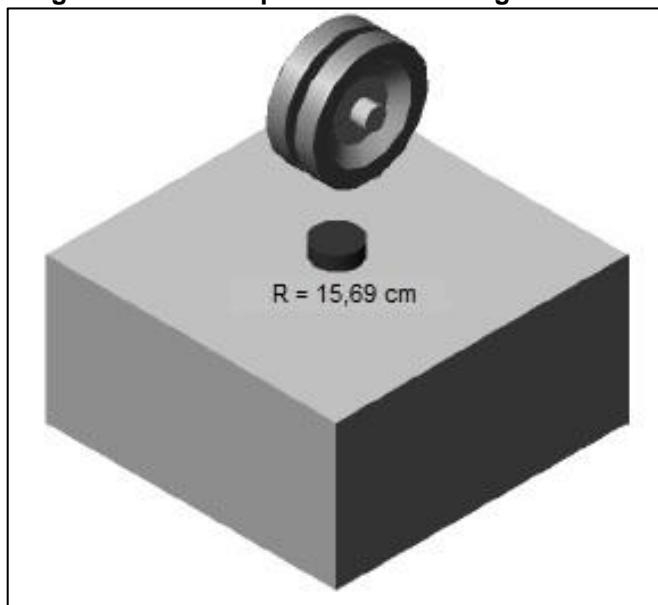
Tanto o BackMedina quanto o BAKFAA são *softwares* que inferem os módulos de resiliência dos materiais através da Teoria de Sistema da Camadas Elásticas – TSCE de acordo com as características dos estratos que constituem o pavimento, como espessura e coeficiente de Poisson, e dos deslocamentos sofridos pela estrutura em decorrência do carregamento imposto. Os *softwares* BackMedina e BAKFAA operam a partir de carregamentos típicos de *Falling Weight Deflectometer* – FWD, sendo assim, estes programas só permitem a retroanálise de bacias deflectométricas obtidas com este tipo de equipamento. Autores como Theisen *et al.* (2009) e Pandolfo, Echeverria e Specht (2016) comentam sobre a dificuldade da utilização destes programas quando o levantamento deflectométrico é feito através de viga Benkelman.

Além de se diferenciarem pelo tipo de carregamento, estático ou dinâmico, os ensaios de VB e FWD diferem na forma de aplicação da carga sobre o pavimento. No caso do FWD a carga é aplicada em uma única área através de uma placa metálica circular. No caso da VB a carga é aplicada em duas áreas definidas pelo contato dos pneus do caminhão com o pavimento. Assim, duas soluções para o impasse na utilização dos *softwares* são levantadas: a utilização de áreas equivalentes sugerida por Bueno (2016) e a transformação das distâncias entre a aplicação da carga e a leitura da deflexão, metodologia demonstrada por Theisen *et al.* (2009) e chamada de C2.

O método de conversão do carregamento de VB para FWD através de áreas equivalentes consiste na adaptação do valor do raio de aplicação e da carga imposta pelo caminhão ao pavimento. Primeiramente a carga de 80 kN do caminhão de eixo simples roda dupla – ESRD é transformada em carga de um semieixo, totalizando 40 kN e se igualando ao carregamento padrão de ensaios com FWD. Já para o cálculo da área de aplicação da carga do caminhão faz-se a verificação da área de uma roda dividindo a carga do eixo por quatro, distribuída de acordo com a pressão de enchimento dos pneus, posteriormente esta área é multiplicada por dois para se

determinar a área equivalente para as duas rodas do semieixo do caminhão e por fim esta área é transformada em um raio equivalente, como mostra a Figura 20. A Tabela 5 mostra esta adaptação dos carregamentos da VB para FWD.

**Figura 20 - Área equivalente de carregamento VB**



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

**Tabela 5 - Conversão dos carregamentos de VB para FWD**

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

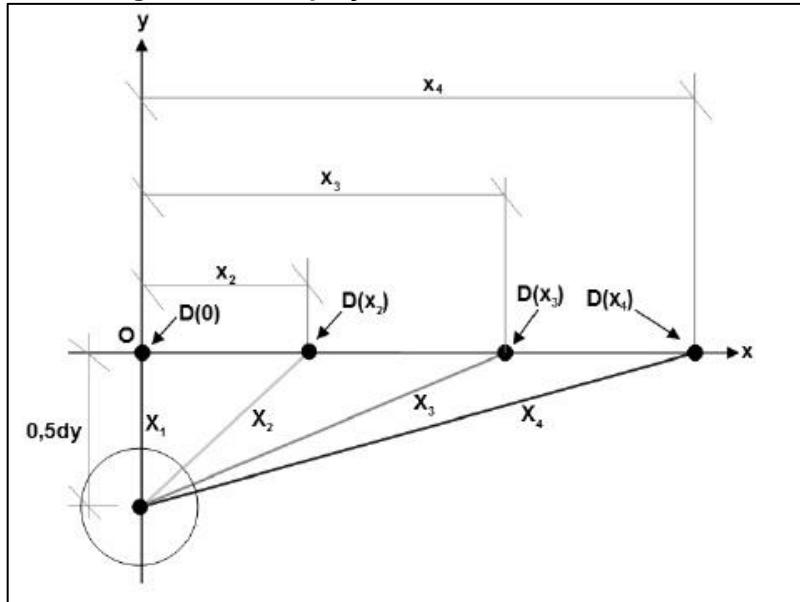
Fonte: Bueno (2016).

Já o método C2 proposto por Theisen *et al.* (2009) considera que cada um dos pneus do caminhão do ensaio VB é responsável por metade da deflexão sofrida pelo pavimento, assim, para a retroanálise, deve-se considerar apenas o carregamento de um dos pneus e, consequentemente, metade da deflexão medida em campo. A carga imposta pelo caminhão no ensaio de VB é de 80 kN, assim a cada rodado é atribuída uma carga de 40 kN, ou seja, 20 kN em cada pneu. Portanto, os valores dos dados de entrada nos softwares, para a conversão do carregamento de VB para FWD, são de 20 kN de carga e as deflexões medidas divididas por dois.

As considerações da metodologia de Theisen *et al.* (2009) implicam na mudança das distâncias entre o ponto de aplicação da carga e os pontos de leitura de deslocamentos verticais. Assim sendo, as distâncias dos sensores até o ponto de

carga são calculadas em função dos afastamentos da VB durante o levantamento deflectométrico, através do Teorema de Pitágoras. A Figura 21 esquematiza o processo, onde no eixo x são medidas as deflexões  $D(x_i)$ ,  $x_i$  são as distâncias até o centro geométrico do carregamento,  $dy$  é o afastamento entre os pneus do caminhão e  $X_i$  é a distância do ponto onde foi medida a deflexão  $D(x_i)$  até o centro do carregamento.

**Figura 21 - Adequação das bacias de deflexões**



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

As distâncias  $X_i$  são calculadas através da Equação 11:

$$x_i = \sqrt{(x_i)^2 + (0,5dy)^2} \quad (11)$$

O método de adaptação dos carregamentos de VB para FWD por áreas equivalentes a princípio parece uma solução prática e intuitiva, uma vez que o número de cargas aplicadas ao pavimento é o que impede a utilização dos softwares, entretanto, Bueno (2016) afirma que este método não é o mais adequado do ponto de vista do princípio da sobreposição de efeitos. Theisen et al. (2009) mostra que a utilização da metodologia de áreas equivalentes pode acarretar em um acréscimo nos módulos de resiliência dos revestimentos, já a utilização do método C2, proposto pelos autores, pode apresentar uma pequena diferença dos valores reais dos módulos de resiliência das camadas.

#### 2.4.3.1 Escolha do método de adaptação do carregamento

Theisen *et al.* (2009) compararam os módulos de resiliência obtidos a partir das duas metodologias citadas para a conversão de carregamentos de VB para FWD com módulos de resiliência reais, vindos de um banco de dados de 63 bacias deflectométricas. As médias dos módulos de resiliência reais, bem como seus desvios padrões, máximos e mínimos foram conseguidos através de análise mecanística via programa EVERSTRESS 5.0. A Tabela 6 traz as características da estrutura considerada, sendo ela composta por 4 camadas, revestimento, base, sub-base e subleito, com coeficientes de Poisson de 0,30; 0,35; 0,40 e 0,45, respectivamente para cada camada citada.

**Tabela 6 - Módulos e espessuras arbitrados**

Módulo de resiliência (MPa)					Espessura (cm)				
Camada	Média	DP*	Mín	Máx	Camada	Média	DP*	Mín	Máx
Revestimento	6071	3037	500	12500	Revestimento	10,9	3,7	5,0	20,0
Base	357	214	40	1000	Base	24,1	11,8	10,0	65,0
Sub-base	228	133	25	500	Sub-base	36,7	16,1	10,0	80,0
Subleito	83	48	20	250	Subleito	-	-	-	-

\*Desvio Padrão

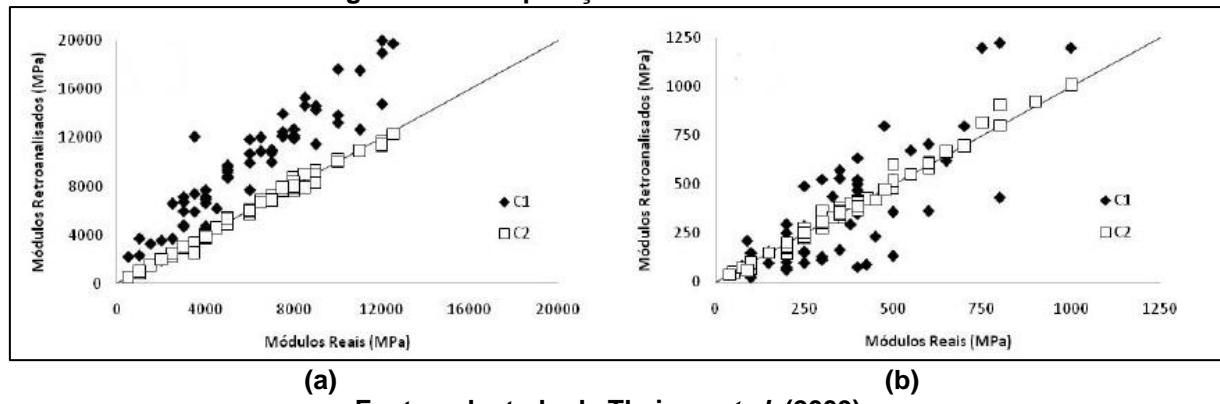
Fonte: adaptado de Theisen *et al.* (2009).

Tendo estes dados reais como referência os autores executaram as retroanálises fazendo a conversão dos dados obtidos por VB para FWD, tanto pelo método de áreas equivalentes, também chamado de placa circular única (C1), quanto pelo novo método por eles proposto, C2. Os autores também calcularam o erro percentual médio – EPM dos módulos de resiliência obtidos pelos dois métodos para a comparação com os módulos reais.

A Figura 22 (a) mostra a comparação dos módulos de resiliência do revestimento utilizando o método C1 e C2 com os módulos reais do revestimento, já a Figura 22 (b) apresenta a comparação dos módulos da base. No caso do revestimento percebe-se que os módulos para C1 são maiores que os módulos reais, explicado por Theisen *et al.* (2009) pelo fato da carga estar mais concentrada na superfície do carregamento, exigindo uma rigidez maior para apresentar a mesma deflexão. Comparando os módulos obtidos pelo método de área equivalente com os módulos reais o EPM é de 79%, já na comparação entre módulos de C2 com os módulos reais o EPM é de -0,8%, quase coincidindo os valores.

No caso dos módulos de resiliência da base nota-se uma grande dispersão dos valores considerando o método C1 em relação aos valores reais. O EPM para C1 foi de 35,0%, já para C2, 5,3%. A grande dispersão de dados no caso do método de área equivalente é explicado por Theisen *et al.* (2009) pela compensação do acréscimo de rigidez no revestimento que diminui as tensões que chegam às camadas inferiores.

**Figura 22 - Comparação dos módulos obtidos**



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

Tendo como base os valores de erro percentual médio dos módulos de resiliência para cada método de conversão em relação aos módulos reais, percebe-se a melhor eficácia da metodologia C2. Esta metodologia foi aplicada aos dados da pesquisa do Bueno (2016), a fim de validá-la, mostrando como a escolha da metodologia de conversão de carregamentos pode influenciar os resultados dos módulos de resiliência retroanalisados.

Utilizou-se como exemplo os dados obtidos por levantamento deflectométrico de VB de Bueno (2016), analisando o Trecho 1, Campanha 2. Este trecho é composto por uma camada de revestimento em concreto asfáltico de 6 cm com coeficiente de Poisson igual a 0,35; base granular de 20 cm com coeficiente de Poisson de 0,40; sub-base granular de 40 cm com coeficiente de Poisson de 0,40 e camada de subleito de solo argiloso com coeficiente de Poisson igual a 0,45.

O ensaio de VB utilizou o carregamento padrão de 80 kN com afastamento das leituras de deflexões mostradas na Tabela 7, onde  $D_0$  é o ponto de aplicação da carga,  $D_{20}$  é a leitura a 20 cm do carregamento e assim sucessivamente. Bueno (2016) apresenta apenas as deflexões características ( $D_c$ ) em cada uma das distâncias de leitura, diminuindo o número de análises, uma vez que foram

levantadas 15 bacias neste trecho. As deflexões são medidas em centésimos de milímetro.

**Tabela 7 - Deflexões medidas por levantamento de VB**

D <sub>0</sub>	D <sub>20</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>45</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>120</sub>
49,4	33,6	26,3	19,9	14,7	9,3	5,9

**Fonte:** adaptado de Bueno (2016).

A retroanálise foi realizada através do software BAKFAA tendo como dado de entrada a carga exercida pelos pneus de um caminhão, porém convertida em um carregamento aplicado em uma área equivalente, como indica a Tabela 5. Os valores de módulos de resiliência encontrados pelo autor estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8 - Módulos de resiliência Trecho 1**

Módulo de resiliência (MPa)	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
	6029	413	353	170

**Fonte:** adaptado de Bueno (2016).

Aplicando o método C2 de adaptação de carregamentos VB para FWD proposto por Theisen *et al.* (2009) considera-se a carga imposta por apenas um dos pneus do caminhão, 20 kN e, ainda, metade das deflexões medidas em campo. As distâncias entre o carregamento e as leituras das deflexões também são adaptadas segundo a Equação 11, admitindo a distância 0,5dy igual a 14,6 cm. Estas adequações são apresentadas na Tabela 9.

**Tabela 9 - Deflexões adaptadas para FWD**

D <sub>14,60</sub>	D <sub>24,76</sub>	D <sub>33,36</sub>	D <sub>47,31</sub>	D <sub>61,75</sub>	D <sub>91,18</sub>	D <sub>120,88</sub>
24,70	16,80	13,15	9,95	7,35	4,65	2,96

**Fonte:** do Autor (2020).

A Tabela 10 traz os novos módulos de resiliência retroanalisados pelo software BAKFAA levando em consideração as adequações do método C2. Confrontando estes valores de módulos de resiliência com os obtidos por Bueno (2016) percebe-se uma diferença numérica, onde o módulo do revestimento é maior quando utilizado o método de conversão C1 (área equivalente). Também é perceptível que o uso da metodologia C2 fez com que os módulos das camadas inferiores variassem.

**Tabela 10 - Módulos de resiliência Trecho 1 com adaptação C2**

Módulo de resiliência (MPa)	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
	2223	834	445	100

Fonte: do Autor (2020).

Tomando por base os dois trabalhos aqui citados, Theisen *et al.* (2009) comparam duas metodologias de adaptação de carregamentos de VB para FWD visando sua utilização em softwares de retroanálise e concluem que o ajuste da carga aplicada e, consequentemente, a alteração das deflexões sofridas pelo pavimento, é a solução que gera resultados mais próximos aos encontrados nas condições de campo. Aplicando esta metodologia nos dados de Bueno (2016) observou-se uma mudança nos valores dos módulos retroanalisados, assim, se justifica a escolha do método C2 proposto por Theisen *et al.* (2009) como sendo o mais adequado.

#### 2.4.4 ELSYM5

O *Elastic Layered System Computer Program* – ELSYM5 foi desenvolvido pelo Departamento de Transportes da Universidade da Califórnia, em Berkeley por Start Kopperman, George Tiller e Mingston Tseng no ano de 1986. É um software que calcula tensões, deformações e deslocamentos em qualquer ponto de uma estrutura de pavimento de até cinco camadas por meio de um algoritmo baseado na Teoria de Sistema de Camadas Elásticas de Burmister. O programa calcula as bacias de deflexões a partir das espessuras e dos módulos de resiliência dos materiais que compõe as camadas, considerando estes materiais como homogêneos, isotrópicos e com comportamento elástico linear (FERNANDES, 2000).

Por ser da década de 1980 o programa abre o *prompt* do sistema DOS para a sua simulação. Balbo (2007) afirma que o programa é adimensional, bastando apenas que os parâmetros de entrada sejam informados em unidades coerentes. Os dados necessários para o processo de retroanálise são as espessuras das camadas, coeficientes de Poisson e módulos de resiliência, como mostra a Figura 23. Também são necessários os carregamentos e suas localizações, além da especificação das posições desejadas das análises pelo programa, como mostram as Figuras 24 e 25.

**Figura 23 - Características do pavimento do ELSYM5**

ELASTIC LAYER DATA				
Number of layers: 5				
Layer Number	(top to bottom)	Thickness (inches)	Poisson's Ratio	Modulus of Elasticity
1		15.00	.35	35000.00
2		22.00	.20	110000.00
3		10.00	.45	1200.00
4		20.00	.50	2250.00
5		.00	.50	450.00

\*Note: Enter Zero thickness when bottom layer is semi-infinite.

Do you want to modify the data (Y/N)? \_

Fonte: adaptado de Balbo (2007).

**Figura 24 - Carregamento no ELSYM5**

LOAD DATA				
Enter two of the following, the third is calculated.				
Load:	20.00lbs	Pressure:	.56 psi	Load Radius: .00inches
Number of load locations:	2			
Location number =		Coordinates		
1		X = 14.60		Y = .00
2		X = -14.60		Y = .00

Do you want to modify the data (Y/N)? \_

Fonte: adaptado de Balbo (2007).

**Figura 25 - Posições das análises no ELSYM5**

<b>EVALUATION LOCATION DATA</b>				
Results are evaluated for all combinations of X-Y coordinates and Depths of Z.				
Number of X-Y positions: 1				
Number of Z position : 4				
Position	X	Y	Position	
1	17.00	.00	1	.01
			2	14.99
			3	36.99
			4	66.99
Do you want to modify the data (Y/N)? _				

Fonte: adaptado de Balbo (2007).

A retroanálise pode levar até alguns segundo dependendo da complexidade do problema. As opções de dados de saída são as tensões normais e principais, deformações normais e principais e as deflexões para cada profundidade indicada para a análise (BALBO, 2007).

Por ser um *software* amplamente utilizado no meio acadêmico e profissional desde os anos 90, o ELSYM5 tem grande relevância nos estudos de avaliação estrutural de pavimentos. Entretanto, é um programa antigo em linguagem Fortran que possui uma rotina de cálculo dependente do operador para se alcançar boa precisão, tornando-se um processo moroso, onde os módulos de resiliência dos materiais devem ser estimados pelo usuário até que as bacias de deflexão calculadas se aproximem da bacia obtida em campo.

#### 2.4.5 Fatores de influência na retroanálise

Bueno (2016) aponta que a desconfiança do uso dos módulos de resiliência obtidos por retroanálise vem da influência que o operador exerce nos resultados dos programas. Ademais, existem outros fatores que podem influenciar os valores dos módulos e na dispersão de resultados, como o ponto de aplicação e tipo do carregamento, temperatura do ar e do revestimento, teor de umidade das camadas, a não consideração da elasticidade não linear dos materiais granulares, faixa de variação dos módulos iniciais, entre outros fatores.

Sobre os motivos que influenciam no processo de retroanálise, Bueno (2016) afirma:

A longa lista de fatores que podem afetar o procedimento de retroanálise e os resultados obtidos a partir deste ilustram porque o processo é tão trabalhoso e exige um considerável grau de habilidade e experiência por parte do operador. Principalmente no processo iterativo de camadas elásticas, diversos fatores afetam o nível de erro e os resultados, simplesmente porque não há uma solução única. (p. 85).

A presença de água nas camadas granulares causa efeitos nos módulos de resiliência retroanalisados. Durante três anos Parker Jr. (1991) realizou ensaios deflectométricos em períodos secos e chuvosos e constatou que os módulos de resiliência obtidos por retroanálise eram diferentes em função da temperatura e pluviometria. O autor verificou que os módulos de camadas de base granular eram menores quando ensaiados em períodos chuvosos, comparados aos módulos obtidos quando a estrutura era ensaiada em período seco.

No que diz respeito dos fatores que influenciam os métodos de retroanálise, Simm Jr. (2007) afirma que os dados de entrada podem induzir os resultados devido às diferentes soluções de módulos de resiliência que podem ser obtidas para uma mesma bacia de deflexão, dependendo dos módulos iniciais e dos limites adotados. Já segundo Pereira (2007), a retroanálise consegue retratar a rigidez de uma camada de pavimento de acordo com o seu grau de influência nas deflexões, onde camadas menos espessas contribuiriam menos na deflexão total, gerando uma baixa precisão dos módulos retroanalisados.

Outro fator importante a ser mencionado é a espessura das camadas que muitas vezes são assumidas como constantes ao longo do perfil longitudinal, contudo, na prática, isso pode não ocorrer, gerando inconstâncias nos valores dos módulos das camadas. Nóbrega (2003) aponta que espessuras menores que aquelas adotadas nos programas geram módulos de resiliência mais altos.

Pereira (2007) também aponta à necessidade de se observar a existência de camadas rígidas de subleito. Elas podem influenciar nas retroanálises por não contribuírem nas deflexões medidas e por não permitirem que os materiais abaixo delas contribuam também. As camadas rígidas podem ser reais ou aparentes, sendo as reais representadas por camadas de rocha ou outros materiais de alta rigidez encontrados abaixo do greide de terraplenagem, já as aparentes são elementos que causam uma distorção da bacia deflectométrica medida, sem ser necessariamente uma camada, como, por exemplo, um bueiro.

Contudo, Balbo (2007) afirma que alguns parâmetros importantes devem ser observados para a execução de um processo de retroanálise de qualidade, como:

- Em um pavimento com respostas flexíveis em termos de deflexão, o subleito é responsável por grande parte da deflexão total;
- Módulos de revestimentos asfálticos não muito deteriorados não costumam afetar muito os resultados;
- A utilização de bacias deflectométricas médias dificulta as análises. O ideal é trabalhar com a bacia real e com espessuras compatíveis com o local onde foram medidas as deflexões.

#### 2.4.5.1 Aderência entre camadas do pavimento

As condições de ligação entre as camadas de um pavimento afetam significativamente o seu desempenho estrutural, entretanto as características de aderência na interface entre revestimentos e camadas granulares, ou ainda, entre camadas granulares e subleito não são muito conhecidas ou estudadas e sua investigação em campo não é uma prática usual no meio técnico (BUENO, 2016). Apesar disso, as condições de aderência entre estratos é um fator a ser considerado pelo projetista quando se fala em uma análise empírico-mecanística, sendo um parâmetro de entrada de diversos softwares de dimensionamento, porém a maneira como as interfaces das camadas se comportam não é uma decisão de projeto, mas sim uma propriedade que ocorre e deve ser analisada diretamente em campo (SCHERER, 2018).

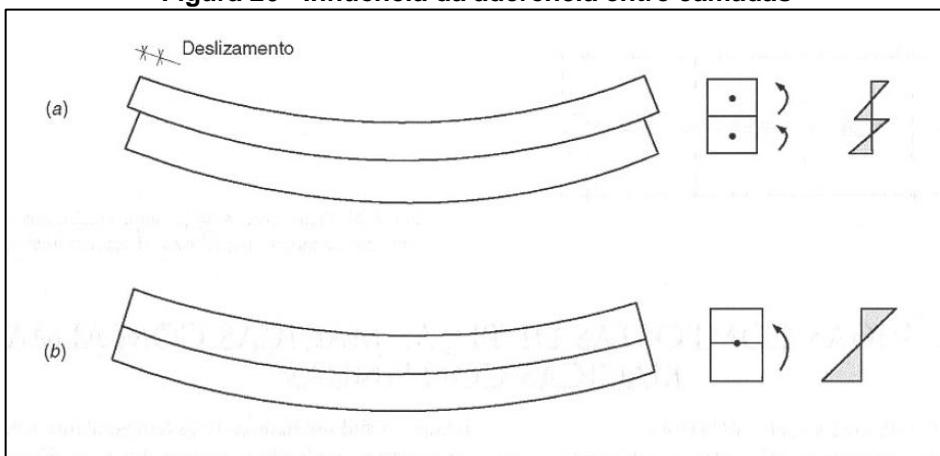
De acordo com Carvalho e Figueiredo (2014) a aderência é o fenômeno onde dois ou mais materiais de resistências diferentes trabalham juntos, apresentando as mesmas deformações. A aderência entre camadas de um pavimento tem grande influência no cálculo das suas tensões e deformações, uma vez que camadasaderidas resistem de maneira conjunta a uma solicitação, como um bloco monolítico com uma linha neutra comum, já sem aderência cada camada trabalha independentemente, cada uma com sua própria linha neutra.

A aderência pode ser classificada de três maneiras: aderência por adesão, por atrito ou aderência mecânica. Pereira (2003) exemplifica as parcelas deste fenômeno, onde a aderência por adesão entre as camadas do pavimento ocorre devido às forças de Van der Waals e reações químicas entre o material ligante do

revestimento com a base, a aderência por atrito é influenciada pelo peso próprio do revestimento e pela ação do tráfego, e a aderência mecânica é dependente da dimensão dos granulares que compõem o subleito e da rugosidade que estes geram na camada.

Bueno (2016) compara a aderência entre camadas de uma estrutura de pavimento com as vigas de madeira laminada colada. No caso das solicitações normais e cisalhantes da madeira laminada colada, Pfeil e Pfeil (2003) explicam que os esforços e deformações seriam como para elementos não estratificados, pois a resina resistiria aos esforços. Este fato pode ser aplicado aos pavimentos, desde que se garanta a aderência plena entre as camadas, para que trabalhem juntas. A Figura 26 mostra um caso de flexão da madeira laminada colada e os efeitos da ausência de aderência (a) e da existência de aderência (b) entre seus elementos, que é análogo às camadas de pavimento.

**Figura 26 - Influência da aderência entre camadas**



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

A Figura 26 (a) ilustra a configuração deformada de duas peças justapostas, uma sobre a outra, em flexão. Ocorre um deslizamento entre suas interfaces e as seções de cada uma sofrem flexão em torno do seu próprio centro de gravidade, ou seja, trabalham de maneira independente. Já na Figura 26 (b) as peças estão aderidas ao longo da interface, assim a flexão se dá em torno do centro de gravidade do conjunto, sendo o comportamento igual ao de um elemento maciço (PFEIL E PFEIL, 2003).

Quando há a existência de aderência entre as camadas dos pavimentos, os esforços horizontais nas interfaces são menores comparados aos casos de camadas

não aderidas. Isso acontece, pois, no caso de estratos aderidos, a interface está mais próxima ou até mesmo coincide com a linha neutra, onde as tensões e deformações são nulas, já quando não existe aderência, a interface coincide com a borda da camada, local onde as tensões devidas à flexão são máximas (SCHERER, 2018).

Bueno (2016) aponta que o fenômeno da aderência entre o revestimento e a base ocorre principalmente pela adesão causada pela imprimação e a pintura de ligação, com alguma parcela de aderência mecânica e por atrito. Entre as camadas granulares de base e sub-base a aderência se dá por meio do atrito e da aderência mecânica entre os materiais, assim como a aderência com o subleito. Entretanto, Canestrari *et al.* (2013) afirmam que assumir a aderência total entre todas as camadas que constituem a estrutura pode não representar a realidade, uma vez que a aderência entre as camadas depende das condições de campo e da execução dos estratos.

Sendo um parâmetro mecanístico de um pavimento, a condição de aderência entre as camadas da estrutura ainda não recebe a atenção devida nos novos projetos e nas restaurações (BUENO, 2016). Porém, grande parte dos programas de análise elástica que realizam os cálculos de tensões e deformações dos pavimentos mostram que existem diferenças significativas nos resultados obtidos dependendo das condições de aderência. Portanto, é relevante a análise do desempenho estrutural e da vida útil do pavimento em relação às condições de aderência de suas camadas.

Bueno (2016) realizou a comparação entre módulos de resiliência retroanalizados considerando camadas de um pavimento aderidas e camadas não aderidas. O autor identificou a diminuição dos módulos de resiliência quando consideradas as camadas totalmente aderidas. Fazendo a análise das tensões sofridas pelo pavimento, averiguou que a diminuição dos módulos devido a aderência total entre camadas ocorre pela distribuição gradual dos esforços ao longo da estrutura, exigindo menores valores de rigidez dos materiais para ajustar a bacia de deflexão teórica com a bacia medida.

## 2.5 MODELOS DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS

A partir da abertura ao tráfego de uma via, com o passar do tempo e pelas ações climáticas, os materiais que compõem as camadas dos pavimentos apresentam um processo de danificação e deterioração, fazendo com que suas propriedades mecânicas se alterem gradativamente. Não se pode estabelecer os mecanismos de ruptura como a única maneira de avaliar o processo de degradação e danificação de uma estrutura de pavimento, haja vista que existem diversas outras variáveis, como propriedades dos diferentes materiais, condições ambientais, condições construtivas variadas, entre outras (BALBO, 2007).

Bernucci *et al.* (2008) apontam duas maneiras de avaliação de uma estrutura de pavimento, a avaliação funcional e a avaliação estrutural, já Yoder e Witczak (1975) definem o que é uma ruptura funcional e uma ruptura estrutural. A ruptura estrutural é o colapso do pavimento de modo que ele seja incapaz de sustentar qualquer carga, sendo este associado às deformações do subleito, já a ruptura funcional é a condição que o pavimento atinge caracterizada pelo desconforto ao rolamento e pela diminuição da segurança do usuário, onde o revestimento apresenta irregularidades, trincamentos e deformações permanentes. Contudo, existem modelos de desempenho capazes de avaliar estes critérios de ruptura.

Modelos de desempenho são recursos utilizados para prever as condições de uma estrutura de pavimento ao longo do tempo, sendo ferramentas de suma importância para o planejamento de manutenções e reabilitações, bem como para a estimativa de recursos necessários à preservação do pavimento. Modelos de desempenho que melhor se adequam à variação da condição dos pavimentos ao longo do tempo são essenciais para a otimização da aplicação de recursos, sendo que a escolha de um modelo apropriado é crucial na implementação de um Sistema de Gerência de Pavimentos (HAAS, HUDSON E ZANIEWSKY, 1994).

Haas, Hudson e Zaniewsky (1994) categorizam os modelos de desempenho em três tipos: os mecanísticos que são baseados em parâmetros de respostas estruturais, como tensão, deformação e deflexões; os empírico-mecanísticos baseados em observações de relações de causa e efeito que buscam inferir as leis físicas dos mecanismos de deterioração dos pavimentos; e os empíricos onde as variáveis dependentes que caracterizam a deterioração são relacionadas a uma ou

mais variáveis independentes, como carregamento, suporte do subleito, espessura e propriedades que constituem as camadas, idade e fatores ambientais.

### 2.5.1 Vida de fadiga

O trincamento por fadiga do revestimento é um dos principais mecanismos de degradação de estruturas de pavimentos asfálticos, onde os carregamentos repetitivos causados pela passagem das rodas dos veículos solicitam a camada de rolamento à flexão e, com isso, se inicia o surgimento de trincas na parte inferior do revestimento que se propagam até a superfície (MEDINA E MOTTA, 2015).

A resistência à fadiga de um revestimento asfáltico é a sua capacidade de suportar as solicitações dinâmicas do tráfego sem que o pavimento sofra uma degradação progressiva. A vida de fadiga é definida em termos de vida de fratura –  $N_f$ , valor que indica o número total de aplicações de determinada carga até a fratura total da amostra. O  $N_f$  pode ser obtido através de ensaios de laboratório onde uma amostra do revestimento é submetida à compressão diametral, sendo a carga aplicada por equipamento pneumático a uma frequência de 1Hz. Além disso, também existem modelos de previsão de fadiga que preveem o número de solicitações por meio de deslocamentos medidos, deformações ou tensões geradas nos pavimentos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Um exemplo de modelo de previsão foi o proposto por Franco (2007) que fez o levantamento de dados de ensaios realizados no laboratório de pavimentação da COPPE e por diversos autores e seus trabalhos técnicos e científicos. Ao todo foram analisados 675 resultados de ensaios de fadiga contendo amostras com diferentes tipos de misturas asfálticas, inclusive com adição de polímero e de asfalto borracha. O modelo de previsão é mostrado na Equação 12.

$$N_f = f_{lc} * 1,904 \cdot 10^{-6} * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,821} * \left(\frac{1}{MR}\right)^{0,74} \quad (12)$$

Onde:

$N_f$  – vida de fadiga;

$\varepsilon_t$  – deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento;

MR – módulo de resiliência da camada asfáltica;

$f_{lc}$  –  $10^4$

Outro exemplo de modelo de previsão de desempenho foi estabelecido por Queiroz (1981) a partir de uma base de dados iniciada em 1975 pela Empresa Brasileira de Planejamento de Rodovias. Os dados foram coletados a partir de observação sistemática de 63 seções de pavimentos do quadrilátero Brasília – Goiânia – Belo Horizonte – São Paulo. O autor propõe a estimativa do número de solicitação do eixo padrão (N) até o surgimento da primeira trinca através da Equação 13 e a evolução do trincamento através da Equação 14.

$$\log N = 1,205 + 5,96 \log SNC \quad R^2 = 0,52 \quad (13)$$

Onde:

N – número de solicitação do eixo padrão;

SNC – número estrutural.

$$CR = -18,53 + 0,04568 \log N + 0,005018 * A * \log N \quad R^2 = 0,64 \quad (14)$$

Onde:

CR – porcentagem de área do pavimento com trincas de classe 2, 3, 4 e panelas;

A – idade do pavimento em anos.

Já Marcon (1996) propôs modelos de previsão com base em dado da rede rodoviária de Santa Catarina, com extensão de 2500 km levantados em 1990. O autor apresenta modelos de previsão de trincamento total, mostrados nas Equações 15 e 16.

$$\Delta TR = 1,5124 * IDADE - 6,8923 \quad R^2 = 0,32 \quad (15)$$

$$\Delta TR = 1,4532 + 4 * 10^4 * NA \quad R^2 = 0,55 \quad (16)$$

Onde:

$\Delta TR$  – trincamento total de área de pavimento;

IDADE – idade do pavimento em anos;

NA – número equivalente de solicitações do eixo padrão de 80 kN.

## 2.5.2 Deformação permanente

As deformações permanentes ou afundamentos de trilha de roda ocorrem devido ao acúmulo de pequenas deformações não recuperáveis, tanto do

revestimento asfáltico como das camadas subjacentes dos pavimentos, causados pelo tráfego de veículos (BERNUCCI *et al.*, 2008). O processo de afundamento de trilhas de roda pode ser considerado uma condição de ruptura, onde cada camada da estrutura é responsável por acumular certa deformação com o decorrer da vida de serviço do pavimento (BALBO, 2007).

Motta (1991) concluiu em sua tese que todas as camadas contribuem para a deformação permanente de um pavimento sendo que quanto maior forem as espessuras das camadas maiores serão estas deformações, além disso, também afirma que o subleito é a camada que mais contribui para os afundamentos e que quanto menos espessa for a estrutura do pavimento maiores serão as tensões no subleito. Franco (2007) afirma que as deformações permanentes que ocorrem na superfície dos pavimentos são provenientes apenas das deformações plásticas do subleito e ainda apresenta um modelo de previsão utilizado pelo Instituto do Asfalto dos Estados Unidos, mostrado na Equação 17, onde o número de solicitações para que haja a deformação plástica é totalmente dependente da deformação sofrida pelo subleito.

$$N_{atr} = 1,365 \cdot 10^{-9} * (\varepsilon_v)^{-4,477} \quad (17)$$

Onde:

Natr – número de solicitações para a deformação permanente de 12,5 mm;

$\varepsilon_v$  – deformação vertical de compressão no topo do subleito.

Motta (1991) ainda sugere como forma de se evitar deformações plásticas elevadas a limitação da tensão vertical máxima atuante no subleito e a atenuação da deformação total no somatório de deformações permanentes.

Em sua pesquisa, Marcon (1996) também propôs modelos de análise de deformação permanente. A Equação 18 mostra a estimativa de deflexões máximas que um pavimento pode sofrer, já as Equações 19 e 20, a estimativa da profundidade média das trilhas de rodas.

$$DEFM = 24,288 + 3,5458 * IDADE \quad R^2 = 0,37 \quad (18)$$

$$TRI = 1,8228 + 0,2325 * IDADE \quad R^2 = 0,28 \quad (19)$$

$$TRI = 3,3051 + 5 \cdot 10^{-7} * NA \quad R^2 = 0,26 \quad (20)$$

Onde:

DEFM – deflexão máxima média medida com viga Benkelman, em mm;

TRI – profundidade média de trilha de roda, em mm;

IDADE – idade do pavimento em anos;

NA – número equivalente de solicitações do eixo padrão de 80 kN.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 DESCRIÇÃO DA PESQUISA**

O presente trabalho faz a avaliação estrutural de pavimentos urbanos da cidade de Joinville- SC por meio de ensaios não destrutivos, fazendo uma análise macanístico-empírica. Um fator primordial para este tipo de avaliação são os módulos de resiliência dos materiais que compõe as camadas do pavimento. Para a obtenção destes parâmetros foram realizadas retroanálises a partir de medidas de deflexão efetuadas por viga Benkelman em pavimentos urbanos, através de dois softwares distintos. Os dados dos ensaios deflectométricos se encontram na pesquisa de Rodrigues (2018).

Para as retroanálises dos módulos de resiliência dos materiais também foram avaliadas metodologias distintas para a conversão de dados obtidos através de ensaio de viga Benkelman para FWD, uma vez que as situações de carregamento destes ensaios é uma condicionante para o emprego dos softwares utilizados. A partir dos módulos de resiliência retroanalisados pôde-se avaliar a influência da condição de aderência entre camadas e também a verificação da vida de fadiga dos pavimentos estudados, através de uma análise de tensões e deformações.

#### **3.2 CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO ESTUDADO**

As vias urbanas analisadas encontram-se na cidade de Joinville, município localizado no nordeste do Estado de Santa Catarina com população estimada de 583.144 habitantes em 2018 e área de 1.126,106 km<sup>2</sup>. 60,4% dos domicílios urbanos encontram-se em vias públicas com arborização e 48% dos domicílios urbanos encontram-se em vias públicas com urbanização adequada, ou seja, com presença de bueiros, calçadas, pavimentação e meio-fio (IBGE, 2018). A malha viária possui 1.827,6 km de extensão sendo que apenas 915,4 km são pavimentados, representando 50% de vias com revestimento asfáltico (SEPUD, 2018).

Joinville é mais um dos inúmeros municípios brasileiros que apresentam vias urbanas com defeitos e condições de trafegabilidade precárias. Como aponta Saavedra (2017), entre meados dos anos de 1990 e o final da década passada a

cidade recebeu grandes investimentos em pavimentação, entretanto este investimento diminuiu nos últimos anos e políticas de manutenção das vias são dificilmente observadas.

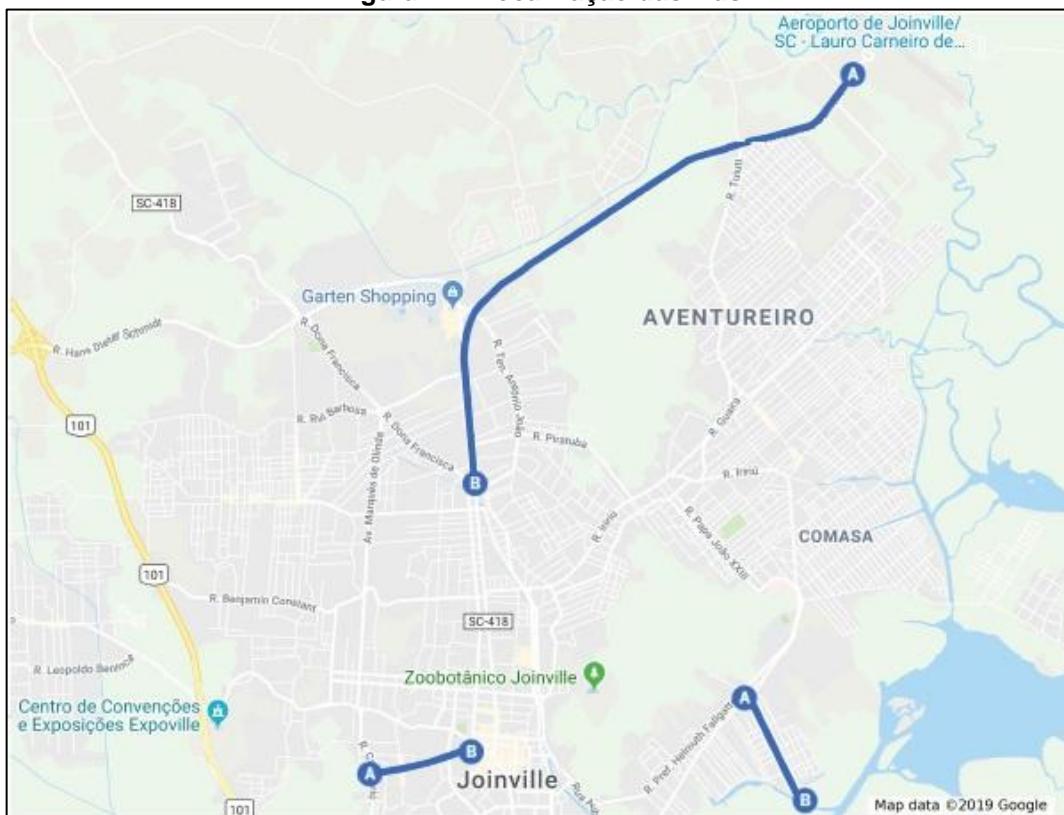
Tendo em vista a escolha de trechos de estruturas de pavimento que representassem a malha viária da cidade como um todo, foram selecionadas três vias com diferentes características na sua composição de camadas, tanto no tipo de material como nas suas espessuras. Para a seleção dos trechos representativos foram analisadas as espessuras das camadas de revestimento e se esta camada era única ou dupla, com ligação. Também foram observados os tipos de materiais granulares que compõe as bases, sub-bases e subleito e se a estrutura era nova ou não, tendo como referência de pavimento velho os que foram construídos há mais de vinte anos, segundo (DNIT, 2006b).

Os três trechos avaliados foram selecionados da pesquisa de Rodrigues (2018) que avaliou em torno de vinte e cinco vias urbanas de Joinville que apresentavam condições adequadas para a sua investigação sem grandes interferências no trânsito. Em seu trabalho o autor realizou levantamentos deflectométricos em quatro vias urbanas utilizando os equipamentos de viga Benkelman, carga e descarga em placa e deflectômetro de peso leve, ou LFWD, com o objetivo de estabelecer correlações de medidas de deflexões sofridas pelos pavimentos a partir destes equipamentos.

Como representantes da malha viária da cidade de Joinville foram selecionados como objeto de estudo desta pesquisa: um trecho da Avenida Santos Dumont, a Rua Otto Boehm e a Rua São Borja, aqui chamados de trecho 1, trecho 2 e trecho 3, respectivamente. A Figura 27 indica a localização destes trechos.

Para a caracterização de cada via escolhida foi feita uma coleta de dados com base nos documentos da Gerência de Banco de Projetos da Secretaria de Infraestrutura Urbana do Município de Joinville – SEINFRA. Os dados observados foram: os nomes das vias, onde elas se iniciam e acabam, suas coordenadas no sistema UTM, extensão, idade, tipo de material que compõe as camadas e suas espessuras. Além disso, os trechos foram selecionados a partir da observação da homogeneidade de trincamentos, inexistência de afundamentos, trilhas de rodas e remendos (RODRIGUES, 2018).

**Figura 27 - Localização das vias**

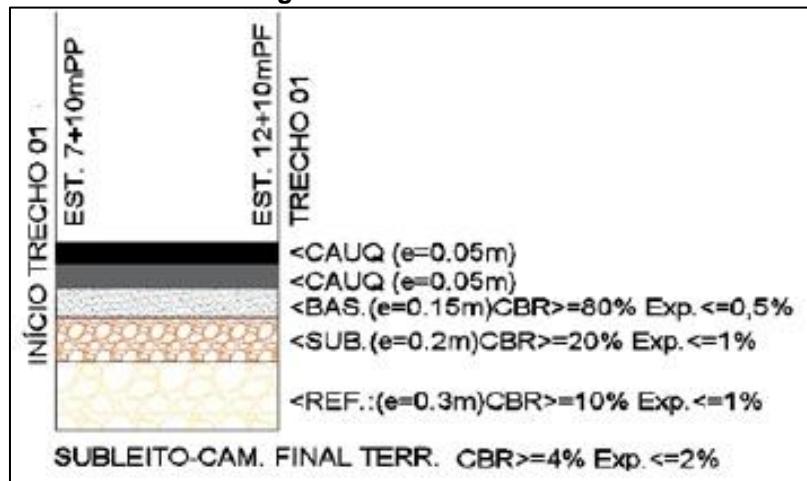


Fonte: o Autor (2020).

### 3.2.1 Trecho 1

O trecho se encontra na Avenida Santos Dumont, uma via arterial de ligação entre bairros constituída de revestimento asfáltico sobre base granular. É um pavimento novo, com abertura ao tráfego em 2018, e apresenta um número de solicitações  $N = 3,64 \times 10^5$ , estimado pela Prefeitura de Joinville (2014). Apresenta também revestimento de concreto asfáltico composto por duas camadas, uma de ligação e uma de revestimento, de 5 cm cada, além de uma camada de reforço de pedra pulmão de 30 cm, sub-base de macadame seco de 20 cm, base de brita graduada de 15 cm e subleito de solo existente no local regularizado e compactado, como mostra a Figura 28. Destaca-se o fato de que as espessuras não foram aferidas em campo através de retirada de corpos de prova.

**Figura 28 - Perfil trecho 1**

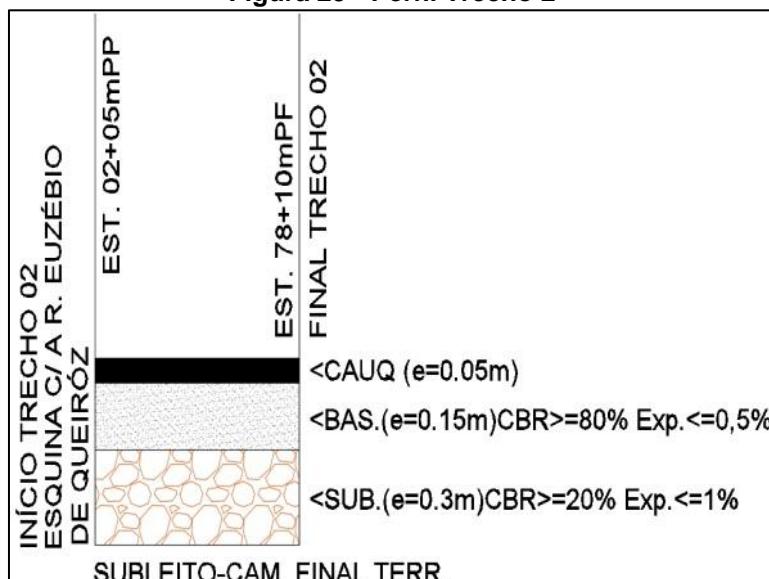


Fonte: adaptado de Rodrigues (2018).

### 3.2.2 Trecho 2

Este segmento se encontra na Rua Otto Boehm, uma via coletora da região central da cidade que destina o trânsito para as vias principais em seu entorno com número de solicitações  $N = 1,44 \times 10^6$ , estimado pela Prefeitura de Joinville (2014). É um pavimento considerado novo que apresenta revestimento asfáltico sobre base granular. É composto por uma camada única de revestimento de concreto asfáltico de 5 cm, base de 15 cm de brita graduada, sub-base de 30 cm de macadame seco e subleito de solo existente, esquematizado na Figura 29. As espessuras das camadas não foram medidas através de retirada de corpos de prova.

**Figura 29 - Perfil Trecho 2**

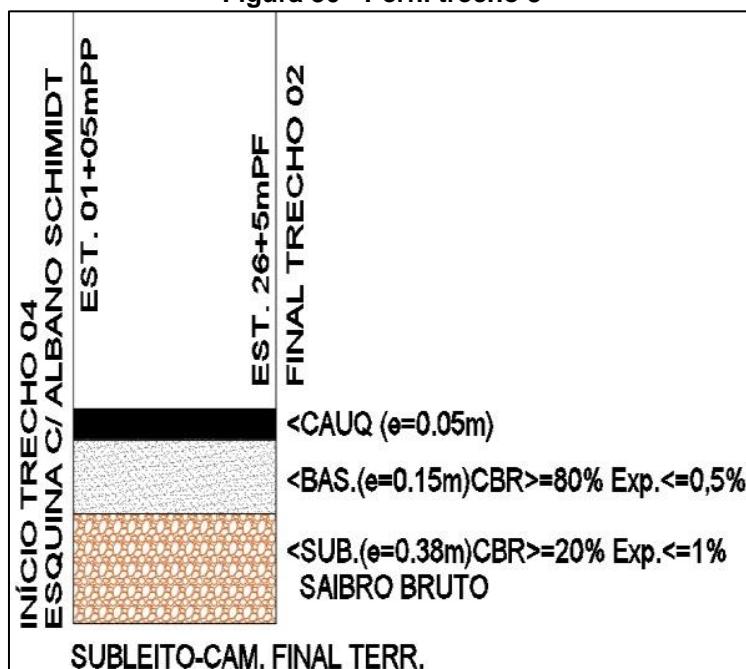


Fonte: adaptado de Rodrigues (2018).

### 3.2.3 Trecho 3

Também se trata de revestimento asfáltico sobre base granular localizado na Rua São Borja, uma via local de bairro de periferia que dá vazão a pequeno volume de tráfego com N estimado em  $3,08 \times 10^6$ , de acordo com a Prefeitura de Joinville (2014). Diferentemente dos trechos anteriores, este trecho foi construído há mais de 20 anos e é constituído por camada de revestimento em concreto asfáltico usinado a quente de 5 cm, base em brita graduada de 15 cm, sub-base em saibro bruto de 38 cm e subleito de solo existente, como mostra a Figura 30. Neste caso também não foram aferidas as reais espessuras das camadas.

**Figura 30 - Perfil trecho 3**



Fonte: adaptado de Rodrigues (2018).

A Tabela 11 resume as estruturas das camadas dos três trechos, mostrando o tipo de material e a espessura das camadas.

**Tabela 11 - Resumo das camadas dos trechos**

ESTRUTURA	REVESTIMENTO		LIGAÇÃO		BASE		SUB-BASE		REFORÇO	
	Tipo	Esp. (cm)	Tipo	Esp. (cm)	Tipo	Esp. (cm)	Tipo	Esp. (cm)	Tipo	Esp. (cm)
Trecho 1	CAUQ	5,0	CAUQ	5,0	BG	15,0	MS	20,0	PP	30,0
Trecho 2	CAUQ	5,0	-	-	BG	15,0	MS	30,0	-	-
Trecho 3	CAUQ	5,0	-	-	BG	15,0	SB	38,0	-	-

Legenda: CAUQ – Concreto asfáltico usinado a quente; BG – brita graduada; MS – macadame seco; SB – saibro bruto; PP – pedra pulmão.

Fonte: adaptado de Rodrigues (2018).

### 3.3 LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS COM VIGA BENKELMAN

Com a definição dos três trechos, os levantamentos deflectométricos realizados por Rodrigues (2018) puderam ser utilizados. O autor dividiu os trechos em estações de ensaios espaçadas em 50 m, cobrindo uma grande extensão de pista, sendo que para o trechos 1 foram levantadas 8 estações, ou seja, 8 pontos de ensaios e nos trechos 2 e 3 foram levantadas 10 estações com 10 pontos de ensaios. As estações de ensaio em campo seguiram alinhamento normatizado pelo DNIT e demarcado por uma equipe de topografia, estando estas localizadas a 90 cm da borda da seção, ou ainda sobre o trilho de rodas. Além disso, foram observadas as coordenadas UTM das estações e também a temperatura ambiente no dia do ensaio. A Figura 31 mostra a demarcação de uma estação de ensaio.

**Figura 31 - Marcação de estação de ensaio**



**Fonte:** Rodrigues (2018).

Rodrigues (2018) realizou ensaios deflectométricos com viga Benkelman – VB de acordo com as normas DNER-ME 024 (1994) e DNIT 133 (2010) onde se utilizou um caminhão com eixo traseiro simples de roda dupla, pneus calibrados com 0,56 MPa, carregamento de 80 kN, aproximadamente 8200 kgf, e um extensômetro

devidamente calibrado para a realização das leituras. O equipamento utilizado foi da marca Solotest do tipo convencional e relação de braços 2:1. A Figura 32 mostra o modelo da viga Benkelman que foi utilizada para os ensaios.

**Figura 32 - Ensaio viga Benkelman**



**Fonte:** Rodrigues (2018).

Cada ponto de ensaio teve sua leitura inicial feita exatamente abaixo da carga imposta pelo caminhão carregado, estando a ponta de prova da viga entre os pneus traseiros. As leituras foram feitas a 12,5 cm e, posteriormente, a cada 25 cm da aplicação da carga até atingir 1,5 m, finalizando o levantamento com uma leitura a 3 m do carregamento para que o extensômetro não acusasse mais influência da carga do caminhão.

A leitura final representa o pavimento descarregado e o deslocamento recuperado está relacionado com a deformação elástica do pavimento, ou seja, a deflexão. Assim, a deflexão de cada leitura é calculada pela Equação 21, adaptada de Bernucci *et al.* (2008):

$$D = (L - L_f) * K \quad (21)$$

Onde:

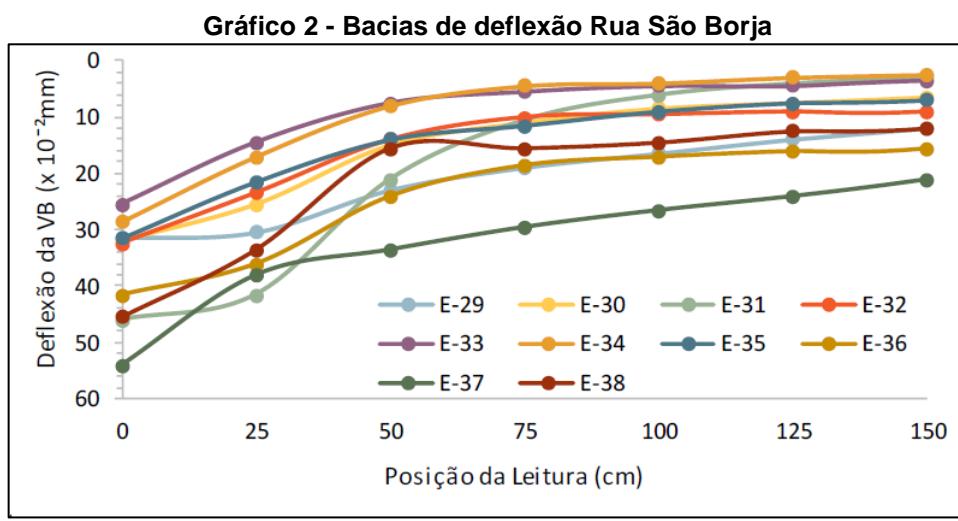
D – deflexão do ponto analisado;

L – leitura do extensômetro no ponto analisado;

$L_f$  – leitura final;

$K$  – constante da viga (neste caso = 0,5).

Em uma planilha eletrônica foi possível plotar as deflexões de todos os pontos de ensaio e de todas as leituras de cada ensaio. O Gráfico 2 mostra as bacias de deflexão que foram calculadas a partir dos ensaios feitos na Rua São Borja (trecho 3), onde no eixo das ordenadas estão as deflexões em centésimos de milímetro e no eixo das abscissas as distâncias em centímetros.



Fonte: Rodrigues (2018).

Destacam-se os valores de deflexão máxima no ponto de leitura igual a zero centímetro, ou seja, a deflexão que o pavimento sofreu exatamente abaixo do carregamento aplicado. Também são apresentados os demais pontos de leitura que constituem o restante das bacias de deflexão. Os demais gráficos de bacias deflectométricas realizados por Rodrigues (2018) encontram-se no Anexo A.

### 3.4 RETROANÁLISES

Tendo os dados das bacias de deflexão e deflexão máxima, tipo de material que compõe as camadas das estruturas dos pavimentos e suas respectivas espessuras, pôde-se dar início a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas dos pavimentos.

O procedimento de retroanálise foi realizado em dois softwares diferentes para a obtenção dos módulos de resiliência dos materiais que compõe as camadas dos pavimentos dos Trechos 1, 2 e 3. Foram utilizados o BackMedina e o BAKFAA

para comparar os módulos de resiliência dos trechos. Além disso, optou-se pelo uso de um terceiro *software*, o AEMC, programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas para o cálculo das tensões nas estruturas dos pavimentos, para validar os módulos inferidos pelos primeiros programas, verificando se as considerações feitas em cada análise são corretas e geram bacias de deflexões próximas às medidas em campo.

A retroanálise nada mais é que o melhor ajuste entre bacias de deflexão determinadas computacionalmente e bacias de deflexão medidas nos pavimentos, em ensaios de campo. Entretanto, no início do processo iterativo de retroanálise é importante estabelecer um critério de parada, definindo um momento em que o ajuste entre estas bacias deflectométricas seja satisfatório. O critério matemático adotado para a aceitação dos resultados obtidos pelos processos iterativos é o da raiz média quadrática – RMS, que é calculado a partir das diferenças entre as deflexões calculadas e as deflexões medidas. Buscaram-se os menores valores possíveis de erro de retroanálise, porém com a cautela de não se obter valores de módulos resilientes irreais.

### 3.4.1 Retroanálise utilizando o *software* BackMedina

Um dos *softwares* escolhidos para o processo de retroanálise foi o BackMedina, pois é um programa atual e relevante nos estudos de pavimentação no Brasil por propiciar uma análise empírico-mecanística. Desenvolvido pelo Dr. Felipe Augusto Cinque de Proença Franco, este programa realiza a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas de um pavimento a partir das bacias de deflexão levantadas em campo pelo equipamento *Falling Weight Deflectometer – FWD*.

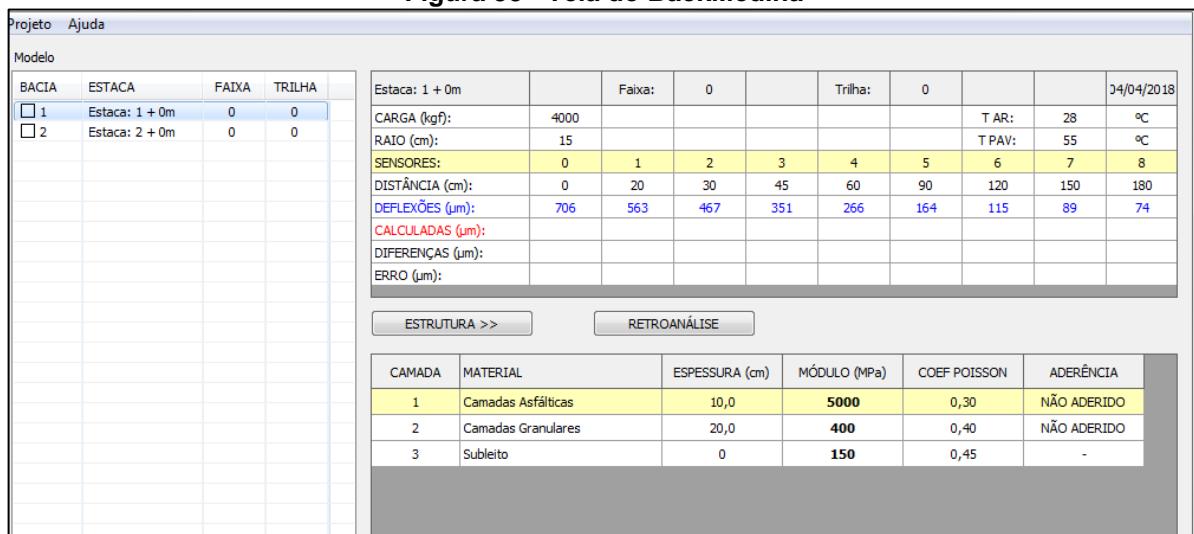
Tendo em vista que um procedimento utilizado no Brasil até os dias atuais para a avaliação estrutural de pavimentos é o ensaio de viga Benkelman e utilizando a metodologia de adaptação de bacias deflectométricas proposta por Theisen *et al.* (2009), alterando o valor da carga do eixo e do seu raio de aplicação, foi possível realizar as retroanálises das bacias de deflexões através do programa BackMedina.

Para o processo de retroanálise o programa disponibiliza o “Modelo de arquivo de bacias”, um documento de Excel que é preenchido com valores *default* do *software* com os dados de entrada necessários para o cálculo. Os dados editáveis desta tabela são o nome da seção, o carregamento aplicado em kgf, o raio

de aplicação da carga em centímetros, a data em que o levantamento deflectométrico com FWD foi realizado, temperatura do ar e do pavimento, informações quanto ao posicionamento do equipamento e os deslocamentos verticais sofridos pelo pavimento, a bacia de deflexões em micrometros.

Estes dados de entrada são importados para o software BackMedina como mostra a Figura 33, onde são apresentados os valores de *default*. Na tela do programa encontram-se todas as bacias de deflexão medidas em campo no lado esquerdo e os dados de carregamento e deflexões no lado direito. Os parâmetros físicos do trecho, como número de camadas e suas espessuras, tipo de material, coeficiente de Poisson e considerações quanto à aderência entre camadas são alterados de acordo com a estrutura de pavimento real analisada. Os módulos de resiliência iniciais são sugeridos pelo próprio programa em MPa, pois ele necessita de um valor de referência para os cálculos.

**Figura 33 - Tela do BackMedina**



**Fonte:** adaptado de Franco (2018).

Foram realizadas as retroanálises dos levantamentos deflectométricos dos três trechos, sendo feitos 28 processos iterativos, 8 do trecho 1 e 10 dos trechos 2 e 3, para a obtenção dos módulos de resiliência. Os processos foram realizados quantas vezes fossem necessárias para que o RMS ficasse o menor possível, garantindo uma boa correlação de retroanálise. Porém, vale ressaltar que a precisão do ensaio de VB é dependente não só do equipamento utilizado, mas também de quem o executa, assim, algumas leituras das bacias tendem a resultados não tão acurados, podendo gerar módulos de resiliência retroanalisados com valores

dispersos em alguns pontos. Para evitar valores incoerentes de alguns módulos resilientes optou-se, em alguns casos, pelo não atendimento do critério de aceitação da retroanálise.

Os dados de entrada do programa são a carga de 2039 kgf, ou seja, 20 kN aplicados através de um pneu do caminhão carregado, o raio do carregamento de 11,1 cm e os coeficientes de Poisson de acordo com a Tabela 12. Lembrando que os postos de leituras aonde foram feitas as medições, que representam os afastamentos entre o carregamento e os locais de leituras de deflexão, foram obtidas pela metodologia C2 de conversão de carregamentos.

**Tabela 12 - Coeficientes de Poisson adotados**

Material	Coeficiente de Poisson
Camada asfáltica	0,35
Camada granular	0,40
Subleito	0,45

Fonte: o Autor (2020).

As estruturas de pavimentos em geral recebem grande incidência de radiação solar, sendo seus materiais termossensíveis afetados pelas temperaturas de diferentes horários e de diferentes estações climáticas. Como proposta para a verificação da influência que a temperatura exerce nos módulos de resiliência inferidos, as retroanálises também foram feitas nas bacias de deflexão corrigidas em função da temperatura através da metodologia de Pais *et al.* (2018, tradução nossa). Esta metodologia corrige as deflexões medidas para uma temperatura de referência de 20°C. Esta temperatura de referência não representa a temperatura média dos ambientes onde os trechos analisados estão inseridos, porém a metodologia empregada permite a correção de toda a bacia deflectométrica considerando, inclusive, a menor influência dos pontos mais afastados do carregamento, como mostrado na Equação 8.

### 3.4.2 Retroanálise utilizando o software BAKFAA

Outro software escolhido para o processo de retroanálise das bacias de deflexões foi o BAKFAA, programa clássico desenvolvido em linguagem *Visual Basic* e fornecido gratuitamente para *download* pela *Federal Aviation Administration – FAA*. Foi escolhido por apresentar facilidade de operação, reunindo todos os dados

necessários para a retroanálise em uma única página gráfica e por ser amplamente e internacionalmente empregado em estudos de mecânica dos pavimentos.

Assim como o BackMedina o BAKFAA foi desenvolvido para analisar dados obtidos por ensaio de FWD, por isso a mesma metodologia de adaptação de cargas de ensaio de VB para FWD, bem como suas bacias deflectométricas, sugerida por Theisen *et al.* (2009) foi adotada. Os parâmetros de entrada do software são os mesmos do BackMedina, como espessura das camadas e posição das leituras em milímetros, coeficientes de Poisson, deflexões em micrometros, raio de aplicação da carga em centímetros e o carregamento em kN, como demonstrado na Figura 34. Também foram utilizados valores de módulos de resiliência iniciais como referência para o cálculo. A Tabela 13 traz os valores de coeficiente de Poisson adotados e os módulos de resiliência utilizados para dar início às retroanálises.

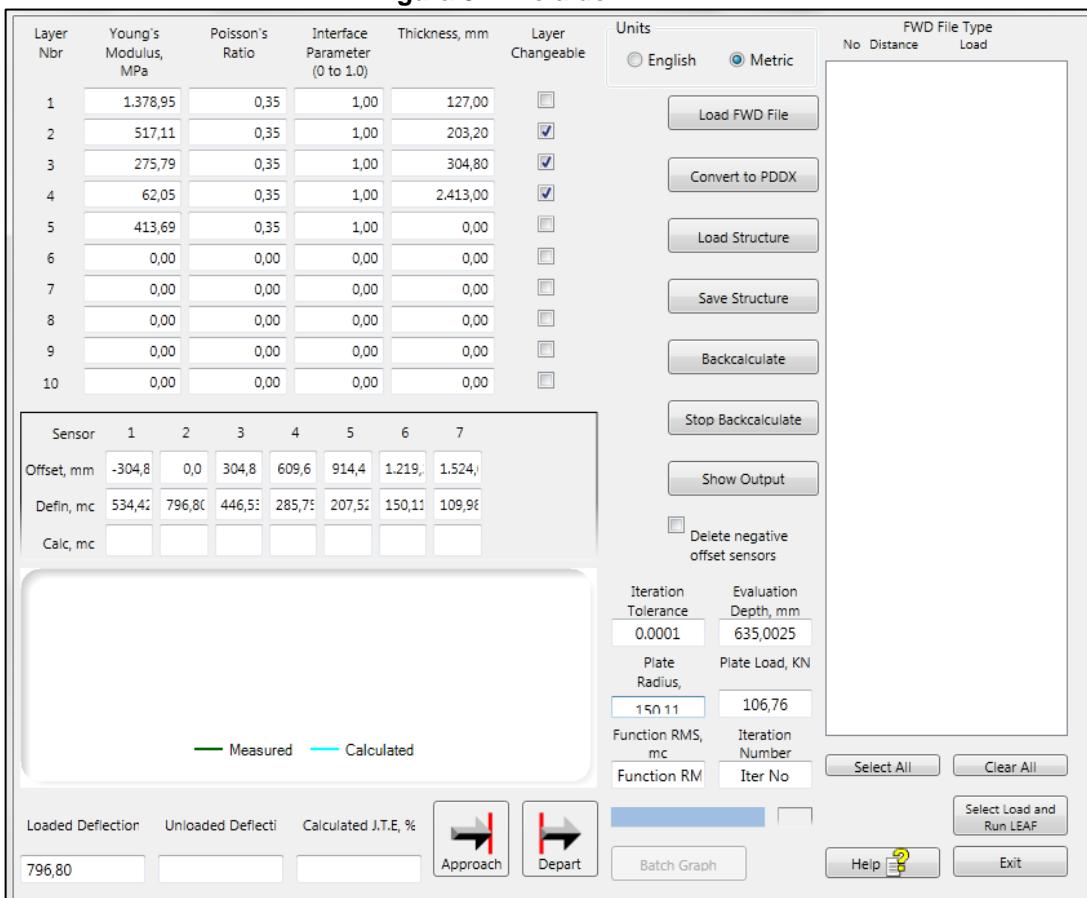
**Tabela 13 - Parâmetros de entrada do programa**

Material	Coeficiente de Poisson	Módulo inicial (MPa)
Camadas asfálticas	0,35	5000
Camadas granulares	0,40	400
Subleito	0,45	150

**Fonte:** o Autor (2020).

Além disso, as condições de aderência entre camadas são retratadas pelo parâmetro *Interface Parameter* que é igual a 1,00 quando as camadas estão aderidas umas as outras e 0,00 quando não aderidas. Assim como no caso do programa BackMedina, aqui foram analisados as condições de aderência com todas as camadas aderidas e todas as camadas não aderidas.

**Figura 34 - Tela do BAKFAA**



Fonte: adaptado de FAA (2017).

Diferentemente do BackMedina que aceita até 9 pontos de leitura de deflexões o BAKFAA recebe no máximo 7 pontos, portanto, para as retroanálises, foram desconsideradas as leituras em duas posições que compunham as bacias. As distâncias de 12,5 cm e 125 cm do local de aplicação do carregamento foram as selecionadas para serem excluídas, pois de acordo com Bueno (2016) estas não são posições usuais de leituras de deflexão. Mais uma vez o critério de parada utilizado foi o da raiz média quadrática – RMS das diferenças entre a bacia medida e a calculada.

### 3.5 CORREÇÃO DAS BACIAS DE DEFLEXÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

O comportamento termossensível dos materiais, principalmente das camadas de revestimento asfáltico, torna interessante o estudo da influência das temperaturas nas respostas mecânicas das estruturas de pavimentos. Com diferentes temperaturas um mesmo pavimento pode apresentar diferentes rigidezes, o que

modifica as distribuições de tensões causadas pelas cargas de tráfego e influencia nas deflexões medidas, principalmente as mais próximas ao carregamento. Assim, as bacias de deflexão medidas em campo foram corrigidas em função de uma temperatura única a fim de uniformizar as leituras e causar uma condição padronizada de análise.

Neste estudo foi levantada a possibilidade da utilização de duas metodologias de correção de deflexões em função da temperatura, o método do DER – SP (2006) que tem 25°C como temperatura de referência e o método macanístico de correção de Pais *et al.* (2018, tradução nossa) que tem 20°C como referência. Fazendo a comparação das temperaturas de referência destas metodologias e levando em consideração o clima da região de Joinville que apresenta temperaturas altas, se justificaria a escolha do método do DER –SP, que é a metodologia padrão utilizada no Brasil, entretanto, de acordo com o SHRP (1993) a espessura da camada asfáltica e a rigidez do subleito são os parâmetros que mais influenciam nos fatores de correção das deflexões, parâmetros estes considerados na metodologia de Pais *et al.*, evidenciando o método como a melhor escolha. Sendo assim, apesar de a temperatura normatizada no Brasil para correção de deflexões ser de 25°C, optou-se pela correção à temperatura de 20°C, pois sua metodologia se adequa melhor aos fins aqui propostos.

A temperatura ambiente foi coletada no dia dos ensaios de campo para o Trecho 1, 2 e 3, sendo, respectivamente, 26°C, 26°C e 21°C (RODRIGUES, 2018). Entretanto, o método de Pais *et al.* (2018, tradução nossa) necessita das temperaturas medidas na superfície do revestimento asfáltico, assim recorreu-se à Equação 7 proposta por Medina (1989), apresentada no item 2.3.3.1, onde o autor relacionou a temperatura dos revestimentos com as temperaturas ambientes da região Sul do Brasil. Portanto, as temperaturas estimadas dos revestimentos dos Trechos 1, 2 e 3 são 34,03°C, 34,03°C e 27,48°C, respectivamente.

A metodologia de correção de Pais *et al.* (2018, tradução nossa) consiste em determinar um fator de correção DR, de acordo com a Equação 8, que quando multiplicado pela deflexão medida gera uma deflexão corrigida. Este fator leva em consideração, além da temperatura do revestimento, o afastamento da leitura da deflexão com o carregamento, a espessura da camada de revestimento e o módulo de resiliência do subleito. Vale ressaltar que para este cálculo foram utilizados os módulos de resiliência do subleito que foram retroanalisados pelo software

BackMedina, visto a impossibilidade de se utilizarem os módulos obtidos em laboratório.

Tendo em vista que cada bacia de deflexão possui um módulo de resiliência de subleito e que cada ponto de leitura de uma bacia tem um afastamento do ponto de aplicação do carregamento, cada deflexão medida possui um único fator DR relacionado. Além disso, os DR foram calculados utilizando os módulos de subleito obtidos considerando a condição de aderência ou não aderência das camadas dos pavimentos, totalizando 484 fatores de correção.

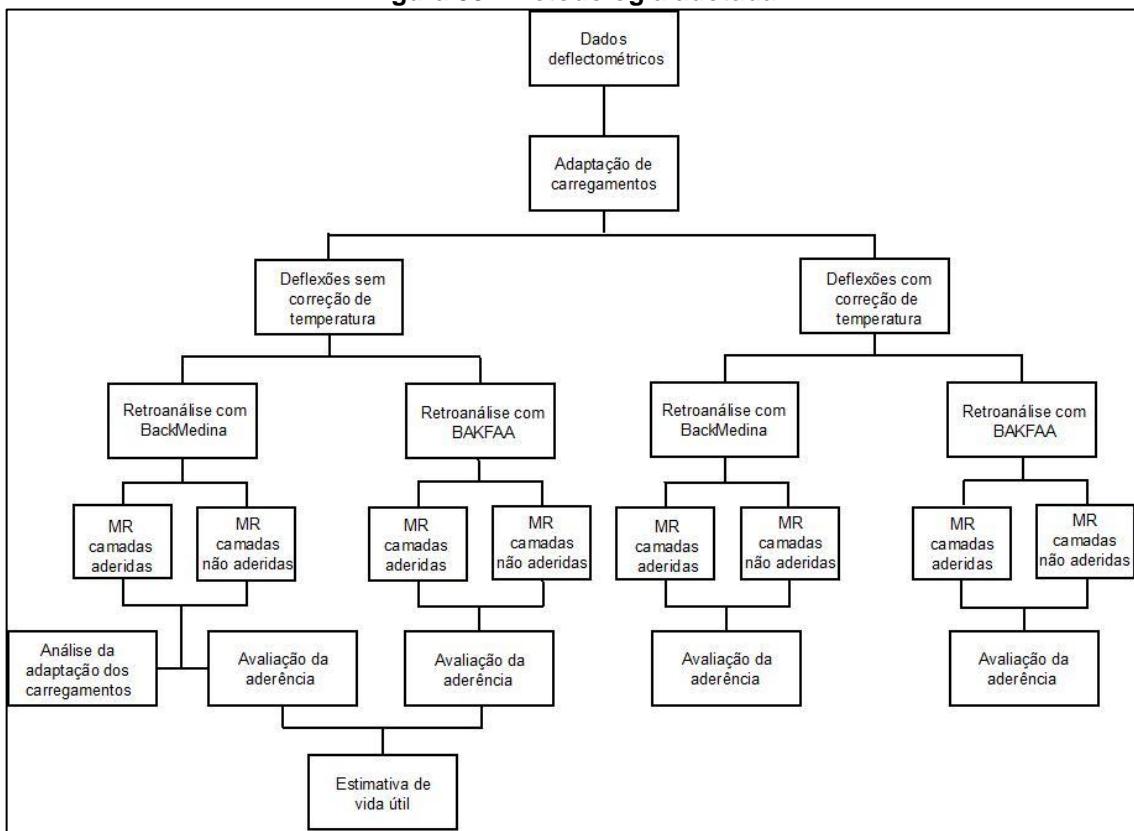
### 3.6 VERIFICAÇÃO DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA E ANÁLISE DE TENSÕES PELO SOFTWARE AEMC

O AEMC é uma ferramenta do programa BackMedina para Análise Elástica de Múltiplas Camadas que realiza cálculos de tensões, deformações e deslocamentos de acordo com a teoria de Burmister. Os parâmetros de entrada são os mesmos do BackMedina e BAKFFAA, como espessura das camadas, coeficiente de Poisson, condição de aderência entre camadas e o carregamento, o que diferencia este *software* é que os valores de módulo de resiliência também são utilizados no início do processo e, como resultado, são obtidas as bacias de deflexão teóricas. Assim, este programa pôde ser utilizado para verificação dos módulos retroanalisados.

Para este processo apenas os valores dos módulos de resiliência retroanalisados pelo BackMedina foram lançados como parte dos dados de entrada no programa. Além disso, foi utilizado o carregamento usual de ensaio de VB para apontar a influência que a adaptação C2 causa nos resultados dos módulos resilientes. As bacias de deflexão geradas pelo *software* foram observadas e comparadas com as bacias obtidas em campo. Ademais, o AEMC também possibilitou a observação dos esforços sofridos pelas camadas, permitindo que uma análise de tensões e deformações nas camadas pudesse ser feita para posterior estimativa de vida útil dos pavimentos onde não houveram correções de temperatura.

A Figura 35 esquematiza a metodologia adotada neste trabalho.

**Figura 35 - Metodologia adotada**



**Fonte:** o Autor (2020).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados das adaptações dos carregamentos de viga Benkelman para FWD e das correções das deflexões em função da temperatura padronizada em 20°C, para todos os trechos estudados. Além disso, serão discutidos os módulos de resiliência retroanalisados pelos softwares de análise elástica e como eles são influenciados pelos fatores de aderência entre as camadas, correção das deflexões à temperatura padrão, e também pelo próprio processo computacional dos softwares. Também é feita uma avaliação das retroanálises e estimativa de vida útil dos pavimentos.

### 4.1 ADAPTAÇÃO DE CARREGAMENTOS VIGA BENKELMAN PARA FWD

As adaptações nos carregamentos foram necessárias para que o BAKFAA e o BackMedina gerassem módulos de resiliência retroanalisados mais próximos dos módulos encontrados em campo, uma vez que os softwares operam a partir de dados obtidos por equipamento FWD. Utilizando a metodologia proposta por Theisen *et al.* (2009) considera-se apenas o carregamento de um pneu do caminhão carregado, ou seja, um carregamento de 20 kN. Esta consideração faz com que a distância entre o carregamento e o ponto onde são medidas as deflexões se altere de acordo com a Equação 11. Tomando a distância 0,5dy do carregamento ao centro do pneu igual a 14,6 cm, se obtém a Tabela 14, que mostra os valores dos novos afastamentos entre carregamento e local de leitura de deflexões, em centímetros.

**Tabela 14 - Correção da posição das leituras**

Posição da leitura (cm)	0,0	12,5	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0	300,0
Adaptação C2 (cm)	14,6	19,2	28,9	52,1	76,4	101,1	125,8	150,7	300,3

**Fonte:** o Autor (2020).

Como cada pneu é responsável por metade da deflexão sofrida pelo pavimento a consideração de um único pneu implica que as deflexões devem ser divididas por dois. As Tabelas 15, 16 e 17 apresentam as bacias de deflexões dos Trechos 1, 2 e 3, respectivamente, corrigidas de acordo com a metodologia de

ajuste de cargas de viga Benkelman para FWD para o emprego nos programas de análise elástica.

**Tabela 15 - Adaptação das bacias do Trecho 1**

Bacia	Deflexões ( $\times 10^{-2}$ mm)							
	D <sub>14,6</sub>	D <sub>19,2</sub>	D <sub>28,9</sub>	D <sub>52,1</sub>	D <sub>76,4</sub>	D <sub>101,1</sub>	D <sub>125,8</sub>	D <sub>150,7</sub>
B1	5,25	3,50	2,5	1,00	0,75	0,50	0,50	0,25
B2	12,00	10,75	5,00	2,50	1,25	1,00	0,50	0,00
B3	10,00	9,25	5,75	2,50	1,75	1,50	1,25	1,00
B4	4,50	4,50	3,75	2,50	2,00	2,25	2,00	1,75
B5	6,00	5,75	4,75	2,50	2,50	2,00	2,00	1,50
B6	6,25	4,25	3,25	2,00	2,00	1,50	1,25	1,50
B7	5,50	5,25	2,75	2,25	2,00	2,00	1,00	0,50
B8	6,00	5,25	4,00	2,25	1,50	0,75	1,50	1,25

Fonte: o Autor (2020).

**Tabela 16 - Adaptação das bacias do Trecho 2**

Bacia	Deflexões ( $\times 10^{-2}$ mm)							
	D <sub>14,6</sub>	D <sub>19,2</sub>	D <sub>28,9</sub>	D <sub>52,1</sub>	D <sub>76,4</sub>	D <sub>101,1</sub>	D <sub>125,8</sub>	D <sub>150,7</sub>
B1	11,87	10,75	8,25	5,75	4,75	4,37	4,00	3,50
B2	19,75	17,75	14,50	9,75	8,50	6,25	5,50	5,50
B3	14,00	13,00	9,25	5,75	4,25	3,25	2,50	1,75
B4	11,25	4,75	3,00	-	-	-	0,25	0,50
B5	13,25	8,25	6,25	1,75	1,25	0,75	0,25	0,00
B6	9,00	9,00	5,50	2,75	2,00	0,25	0,25	0,00
B7	7,50	7,00	7,00	4,25	2,25	0,00	0,00	0,00
B8	14,00	12,75	9,25	8,25	7,50	7,75	6,50	0,00
B9	12,25	6,00	3,50	2,00	0,50	0,50	0,50	0,25
B10	10,50	5,25	2,25	1,00	0,50	0,50	0,25	0,25

Fonte: o Autor (2020).

**Tabela 17 - Adaptação das bacias do Trecho 3**

Bacia	Deflexões ( $\times 10^{-2}$ mm)							
	D <sub>14,6</sub>	D <sub>28,9</sub>	D <sub>52,1</sub>	D <sub>76,4</sub>	D <sub>101,1</sub>	D <sub>125,8</sub>	D <sub>150,7</sub>	D <sub>300,3</sub>
B1	15,75	15,25	11,50	9,50	8,25	7,00	6,00	0,00
B2	16,00	12,75	7,50	5,50	4,25	3,75	3,25	0,00
B3	23,00	20,75	10,50	5,25	3,00	2,00	1,50	0,00
B4	16,25	11,75	7,00	5,00	4,75	4,50	4,50	0,00
B5	12,75	7,25	3,75	2,75	2,25	2,25	1,75	0,00
B6	14,25	8,50	4,00	2,25	2,00	1,50	1,25	0,00
B7	15,75	10,75	7,00	5,75	4,50	3,75	3,50	0,00
B8	20,75	18,00	12,00	9,25	8,50	7,75	7,75	0,00
B9	27,00	19,00	16,75	14,75	13,25	10,50	10,0	0,00
B10	22,75	16,75	7,75	7,75	7,25	6,00	6,00	0,00

Fonte: o Autor (2020).

Apesar de as bacias de deflexão adaptadas apresentarem metade das deflexões das bacias medidas, elas não diferem das originais em relação ao seu formato, ou seja, o comportamento das medidas de deslocamento vertical é o mesmo. Este fato faz com que esta metodologia de adaptação seja útil para a conversão de medidas de deflexão obtidas por viga Benkelman em deflexões

causados por um único carregamento, como o do FWD, permitindo a retroanálise pelos softwares escolhidos para esta pesquisa.

Vale a observação que os valores de deflexão obtidos pelo ensaio de viga Benkelman de Rodrigues (2018) se mostraram pequenos em comparação a vias similares analisadas por outros autores, como Bueno (2016). Estes valores baixos de deslocamentos verticais ocorrem pela grande rigidez das camadas dos pavimentos ou pela ocorrência de erros nos ensaios deflectométricos, onde as leituras podem acontecer de maneira equivocada ou até mesmo o carregamento imposto pelo caminhão carregado pode não estar correto. Também nota-se que quanto maior a idade dos pavimentos maiores são os deslocamentos verticais sofridos, fato decorrente da maior deterioração das camadas pela passagem do tráfego, do tempo e por consequência da ação climática.

## 4.2 RETROANÁLISE DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA

A obtenção dos módulos resilientes por meio do ajuste de bacias deflectométricas obtidas por equipamentos não destrutivos de medição de deslocamentos ainda gera incertezas no meio técnico, porém buscou-se realizar avaliações cautelosas, com análise de diferentes estados de aderência entre camadas, comparação com ajustes de acordo com a temperatura dos revestimentos e também a verificação por diferentes softwares de análise elástica.

### 4.2.1 Módulos de resiliência retroanalisados pelo BackMedina

A seguir são apresentados graficamente os módulos de resiliência de todas as camadas dos trechos obtidos pelo software BackMedina, bem como os erros das retroanálises e os parâmetros de estatística descritiva: média, desvio padrão – DP e coeficiente de variação – CV. Os parâmetros iniciais para o cálculo do programa estão detalhados no item 3.4.1.

#### 4.2.1.1 Trecho 1

As Tabelas 18 e 19 exibem os resultados dos módulos de resiliência do revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito do Trecho 1, Avenida Santos Dumont, retroanalisados pelo BackMedina. Foram consideradas duas

condições de aderência entre os estratos do pavimento, camadas totalmente aderidas e camadas não aderidas entre si, o Gráfico 3 mostra esta comparação.

**Tabela 18 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas aderidas**

Bacia	Revestimento	Módulo de resiliência (MPa)					Erro (μm)
		Base	Sub-base	Reforço	Subleito		
B1	8941	716	716	716	268	16,2	
B2	2087	220	614	614	230	12,8	
B3	3178	408	558	558	209	9,6	
B4	8429	675	675	675	253	11,3	
B5	9706	723	778	778	271	3,4	
B6	9706	778	778	778	291	6,2	
B7	9706	778	778	778	291	6,8	
B8	9706	778	778	778	291	5,1	
Média(MPa)	7682,4	634,5	709,4	709,4	263,0	-	
DP (MPa)	2960,6	194,0	80,7	80,7	28,6	-	
CV (%)	38,5	30,6	11,4	11,4	10,9	-	

Fonte: o Autor (2020).

**Tabela 19 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas não aderidas**

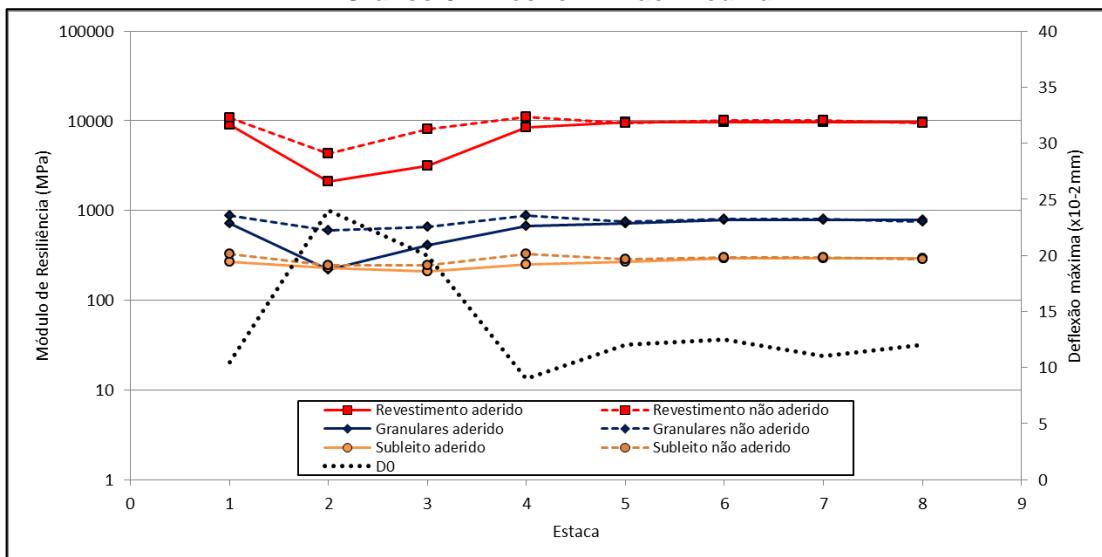
Bacia	Revestimento	Módulo de resiliência (MPa)					Erro (μm)
		Base	Sub-base	Reforço	Subleito		
B1	10919	874	874	874	328	21,4	
B2	4269	602	651	651	244	16,8	
B3	8128	651	651	651	244	12,4	
B4	11064	887	887	887	332	15,1	
B5	9483	760	760	760	285	14,6	
B6	10058	806	806	806	302	17,6	
B7	10058	806	806	806	302	17,9	
B8	9483	760	760	760	285	18,1	
Média(MPa)	9182,7	768,2	774,4	774,4	290,2	-	
DP (MPa)	2047,1	93,3	83,3	83,3	31,2	-	
CV (%)	22,3	12,1	10,7	10,7	10,7	-	

Fonte: o Autor (2020).

Nota-se que a mudança da consideração da aderência entre camadas implica em valores de módulos de resiliência diferentes. A análise de camadas do pavimento aderidas entre si gera módulos maiores comparados aos módulos de camadas não aderidas, onde se constatou, por exemplo, um aumento de 31% nos valores dos revestimentos da bacia B4 e de 73% no caso da base da bacia B2. Além disso, os coeficientes de variação na consideração de camadas não aderidas são menores, representando a independência entre camadas no processo iterativo de retroanálise. Por se tratar de um único trecho, com pontos de leitura de deflexão próximos, espera-se que os módulos de resiliência apresentem valores semelhantes, se não iguais, entretanto por se tratar de um levantamento

deflectométrico que apresenta incertezas, tanto pelo equipamento quanto pelo operador, valores de módulos divergentes não são incomuns.

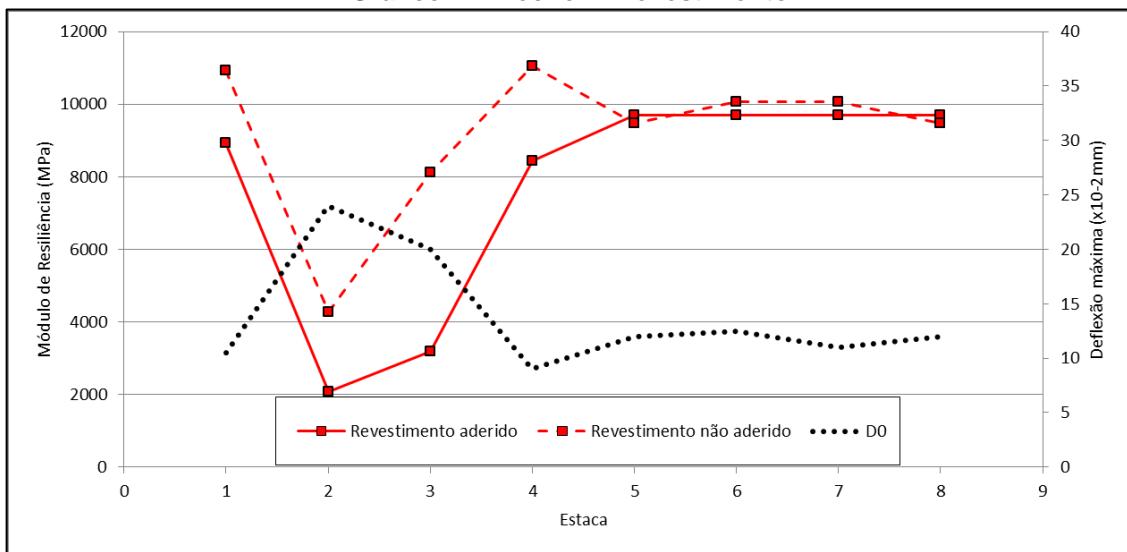
**Gráfico 3 - Trecho 1 - BackMedina**



Fonte: o Autor (2020).

Como esperado os módulos resilientes da estrutura do pavimento se comportaram de acordo com as deflexões medidas em campo, onde nos pontos de maiores deslocamentos verticais os processos iterativos de retroanálise resultaram em módulos de resiliência menores e vice-versa. Os Gráficos 4, 5 e 6 detalham os módulos de resiliência observados no revestimento, camadas granulares e no subleito, respectivamente, e trazem os valores máximos das deflexões medidas em campo.

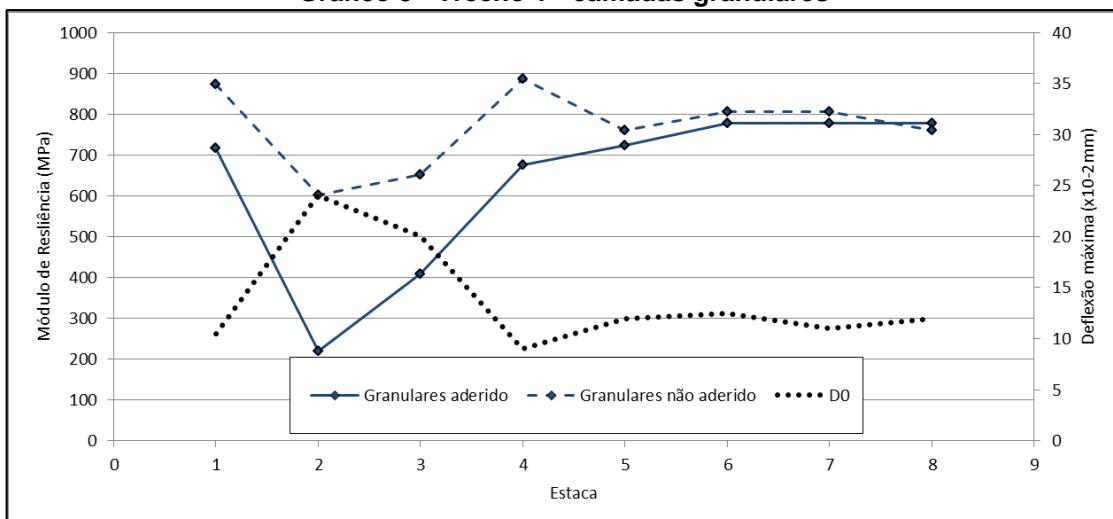
**Gráfico 4 - Trecho 1 - revestimento**



Fonte: o Autor (2020).

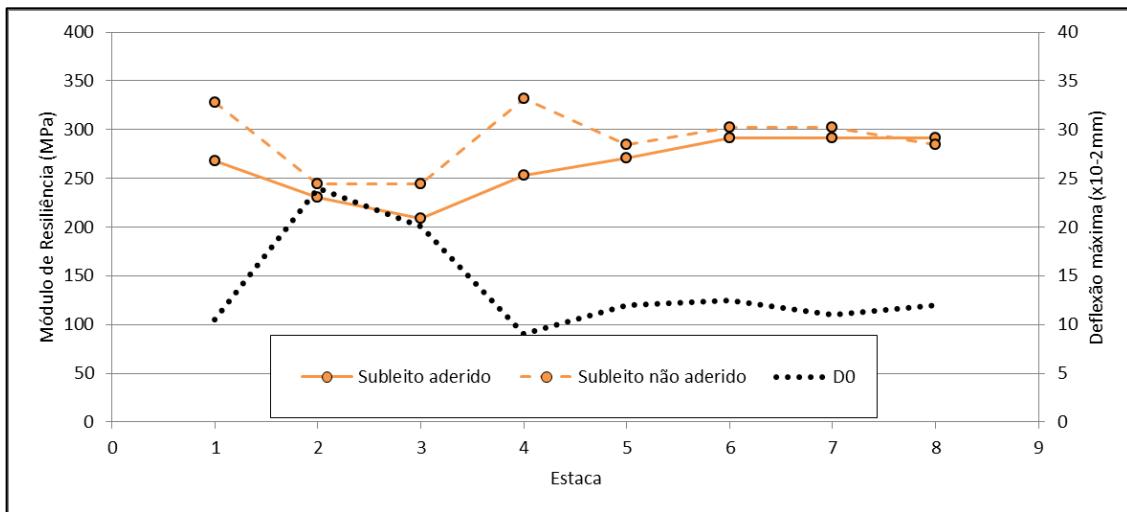
Destaca-se a bacia B5 do Gráfico 4, onde o módulo de resiliência retroanalisado considerando as camadas aderidas foi maior que o módulo na consideração de camadas não aderidas, o que não se observa em nenhuma outra bacia. Esse fato ocorreu devido à tentativa de minimização do erro da retroanálise. Buscando um erro pequeno, no caso 3,4 µm, o módulo retroanalisado extrapolou os demais, inclusive se tornado maior que o módulo na consideração de não aderência.

**Gráfico 5 - Trecho 1 - camadas granulares**



Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 6 - Trecho 1 - subleito**



Fonte: o Autor (2020).

As bacias B2 e B3 são as que apresentam menores valores de módulos de resiliência retroanalisados, independentemente da consideração de aderência entre camadas. Este fato ocorreu por estas bacias terem sido levantadas sobre pavimento assente sobre a cabeceira de um viaduto, não representando o restante do trecho.

De acordo com Balbo (2007) e DER (2006) admite-se que coeficientes de variação das medidas de deflexão menores que 30% representam um segmento homogêneo. Assim, fazendo um paralelo entre deflexões medidas e módulos retroanalisados, com exceção do revestimento e base do caso de camadas aderidas, os módulos de resiliência dos materiais apresentaram variações aceitáveis.

#### 4.2.1.2 Trecho 2

As Tabelas 20 e 21 exibem os resultados dos módulos de resiliência do revestimento, base, sub-base e subleito do Trecho 2, Rua Otto Boehm, retroanalisados pelo BackMedina. Também foram consideradas duas condições de aderência entre os estratos do pavimento, camadas totalmente aderidas e camadas não aderidas entre si, o Gráfico 7 mostra esta comparação.

**Tabela 20 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas aderidas**

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)				
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito	Erro (μm)
B1	6333	507	507	150	9,2
B2	6333	436	364	83	10,5
B3	6333	507	293	177	4,4
B4	7389	592	592	222	27,2
B5	4757	380	586	230	15,1
B6	8429	542	675	253	11,5
B7	7663	614	614	230	15,7
B8	6966	558	558	108	18,9
B9	3435	445	716	268	16,1
B10	7389	651	651	244	21,5
Média (MPa)	6502,7	523,2	555,6	196,5	-
DP (MPa)	1392,4	81,0	127,6	60,3	-
CV (%)	21,4	15,5	23,0	30,8	-

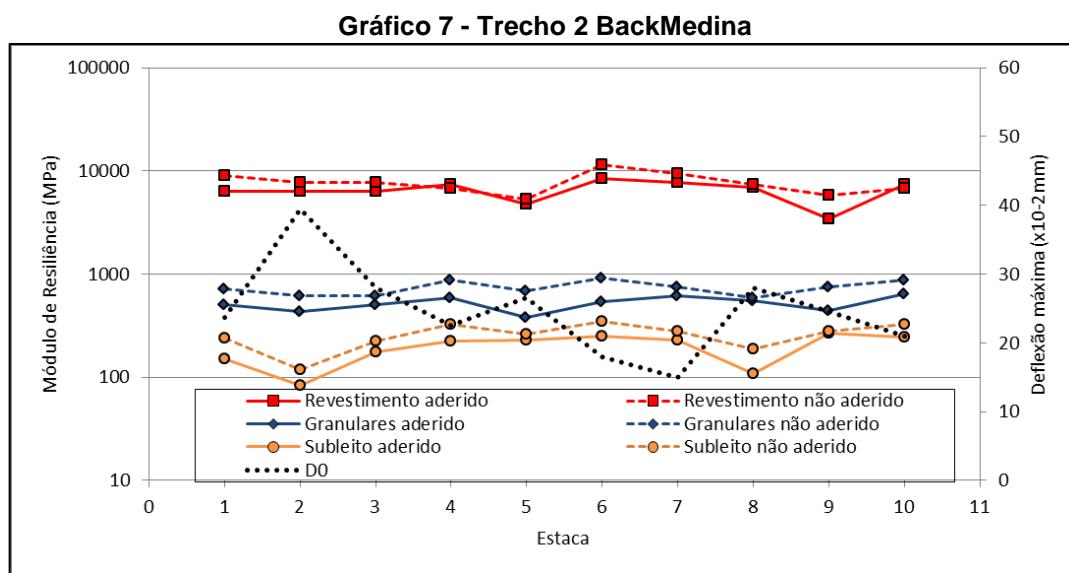
Fonte: o Autor (2020).

**Tabela 21 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas não aderidas**

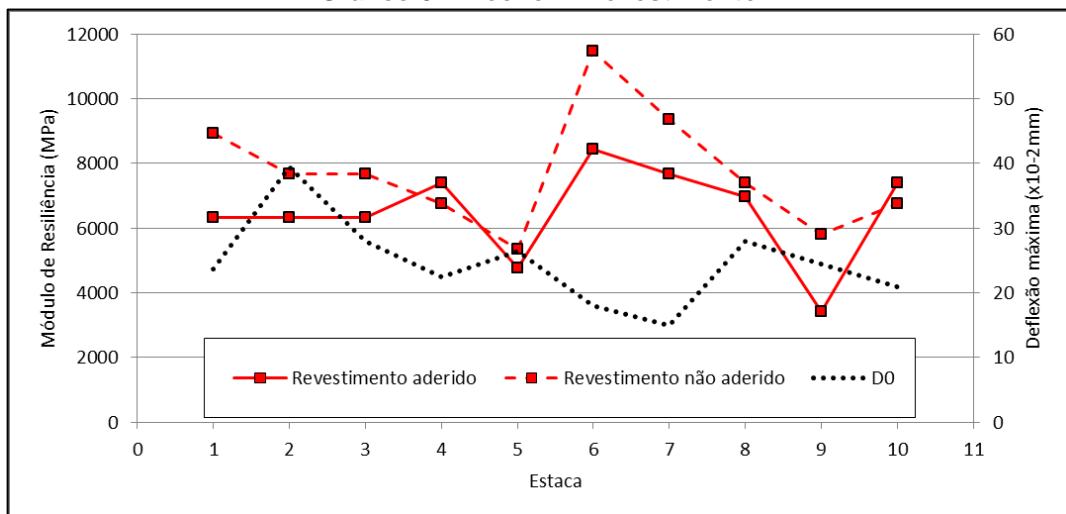
Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)				
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito	Erro (μm)
B1	8941	716	716	240	16,1
B2	7663	614	614	119	18,4
B3	7663	614	614	226	6,6
B4	6759	874	874	328	24,4
B5	5337	691	691	259	18,6
B6	11474	920	920	345	8,7
B7	9359	749	749	281	22,1
B8	7389	592	592	190	28,7
B9	5794	749	749	281	23,8
B10	6759	874	874	328	22,5
Média (MPa)	7713,8	739,3	739,3	259,7	-
DP (MPa)	1721,1	111,8	111,8	66,1	-
CV (%)	22,3	15,1	15,1	25,4	-

Fonte: o Autor (2020).

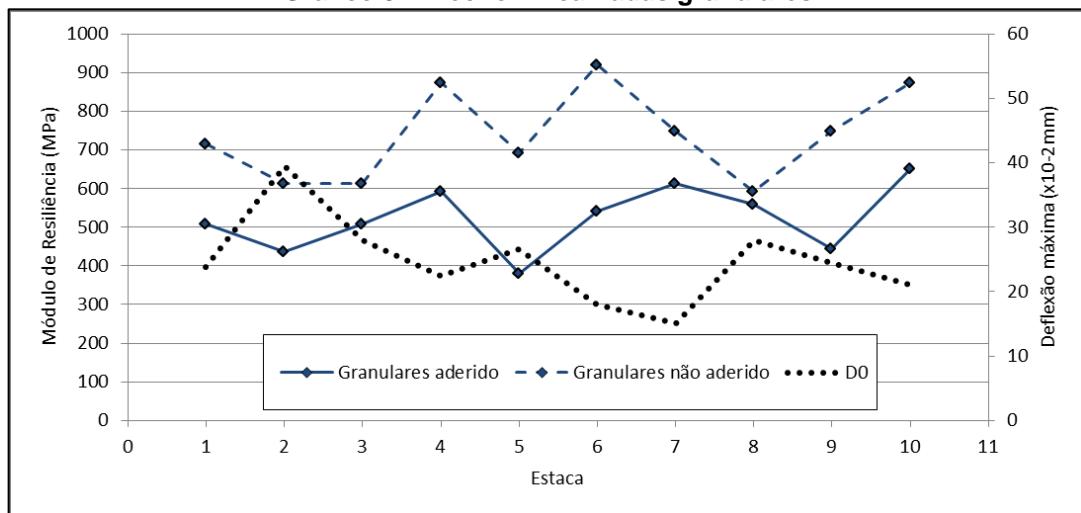
O Trecho 2 apresentou menores coeficientes de variação dos módulos resilientes do revestimento comparado com o Trecho 1, sendo estes inferiores a 30%, uma dispersão baixa dos módulos. Ainda comparando as camadas de revestimento dos dois pavimentos percebe-se valores maiores de módulos no Trecho 1, onde os ensaios foram realizados meses após a abertura ao tráfego, sendo assim, apesar da baixa consolidação dos estratos, os materiais se apresentavam menos degradados.



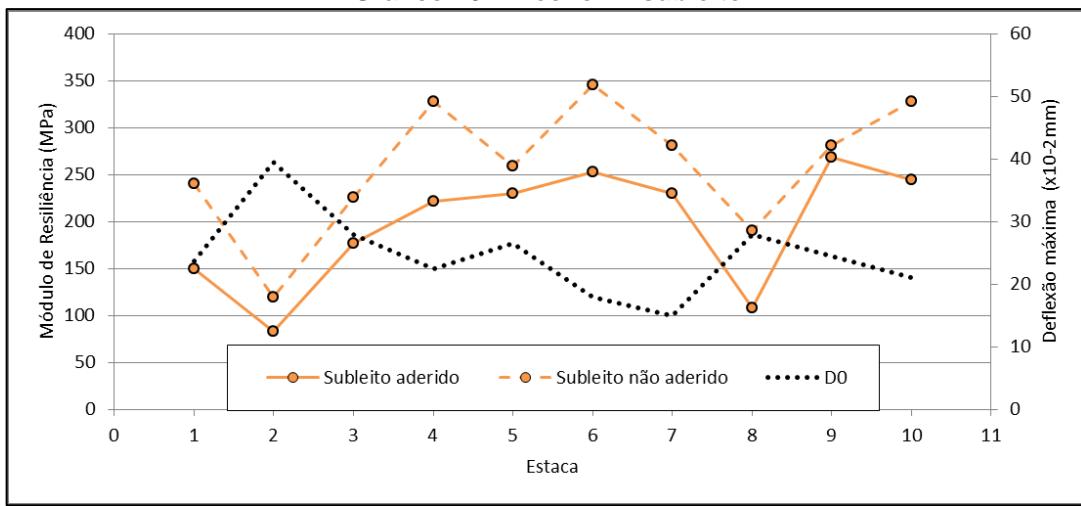
Os Gráficos 8, 9 e 10 detalham os módulos de resiliência observados no revestimento, camadas granulares e no subleito, respectivamente, e trazem os valores máximos das deflexões medidas em campo.

**Gráfico 8 - Trecho 2 - revestimento**

Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 9 - Trecho 2 - camadas granulares**

Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 10 - Trecho 2 - subleito**

Fonte: o Autor (2020).

Diferentemente do que ocorre no primeiro trecho, os módulos de resiliência dos materiais do Trecho 2 não apresentam os mesmos valores de variações em relação a cada camada, como por exemplo, nas estacas 4 e 5 que apresentam valores decrescentes no revestimento aderido e crescentes no subleito aderido, sendo estes valores de módulos do subleito não esperados, visto as deflexões máximas medidas. O Trecho 2 também foi o que apresentou os maiores erros de retroanálise, com bacias com erros maiores de 20 µm.

#### 4.2.1.3 Trecho 3

As Tabelas 22 e 23 exibem os resultados dos módulos de resiliência do revestimento, base, sub-base e subleito do Trecho 3, Rua São Borja, retroanalisisados pelo BackMedina. Também foram consideradas as duas condições de aderência entre os estratos do pavimento, camadas totalmente aderidas e camadas não aderidas entre si, o Gráfico 11 mostra esta comparação.

**Tabela 22 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas aderidas**

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)					Erro (µm)
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito		
B1	3362	614	484	68	14,7	
B2	6333	507	258	123	7,9	
B3	7389	247	160	108	23,7	
B4	6966	510	322	116	8,6	
B5	6966	315	532	209	4,3	
B6	6333	293	436	190	8,4	
B7	6650	541	324	123	5,5	
B8	3056	558	244	72	16,4	
B9	3519	281	281	46	24,1	
B10	6333	293	258	83	14,7	
Média (MPa)	5690,7	415,9	329,9	113,8	-	
DP (MPa)	1593,0	134,0	111,8	49,5	-	
CV (%)	28,0	32,2	33,9	43,5	-	

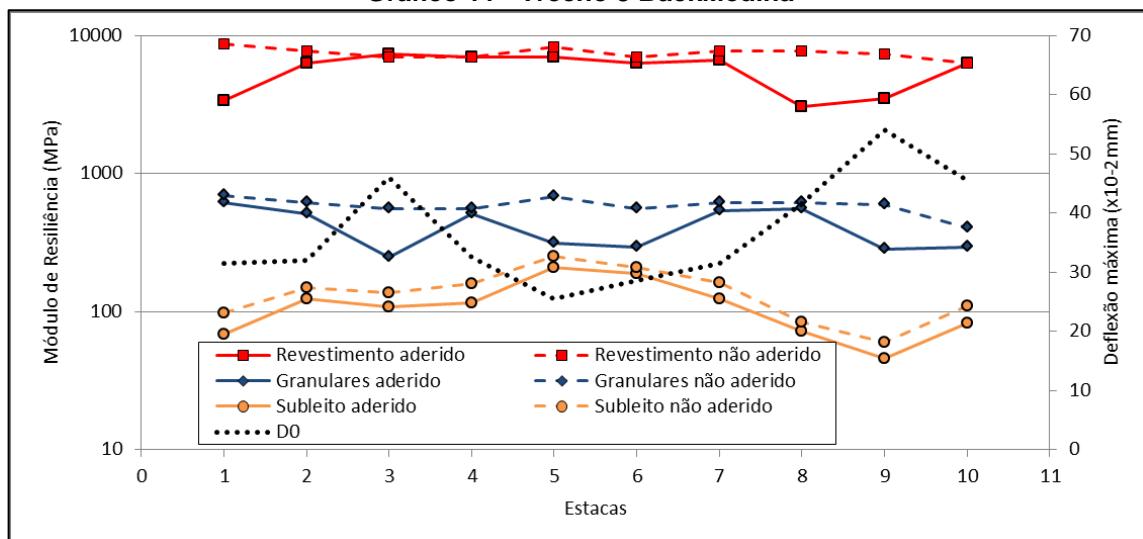
Fonte: o Autor (2020).

**Tabela 23 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas não aderidas**

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)					Erro ( $\mu\text{m}$ )
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito		
B1	8621	691	691	98	22,1	
B2	7663	614	614	150	8,3	
B3	6966	558	218	137	18,7	
B4	6966	558	558	160	12,4	
B5	8302	675	675	253	5,7	
B6	6966	558	558	209	11,8	
B7	7663	614	614	162	8,6	
B8	7663	614	614	84	18,8	
B9	7389	592	509	60	30,7	
B10	6333	400	507	110	17,6	
Média (MPa)	7453,2	587,4	555,8	142,3	-	
DP (MPa)	647,1	76,3	127,0	55,4	-	
CV (%)	8,7	13,0	22,8	38,9	-	

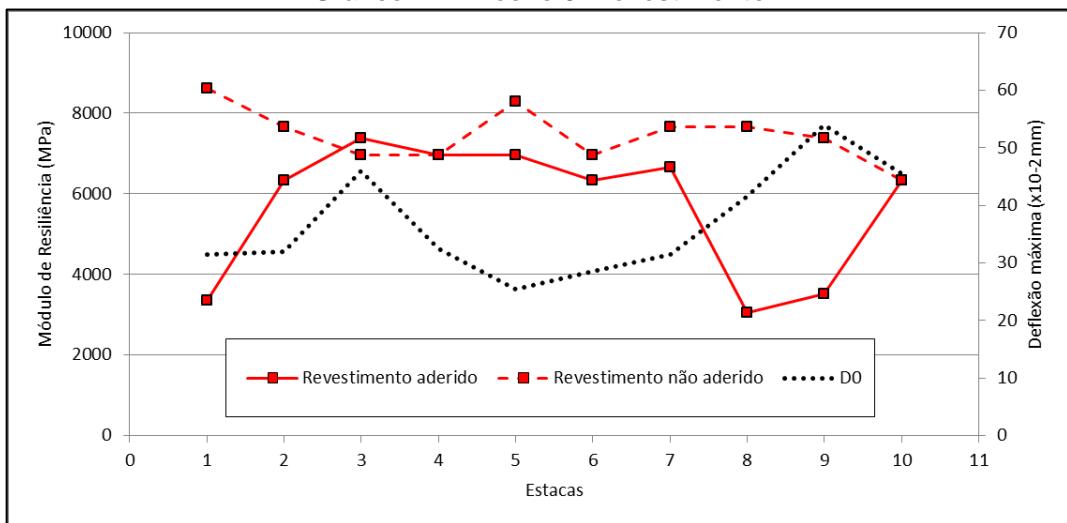
Fonte: o Autor (2020).

Comparada com as outras duas estruturas de pavimento, o trecho da Rua São Borja apresentou as maiores deflexões medidas em campo, o que resultou nos valores mais baixos de módulo de resiliência de revestimento e subleito. Os coeficientes de variação nos módulos retroanalizados na condição de camadas aderidas deste trecho foram os maiores observados por se tratar de uma estrutura antiga e pela tendência de variação dos módulos resilientes com o tempo.

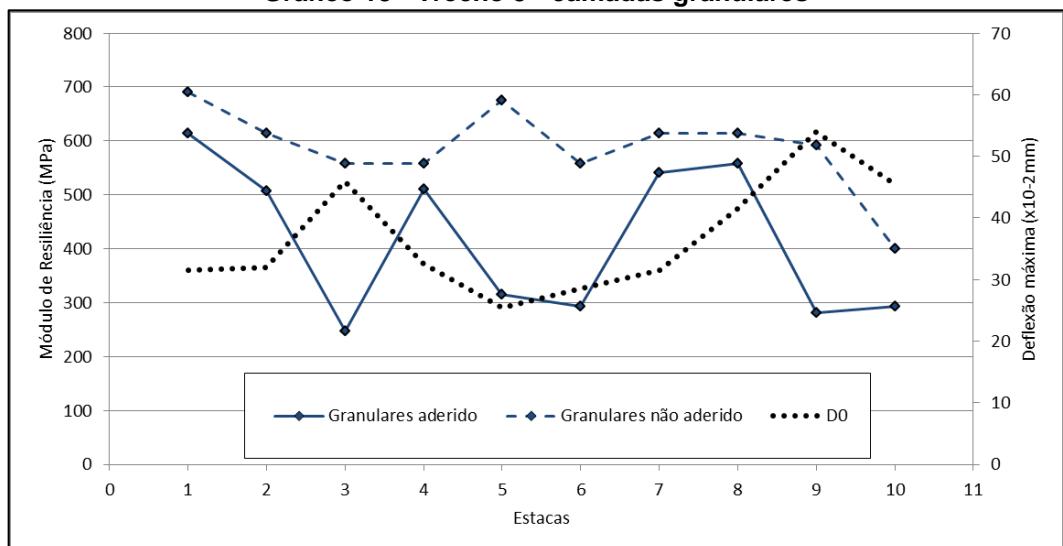
**Gráfico 11 - Trecho 3 BackMedina**

Fonte: o Autor (2020).

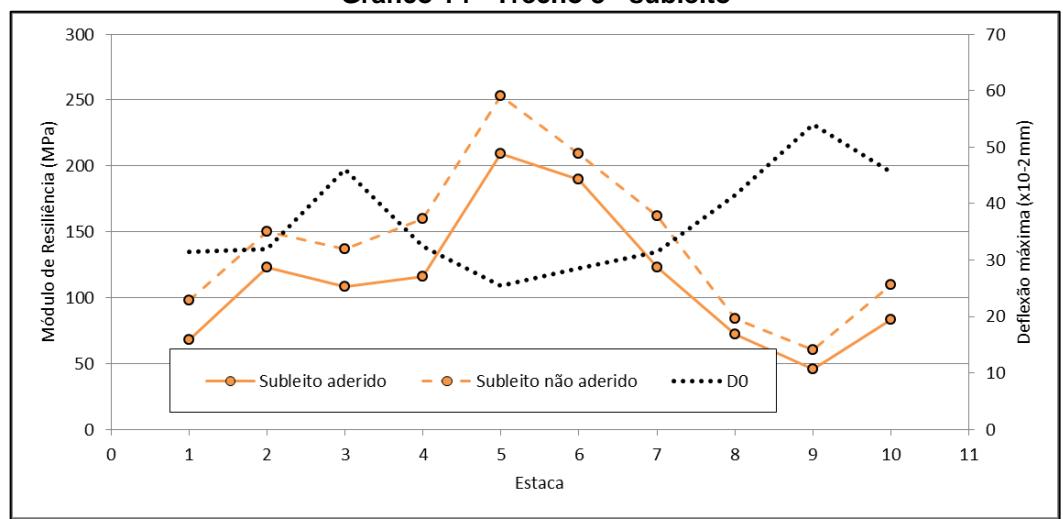
Os Gráficos 12, 13 e 14 detalham os módulos de resiliência observados no revestimento, camadas granulares e no subleito, respectivamente, e trazem também os valores máximos das deflexões medidas em campo.

**Gráfico 12 - Trecho 3 - revestimento**

Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 13 - Trecho 3 - camadas granulares**

Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 14 - Trecho 3 - subleito**

Fonte: o Autor (2020).

Como nos casos anteriores a retroanálise deste trecho apresentou maiores valores de módulo de resiliência quando consideradas as camadas não aderidas, com exceção do revestimento da bacia B3. Além disso, nota-se a uniformidade dos módulos observados no subleito, comparados os dois tipos de aderência entre camadas, devido à consolidação dos solos, visto que o pavimento é antigo e já se sujeitou a muitos anos de carregamento pelo tráfego de veículos.

Como abordado no item 3.4.1 os erros nas retroanálise foram observados. Quanto menor o erro, mais próximos os módulos inferidos estão dos módulos reais dos materiais encontrados em campo. No Trecho 1 os menores erros foram de 3,4  $\mu\text{m}$  na bacia B5 de camadas aderidas e 12,4  $\mu\text{m}$  na bacia B3 de camadas não aderidas, já no Trecho 2 os menores erros foram 4,4  $\mu\text{m}$  e 6,6  $\mu\text{m}$  na bacia B3 aderido e não aderido, respectivamente, e no Trecho 3 os menores erros foram de 4,3  $\mu\text{m}$  e 5,7  $\mu\text{m}$  na bacia B5, sendo que os erros menores que 5  $\mu\text{m}$  são considerados ótimos por Franco (2018). Um fato notável é que os erros das retroanálise são maiores quando as camadas são consideradas não aderidas, o que ainda será discutido.

#### 4.2.2 Módulos de resiliência retroanalisados pelo BAKFAA

A fim de comparar os processos iterativos das retroanálise, o software BAKFAA foi utilizado da mesma maneira que o BackMedina, com bacias deflectométricas adaptadas em função do carregamento do ensaio de FWD. Aqui também foram determinados os módulos de resiliência das camadas constituintes de todos os pavimentos estudados e seus parâmetros de estatística descritiva média, desvio padrão – DP e coeficiente de variação – CV.

##### 4.2.2.1 Trecho 1

As Tabelas 24 e 25 exibem os resultados dos módulos de resiliência do revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito do Trecho 1, Avenida Santos Dumont, retroanalisados pelo BAKFAA. Foram consideradas duas condições de aderência entre os estratos do pavimento, camadas totalmente aderidas e camadas não aderidas entre si, o Gráfico 15 mostra esta comparação.

**Tabela 24 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas aderidas**

Bacia	Módulo de resiliência (MPa)						Erro (μm)
	Revestimento	Base	Sub-base	Reforço	Subleito		
B1	8642,6	691,4	691,4	691,4	259,2	15,9	
B2	6541,0	523,3	523,3	523,3	196,2	19,6	
B3	6943,4	555,5	555,5	555,5	208,3	11,4	
B4	8557,0	684,6	684,6	684,6	256,7	9,8	
B5	7225,4	578,0	578,0	578,0	216,7	9,7	
B6	7981,3	638,5	638,5	638,5	239,4	10,0	
B7	8642,6	691,4	691,4	691,4	259,2	9,8	
B8	8061,1	644,9	644,9	644,9	241,8	9,9	
Média(MPa)	7824,3	625,9	625,9	625,9	234,7	-	
DP (MPa)	769,6	61,6	61,6	61,6	23,1	-	
CV (%)	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	-	

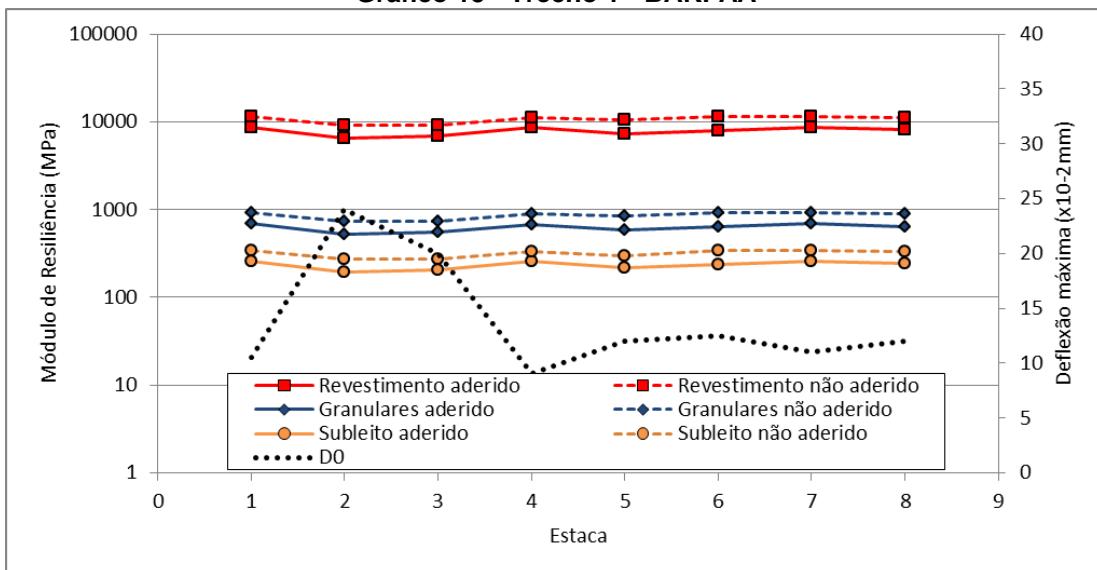
Fonte: o Autor (2020).

**Tabela 25 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas não aderidas**

Bacia	Módulo de resiliência (MPa)						Erro (μm)
	Revestimento	Base	Sub-base	Reforço	Subleito		
B1	11533,6	922,7	922,7	922,7	346,0	17,2	
B2	9174,3	734,0	734,0	734,0	275,2	17,4	
B3	9174,3	734,0	734,0	734,0	275,2	10,0	
B4	11083,5	886,7	886,7	886,7	332,5	13,4	
B5	10651,1	852,1	852,1	852,1	298,2	9,8	
B6	11419,4	913,6	913,6	913,6	342,5	10,0	
B7	11533,6	922,7	922,7	922,7	346,0	11,9	
B8	11194,4	895,6	895,6	895,6	335,8	9,9	
Média(MPa)	10720,5	857,7	857,7	857,7	318,9	-	
DP (MPa)	932,3	74,6	74,6	74,6	29,0	-	
CV (%)	8,7	8,7	8,7	8,7	9,1	-	

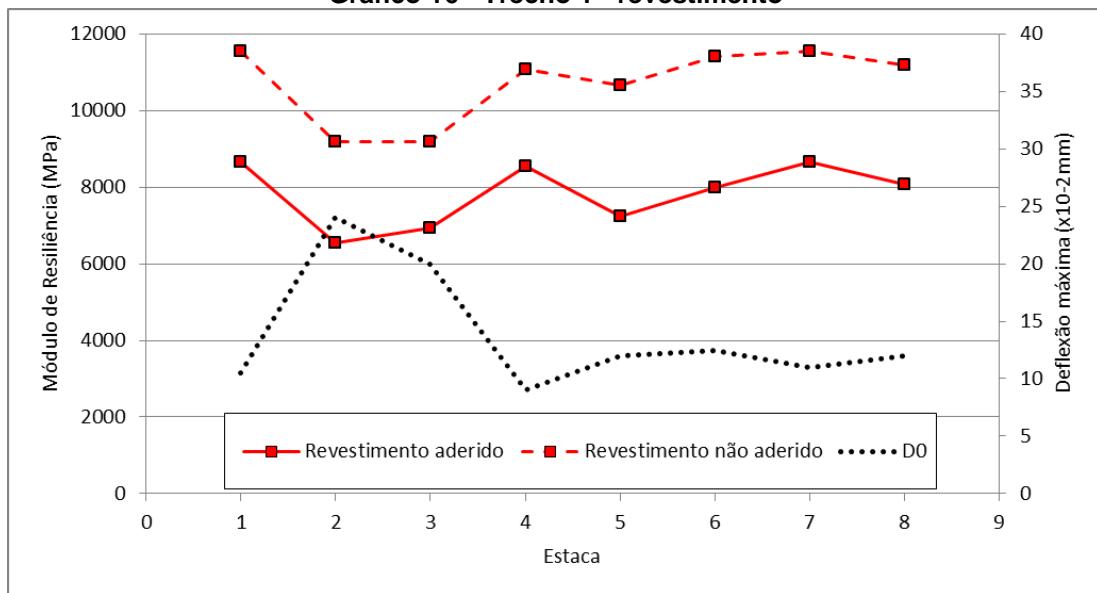
Fonte: o Autor (2020).

Os módulos de resiliência da camada de revestimento retroanalisados pelo BAKFFA apresentaram valores diferentes dos inferidos pelo BackMedina. Na consideração de aderência entre camadas houve um leve aumento de 1,8% na média dos módulos, já na condição de não aderência entre as camadas houve um aumento de 16,7%. Entretanto, estes aumentos não ocorrem nas camadas granulares e no subleito. Outro fato observado são os menores valores de coeficientes de variação dos módulos gerados pela retroanálise com o BAKFAA, ou seja, os módulos de resiliência inferidos estão mais próximos do seu valor médio.

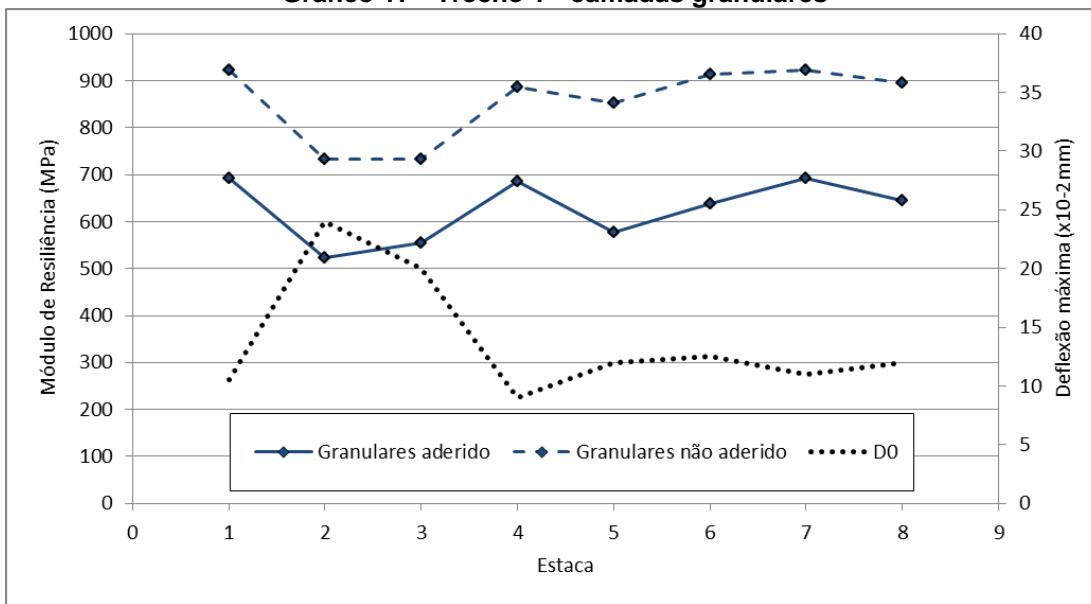
**Gráfico 15 - Trecho 1 - BAKFAA**

Fonte: o Autor (2020).

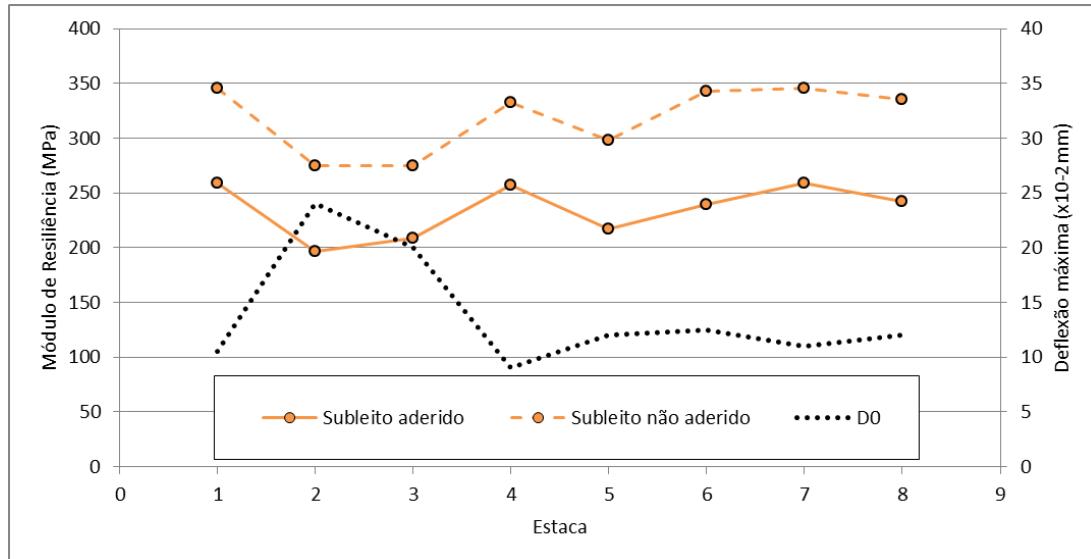
A retroanálise feita pelo BAKFAA também apresentou o comportamento de módulos resilientes esperado, onde as leituras de deflexões maiores inferem módulos menores e vice-versa. Os Gráficos 16, 17 e 18 detalham os módulos de resiliência observados no revestimento, camadas granulares e no subleito, respectivamente, e trazem os valores máximos das deflexões medidas em campo para comparação.

**Gráfico 16 - Trecho 1 - revestimento**

Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 17 - Trecho 1 - camadas granulares**

Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 18 - Trecho 1 - subleito**

Fonte: o Autor (2020).

Observando os valores de desvio padrão – DP e o delineamento dos gráficos, fica claro que os módulos de resiliência dos materiais de todas as camadas não tiveram grandes variações entre si. Além disso, analisando as duas condições de aderência propostas, percebe-se que os módulos apresentaram coeficientes de variação próximos e de valores baixos.

#### 4.2.2.2 Trecho 2

As Tabelas 26 e 27 exibem os resultados dos módulos de resiliência do revestimento, base, sub-base e subleito do Trecho 2, Rua Otto Boehm, retroanalisados pelo BAKFAA. Aqui também foram consideradas as duas condições de aderência entre os estratos do pavimento, camadas totalmente aderidas e camadas não aderidas entre si, o Gráfico 19 mostra esta comparação.

**Tabela 26 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas aderidas**

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)				
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito	Erro (µm)
B1	5747,3	459,8	459,8	172,4	10,4
B2	5050,0	404,0	404,0	151,5	40,8
B3	5307,6	424,6	424,6	159,2	4,4
B4	6476,3	518,1	518,1	194,3	29,8
B5	7083,0	566,6	566,6	212,5	19,0
B6	8388,4	671,1	671,1	251,6	9,9
B7	8993,5	719,5	719,5	269,8	12,6
B8	5151,5	412,1	412,1	154,5	23,0
B9	8061,1	657,8	657,8	246,6	19,9
B10	7083,0	566,6	566,6	212,5	24,8
Média (MPa)	6734,2	540,0	540,0	202,5	-
DP (MPa)	1351,4	109,4	109,4	41,0	-
CV (%)	20,1	20,3	20,3	20,3	-

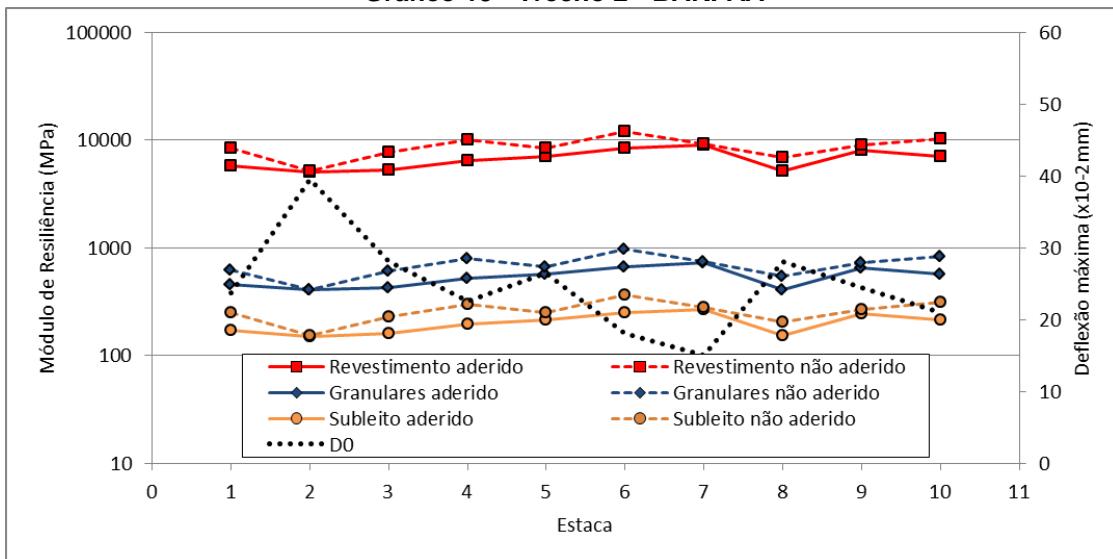
**Fonte:** o Autor (2020).

**Tabela 27 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas não aderidas**

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)				
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito	Erro (µm)
B1	8388,4	617,1	617,1	251,6	16,4
B2	5100,5	408,0	408,0	153,0	27,9
B3	7669,9	613,6	613,6	230,0	6,1
B4	10033,8	802,7	802,7	301,0	27,3
B5	8388,4	671,1	671,1	251,6	17,0
B6	12121,9	979,5	979,5	367,2	6,4
B7	9266,0	741,3	741,3	278,0	22,7
B8	6806,6	544,5	544,5	204,2	33,0
B9	8993,5	719,5	719,5	269,8	21,4
B10	10337,8	827,0	827,0	310,1	22,0
Média (MPa)	8710,7	692,4	692,4	261,6	-
DP (MPa)	1854,0	151,9	151,9	56,3	-
CV (%)	21,3	21,9	21,9	21,5	-

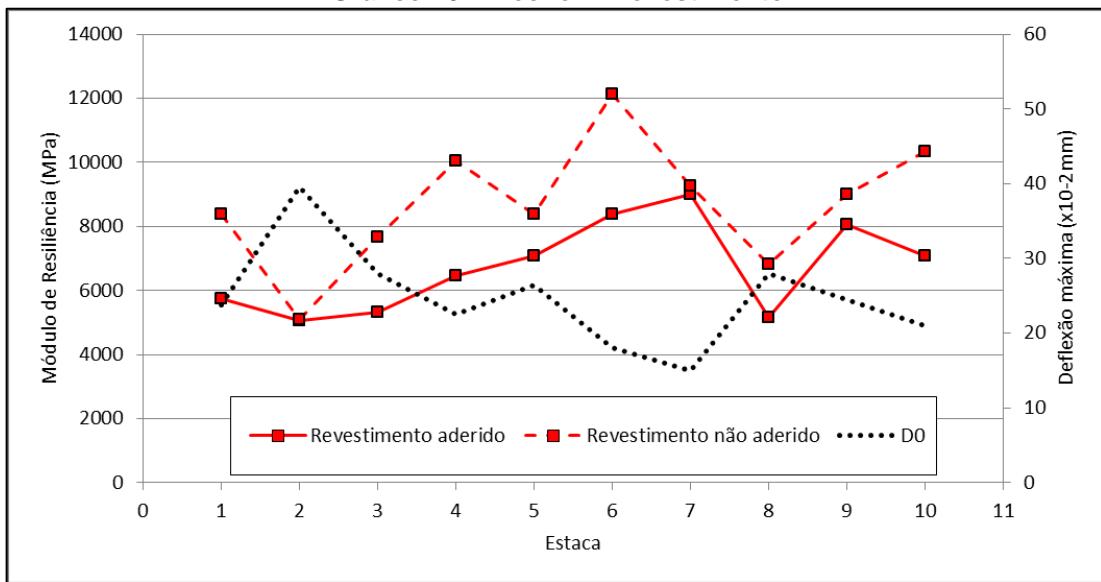
**Fonte:** o Autor (2020).

Os módulos de resiliência obtidos por retroanálise neste trecho também apresentaram valores distintos dos módulos inferidos pelo BackMedina. Por exemplo, para a consideração de camadas aderidas houve um aumento de aproximadamente 3% das médias dos módulos de resiliência dos materiais de todas as camadas.

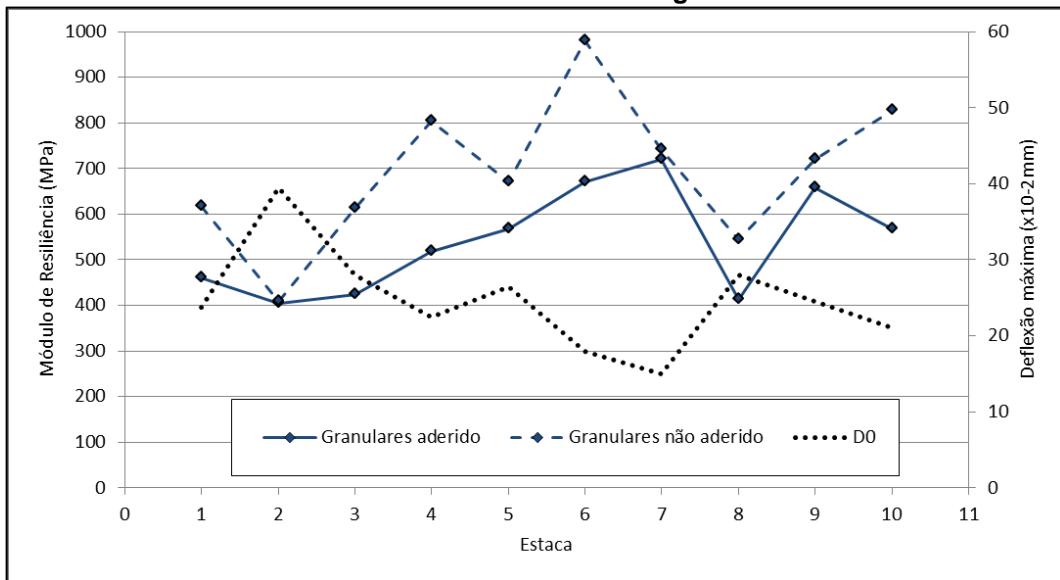
**Gráfico 19 - Trecho 2 - BAKFAA**

Fonte: o Autor (2020).

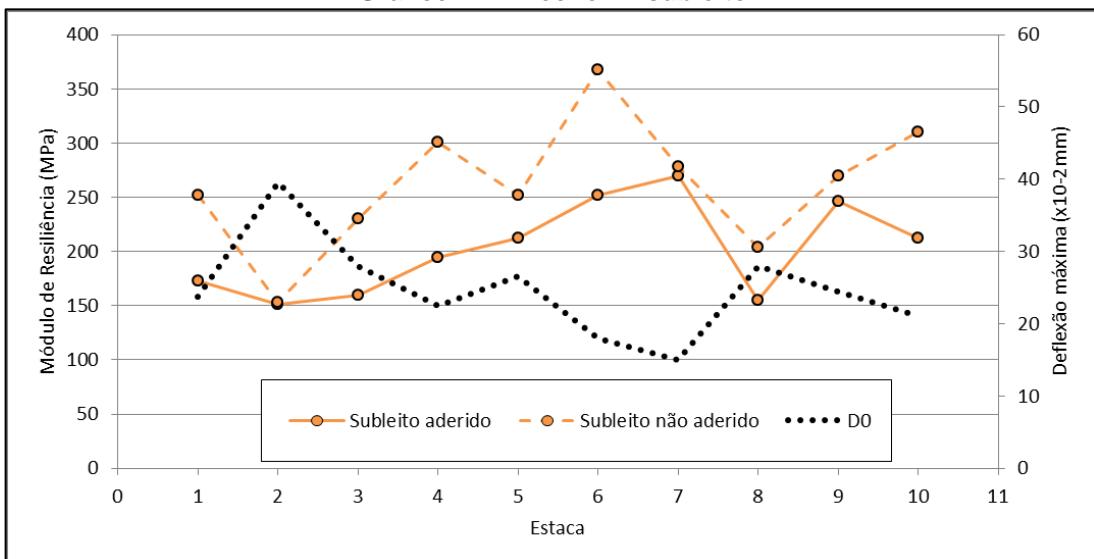
Os Gráficos 20, 21 e 22 detalham os módulos de resiliência observados no revestimento, camadas granulares e no subleito, respectivamente, e trazem os valores máximos das deflexões medidas em campo.

**Gráfico 20 - Trecho 2 - revestimento**

Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 21 - Trecho 2 - camadas granulares**

Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 22 - Trecho 2 - subleito**

Fonte: o Autor (2020).

Como também ocorrido no Trecho 1 aqui se observam coeficientes de variação menores que 30%, independentemente da condição de aderência entre camadas.

#### 4.2.2.3 Trecho 3

As Tabelas 28 e 29 exibem os resultados dos módulos de resiliência do revestimento, base, sub-base e subleito do Trecho 3, Rua São Borja, retroanalisisados pelo BAKFAA. Também foram consideradas as duas condições de aderência entre

os estratos do pavimento, camadas totalmente aderidas e camadas não aderidas entre si, o Gráfico 23 mostra esta comparação.

**Tabela 28 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas aderidas**

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)				
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito	Erro (µm)
B1	5813,8	332,2	332,2	83,0	23,2
B2	6954,1	397,4	397,4	99,3	10,8
B3	5007,7	286,2	286,2	71,5	33,4
B4	7023,7	401,3	401,3	100,3	10,2
B5	9280,3	530,3	530,3	132,5	15,4
B6	8918,2	509,6	509,6	127,3	18,3
B7	7164,9	409,4	409,4	102,3	7,9
B8	5007,7	286,2	286,2	71,5	19,4
B9	3790,0	216,6	216,6	54,1	37,7
B10	5108,4	291,9	291,9	72,9	17,0
Média (MPa)	6406,8	366,1	366,1	91,5	-
DP (MPa)	1691,7	96,7	96,7	24,1	-
CV (%)	26,4	26,4	26,4	26,4	-

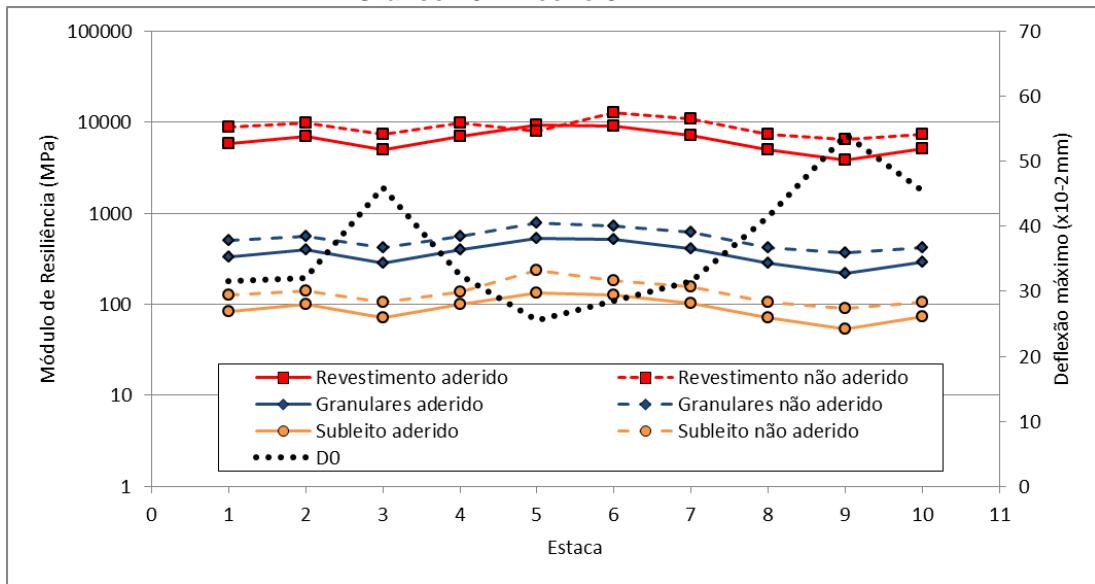
Fonte: o Autor (2020).

**Tabela 29 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas não aderidas**

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)				
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito	Erro (µm)
B1	8742,5	499,6	499,6	124,8	29,4
B2	9851,9	562,9	562,9	140,7	8,9
B3	7308,9	417,6	417,6	104,3	23,6
B4	9657,1	551,8	551,8	137,9	12,5
B5	7902,5	790,1	790,1	237,2	6,6
B6	12760,0	729,2	729,2	182,2	13,6
B7	10774,2	615,7	615,7	153,8	7,4
B8	7308,9	417,6	417,6	104,3	25,8
B9	6358,5	363,3	363,3	90,8	46,0
B10	7308,9	417,6	417,6	104,3	17,9
Média (MPa)	8797,2	536,6	536,6	138,0	-
DP (MPa)	1867,0	135,0	135,0	42,2	-
CV (%)	21,1	25,2	25,2	30,6	-

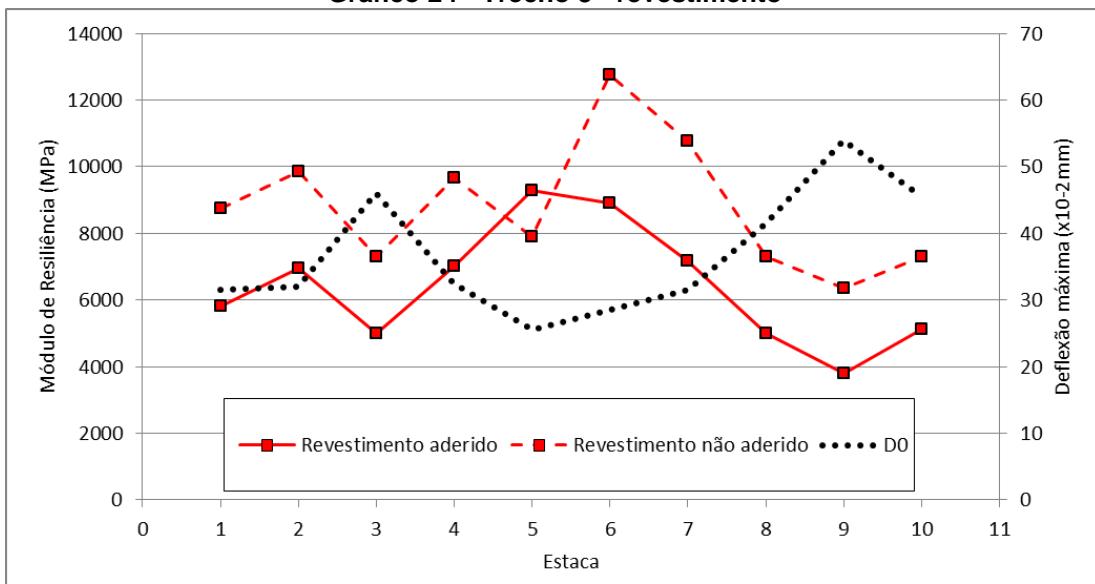
Fonte: o Autor (2020).

Fazendo uma comparação com os módulos retroanalisados pelo BackMedina na consideração de camadas totalmente aderidas se nota um aumento de 12,6% na média dos módulos do revestimento, uma diminuição de 12% na média dos módulos da base e uma diminuição de 19,6% na média do subleito. Já na condição de não aderência houve um aumento de 18% nos módulos do revestimento, diminuição de 8,6% nos módulos da base e uma diminuição de 3% nos módulos do subleito.

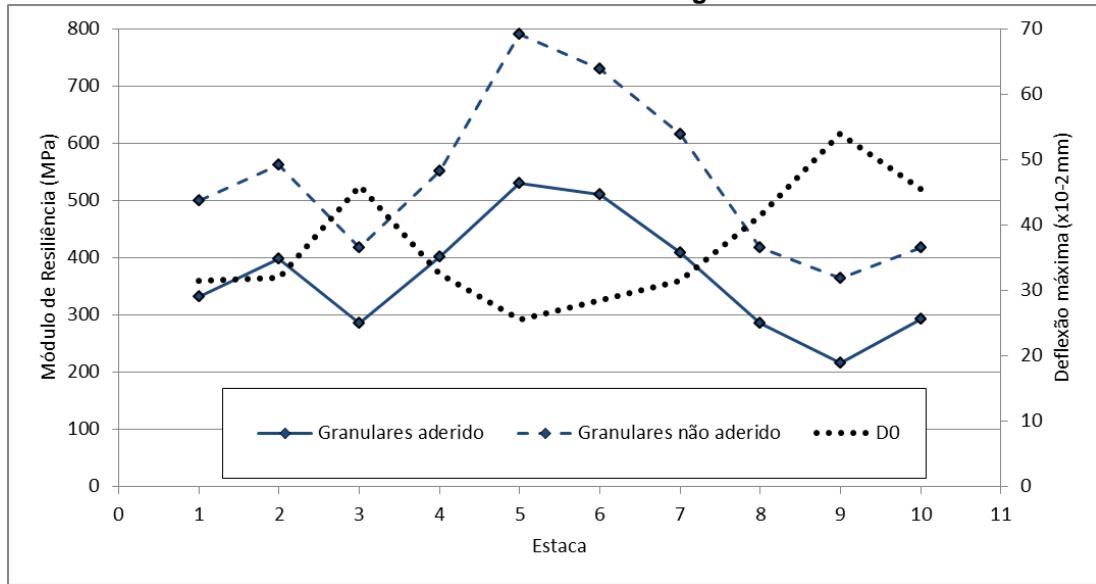
**Gráfico 23 - Trecho 3 - BAKFAA**

Fonte: o Autor (2020).

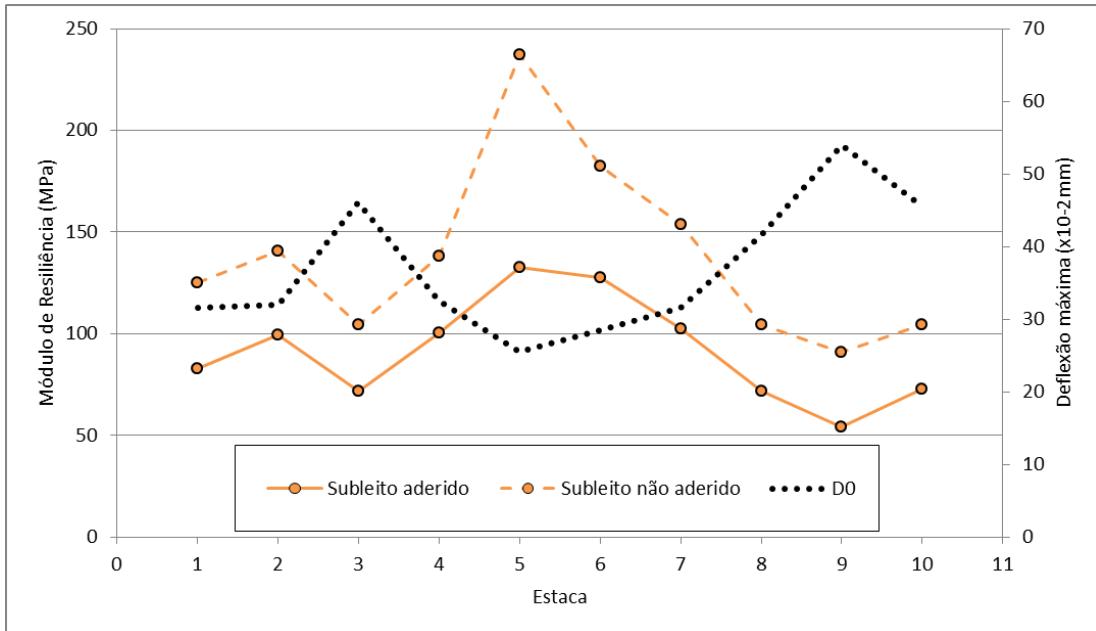
Os Gráficos 24, 25 e 26 detalham os módulos de resiliência observados no revestimento, camadas granulares e no subleito, respectivamente, e trazem também os valores máximos das deflexões medidas em campo.

**Gráfico 24 - Trecho 3 - revestimento**

Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 25 - Trecho 3 - camadas granulares**

Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 26 - Trecho 3 - subleito**

Fonte: o Autor (2020).

Analizando cada camada do pavimento observa-se que os módulos de resiliência inferidos variam de acordo com as deflexões medidas. Porém, existe a exceção da bacia B5 na consideração de camadas não aderidas que não apresentou o mesmo comportamento, sendo o único dado de módulo resiliente inferior ao módulo na consideração de camadas aderidas. O fato da bacia B5 apresentar uma diminuição no seu módulo de resiliência do revestimento não é esperado, pois uma vez que a deflexão máxima medida é pequena se espera uma

rigidez maior, ou seja, um módulo de resiliência maior. Isso ocorreu devido à tentativa de atendimento do critério de aceitação da retroanálise, onde se buscou um erro um baixo que acabou acarretando em um módulo resiliente destoante dos demais.

Em relação aos erros das retroanálise no caso do programa BAKFAA os mesmo critérios de aceitação são válidos, porém, como já abordado, não foram plenamente atendidos para que se evitassem valores de módulos irreais. Sendo assim, os menores erros que representam as melhores correlações de retroanálise no Trecho 1 foi a bacia B5 com 9,7 µm nas camadas aderidas e 9,8 µm nas não aderidas, no Trecho 2 foi a bacia B3 com 4,4 µm nas camadas aderidas e 6,1 µm nas não aderidas e no Trecho 3 foi a bacia B7 com 7,9 µm nas camadas aderidas e 7,4 µm nas camadas não aderidas, com a ressalva da bacia B5 que apresentou um erro de 6,6 µm mas que gerou um módulo de resiliência não esperado.

#### 4.2.3 Comparação entre os diferentes softwares

Tanto o BackMedina quanto o BAKFAA são programas de análise de camadas elásticas que inferem módulos de resiliência aos materiais de um pavimento e, apesar de desempenharem as mesmas funções, os programas apresentam diferentes resultados perante os mesmos dados de entrada, seja pela metodologia inerente ao processamento ou pelas escolhas e análises realizadas pelo usuário. A seguir essas diferenças são discutidas.

##### 4.2.3.1 Trecho 1

Os módulos de resiliência retroanalisados apresentaram constância em grande parte da extensão do trecho, visto os valores obtidos a partir da estaca 4, em ambos os programas. Como pode ser observado na Tabela 15 de retroanálise pelo BackMedina na consideração de aderência entre estratos, por exemplo, os módulos de resiliência da camada de revestimento variam entre 8429 MPa e 9709 MPa, já na Tabela 21 de retroanálise pelo BAKFAA na mesma condição de aderência, estes mesmos módulos variam de 7225,4 MPa a 8642,6 MPa. O mesmo se observa nas demais camadas, onde os módulos dos outros materiais não diferem muito entre si.

Entretanto, as bacias B2 e B3 se destacam por apresentarem valores de módulos menores, destoando dos demais e tornando os coeficientes de variação – CV dos módulos das camadas mais altos. Como mostra a Tabela 15 de retroanálise

pelo BackMedina os valores dos módulos do revestimento de B2 e B3 são de 2087 MPa e 3178 MPa, respectivamente, já a Tabela 21 de retroanálise pelo BAKFAA estes valores são de 6541 MPa e 6843,4 MPa, respectivamente. Observando os valores das deflexões medidas já se espera que os módulos resilientes destas estacas sejam menores, uma vez que os deslocamentos máximos foram os maiores observados no trecho.

Observando os módulos de resiliência retroanalisados e confrontando-os com as deflexões máximas medidas em campo, nota-se a tendência de maiores deslocamentos verticais gerarem menores módulos e os menores deslocamentos gerarem maiores módulos resilientes. Este comportamento já era esperado e foi observado nos resultados de ambos os programas. Neste quesito o que diferencia os softwares é o fato de o BAKFAA inferir um conjunto de módulos menos dispersos, gerando coeficientes de variação – CV iguais para todas as camadas e tornando as bacias de deflexões calculadas mais suavizadas. Isso ocorre pelo fato de o programa iniciar o seu processamento a partir de uma bacia de deflexões teórica calculada a partir de “módulos semente” dados pelo usuário e, só então, se inicia a retroanálise de modo que esta bacia permaneça sempre constante.

O erro da retroanálise representa o quão distantes estão as bacias deflectométricas medidas em campo das calculadas pelo software, em  $\mu\text{m}$ . O fato de o BAKFAA inferir módulos de resiliência às camadas fazendo o ajuste de uma bacia de deflexão inicial de modo que os seus deslocamentos verticais se mantenham proporcionais acarreta em erros de retroanálise mais constantes, como pode ser observado nas Tabelas 21 e 22 que apresentam erros em torno de 12  $\mu\text{m}$ , independente da condição de aderência analisada. Estes erros semelhantes não são observados nas retroanálises feitas pelo BackMedina que, de acordo com as Tabelas 15 e 16, apresentaram erros em torno de 8  $\mu\text{m}$  e 16  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

#### 4.2.3.2 Trecho 2

Todos os materiais das camadas que compõem este pavimento apresentaram módulos de resiliência menores comparados ao Trecho 1. O que se observou neste caso foi que os módulos inferidos a todas as camadas pelos dois softwares não tiveram grandes diferenças numéricas na consideração de camadas aderidas, porém este comportamento não é visto na condição de não aderência. Isto pode ser constatado fazendo a comparação das médias dos módulos de resiliência das

Tabelas 17 e 23 de camadas aderidas, onde os revestimentos, por exemplo, apresentaram rigidez de 6502,7 MPa e 6734,2 MPa, respectivamente, já nas Tabelas 18 e 24 de camadas não aderidas estas médias dos módulos foram de 7713,8 MPa e 8710,7 MPa, respectivamente, uma diferença de quase 1000 MPa. Este mesmo fato faz com que os coeficientes de variação dos módulos sejam menores para as retroanálises na condição de camadas aderidas.

Algo importante a se destacar são as bacias B5 e B9 que na retroanálise feita pelo BackMedina apresentaram módulos de resiliência menores que as demais bacias, tanto no revestimento quanto na camada de base. O local de medição da bacia B5, por exemplo, apresentou rigidez de 4757,0 MPa no revestimento e 380,0 MPa na base considerando as camadas aderidas, sendo que as médias dos módulos de resiliência destas camadas são, respectivamente, 6502,7 MPa e 523,2 MPa, valores bem acima dos inferidos. Esta diminuição pontual da rigidez das camadas representa um defeito estrutural neste pavimento, podendo causar deformações permanentes na pista.

Por outro lado, a retroanálise feita pelo BAKFAA não mostra a mesma degradação estrutural nestas localidades da pista, mas sim uma diminuição da rigidez na estaca da bacia B2. Levando em consideração que a deflexão máxima na estaca 2 foi a maior medida feita no trecho, espera-se que este ponto apresente uma rigidez menor que a dos outros pontos. Porém, antes de se concluir que este software inferiu um valor de rigidez mais próximo da realidade a este ponto da pista, deve-se observar o erro da retroanálise de 40,8  $\mu\text{m}$  na condição de aderência entre camadas, o maior erro registrado neste trecho, sugerindo que o módulo resiliente deste local possa não ser tão representativo.

#### 4.2.3.3 Trecho 3

Observando apenas as deflexões máximas percebe-se que os levantamentos nas estacas 3 e 9 foram as maiores deflexões medidas em campo, assim se espera que nestes locais os módulos de resiliência inferidos sejam menores. O processo de retroanálise realizado pelo BAKFAA comprovou isso, sendo os resultados dos módulos de resiliência na consideração de camadas aderidas igual a 5007,7 MPa no revestimento da bacia B3 e 3790,0 MPa no revestimento da bacia B9, valores abaixo da média de rigidez do trecho que foi de 6406,8 MPa. Já na consideração de camadas não aderidas o módulo do revestimento da bacia B9 foi de 6358,5 MPa,

valor abaixo da média de 8797,2 MPa. O mesmo ocorreu nos módulos inferidos às camadas granulares a ao subleito.

Entretanto, a retroanálise feita pelo software BackMedina não inferiu menores módulos resilientes à estas estacas. Na consideração de camadas aderidas o programa inferiu módulos de resiliência menores de revestimento às bacias B1, B8 e B9 com valores de 3362,0 MPa, 3056,0 MPa e 3519,0 MPa, respectivamente, sendo a média dos módulos do trecho igual a 5690,7 MPa. Já na consideração de não aderência os módulos se mantiveram com considerável constância, visto os desvios padrões calculados. Mesmo que o software BAKFAA tenha apresentado resultados aparentemente mais coerentes, não se pode esquecer que a retroanálise é feita considerando toda a bacia de deflexões geradas pela carga de ensaio, ou seja, não se podem avaliar os módulos de resiliência inferidos pelos programas tendo como parâmetro principal a deflexão máxima medida, mas sim todas as deflexões em torno do carregamento principal e os erros resultantes das retroanálises.

O Trecho 3 foi o que apresentou os menores módulos de resiliência de subleito, tanto pela retroanálise realizada através do BackMedina que apresentou médias de 113,8 MPa e 142,3 MPa nas duas considerações de aderência, quanto através do BAKFAA que apresentou médias de rigidez iguais a 91,5 MPa e 138,0 MPa. Os módulos de resiliência do subleito são dependentes da constituição mineralógica dos solos e a integridade estrutural de um pavimento se relaciona com a sua idade. Contudo, visto que este pavimento tem mais de vinte anos, a tendência é de que a rigidez do seu subsolo tenha diminuído com o passar do tempo e pelo uso desta estrutura, ou ainda, que os baixos módulos de resiliência sejam resultantes da má compactação da camada de subleito em decorrência da época da sua execução.

Contudo, percebe-se que existe uma diferença entre os processos iterativos dos softwares. O BAKFAA cria uma bacia inicial de acordo com os parâmetros dos materiais e carregamento fornecidos pelo usuário e, posteriormente, fez o ajuste desta bacia de maneira proporcional, sem grandes alterações no seu delineamento, apenas aproximando esta bacia teórica da bacia medida, causando pequenas modificações entre as rigidezes de cada camada. Isto já não é observado no BackMedina que faz a retroanálise dos módulos sem a restrição do delineamento de uma bacia predeterminada, mas sim inferindo os módulos de cada camada independentemente, buscando o melhor ajuste entre bacias medidas e bacias

calculadas. Este fato também explica o motivo dos erros de retroanálise do BackMedina serem menores que os do BAKFAA.

Outro fato interessante a ser mencionado são os altos valores de módulos de resiliência inferidos pelos dois softwares, principalmente nas camadas de revestimento, comparados aos módulos obtidos por outros autores mencionados no item 2.4.1. Foi levantada a hipótese de que os módulos de resiliência inseridos pelo usuário nos softwares para dar início ao processo de retroanálise interferissem nos resultados dos módulos inferidos, porém esta suposição foi descartada pela averiguação de que independentemente dos módulos de partida, sejam eles extremamente altos ou baixos, sempre resulta em módulos retroanalizados que convergem a um mesmo valor.

As rigidezes altas encontradas nas camadas e até mesmo os grandes erros das retroanálises são causados pela abordagem empírica adotada pelo levantamento deflectométrico com viga Benkelman que está sujeita a erros sistemáticos e grosseiros por parte do operador, haja vista algumas bacias de deflexão medidas, mostradas no Anexo A, que apresentam maiores deslocamentos verticais em pontos mais afastados do carregamento principal. Além disso, fazer a análise desses dados obtidos de maneira empírica através de uma metodologia mecanística, que é o caso das retroanálises pelos dois programas, também gera resultados com grandezas inesperadas, mas que mesmo assim não deixa de representar a estrutura dos pavimentos avaliados.

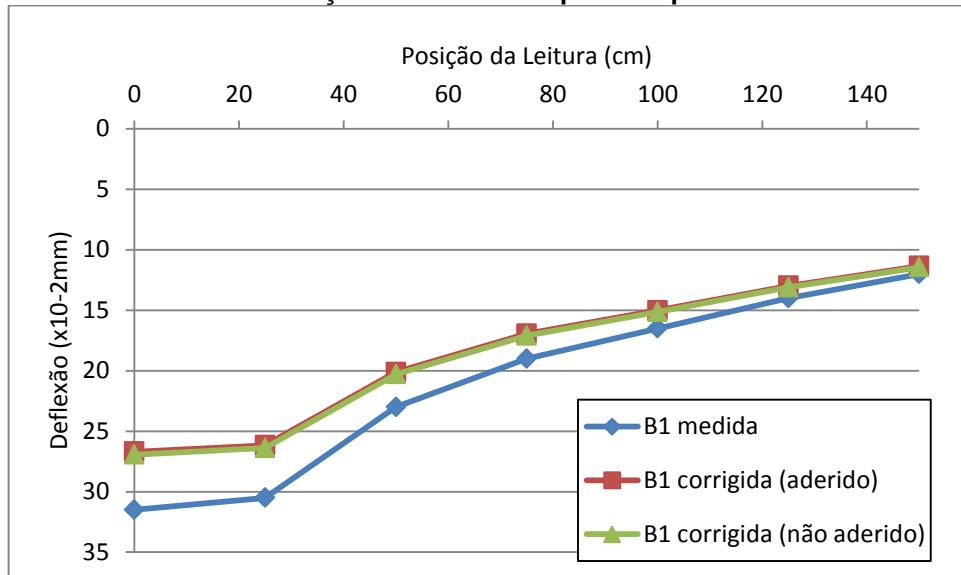
#### 4.3 CORREÇÃO DAS DEFLEXÕES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

A temperatura altera a rigidez dos materiais que compõem as camadas de um pavimento, principalmente os revestimentos asfálticos com ligantes termossensíveis. Como já abordado a variação de temperatura exerce influência na capacidade de distribuição de tensões impostas pelo tráfego de veículos afetando as deflexões, principalmente as medidas mais próximas ao carregamento. Com o intuito de padronizar as leituras de deflexão feitas em campo, aplicou-se a metodologia de Pais *et al.* (2018, tradução nossa) para a correção das bacias determinadas em relação a uma temperatura de referência de 20°C.

Para fins de exemplificação, o Gráfico 27 apresenta a primeira bacia deflectométrica do Trecho 3, Rua São Borja, como foi medida em campo, a correção

de temperatura utilizando os módulos de resiliência retroanalisados do subleito considerando as camadas aderidas e também a correção considerando as camadas não aderidas.

**Gráfico 27 - Correção das deflexões para temperatura de 20°C**



Fonte: o Autor (2020).

Como esperado as deflexões corrigidas são menores que as medidas, uma vez que a temperatura do pavimento durante o ensaio era maior que a temperatura usada para a correção, o que aconteceu também em todas as medidas de deflexão de todos os trechos. No caso desta bacia, causar a diminuição de 7,48°C para trazer à temperatura de referência, resultou em uma diferença de aproximadamente 5 centésimos de milímetro no deslocamento vertical máximo. Também é observada uma desprezível diferença nas deflexões corrigidas levando em consideração os módulos de resiliência dependentes das condições de aderência, que se explica pelo fato de os módulos do subleito obtidos nas retroanálises não apresentarem grandes diferenças nos estados de aderência e não aderência entre camadas. As demais bacias corrigidas são apresentadas no Apêndice A.

#### 4.3.1 Módulos de resiliência retroanalisados pelo BackMedina a partir das bacias corrigidas em função da temperatura

A partir das bacias de deflexão geradas pelo ensaio de viga Benkelman, adaptadas pela metodologia de Theisen *et al.* (2009) e corrigidas à temperatura padrão, foram determinados os módulos de resiliência de todas as camadas

constituintes dos pavimentos estudados. A seguir são apresentados graficamente os módulos de resiliência de todas as camadas dos trechos obtidos pelo software BackMedina, bem como o detalhamento de cada estrato e seus parâmetros de estatística descritiva: média, desvio padrão – DP e coeficiente de variação – CV.

#### 4.3.1.1 Trecho 1

As Tabelas 30 e 31 exibem os resultados dos módulos de resiliência do revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito do Trecho 1, Avenida Santos Dumont, retroanalisados pelo BackMedina a partir das bacias corrigidas à temperatura de 20°C. Foram consideradas duas condições de aderência entre os estratos do pavimento, camadas totalmente aderidas e camadas não aderidas entre si, o Gráfico 28 mostra esta comparação.

**Tabela 30 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas aderidas com correção de temperatura**

Bacia	Módulo de resiliência (MPa)						Erro (µm)
	Revestimento	Base	Sub-base	Reforço	Subleito		
B1	10431	836	836	836	314	15,8	
B2	6755	558	558	558	209	16,2	
B3	6966	558	558	558	209	13,7	
B4	9835	788	788	788	295	12,7	
B5	9835	788	788	788	295	7,4	
B6	10819	867	867	867	325	8,5	
B7	9835	778	778	778	295	11,7	
B8	9835	778	778	778	295	10,0	
Média(MPa)	9288,9	746,4	746,4	746,4	279,6	-	
DP (MPa)	1442,9	112,1	112,1	112,1	42,1	-	
CV (%)	15,5	15,0	15,0	15,0	15,0	-	

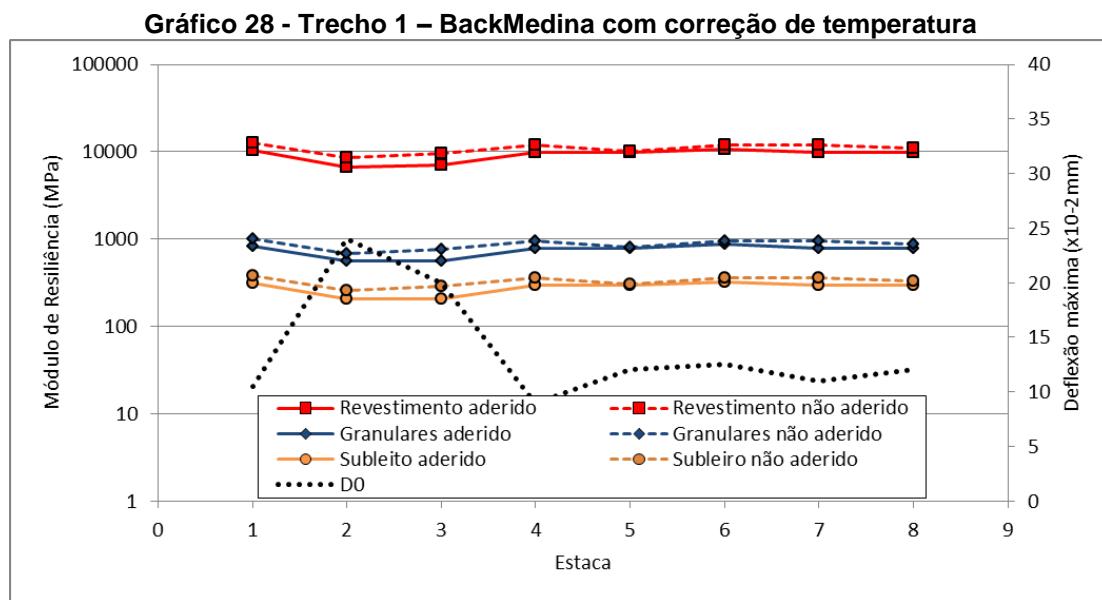
Fonte: o Autor (2020).

**Tabela 31 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas não aderidas com correção de temperatura**

Bacia	Módulo de resiliência (MPa)						Erro (µm)
	Revestimento	Base	Sub-base	Reforço	Subleito		
B1	12739	1020	1020	1020	383	20,0	
B2	8621	691	691	691	259	18,9	
B3	9483	760	760	760	285	14,0	
B4	12011	961	961	961	361	17,8	
B5	10058	806	806	806	302	20,1	
B6	12011	961	961	961	361	16,8	
B7	12011	961	961	961	361	17,0	
B8	10919	874	874	874	328	19,1	
Média(MPa)	10981,6	879,2	879,2	879,2	330,0	-	
DP (MPa)	1366,7	108,9	108,9	108,9	41,1	-	
CV (%)	12,4	12,4	12,4	12,4	12,5	-	

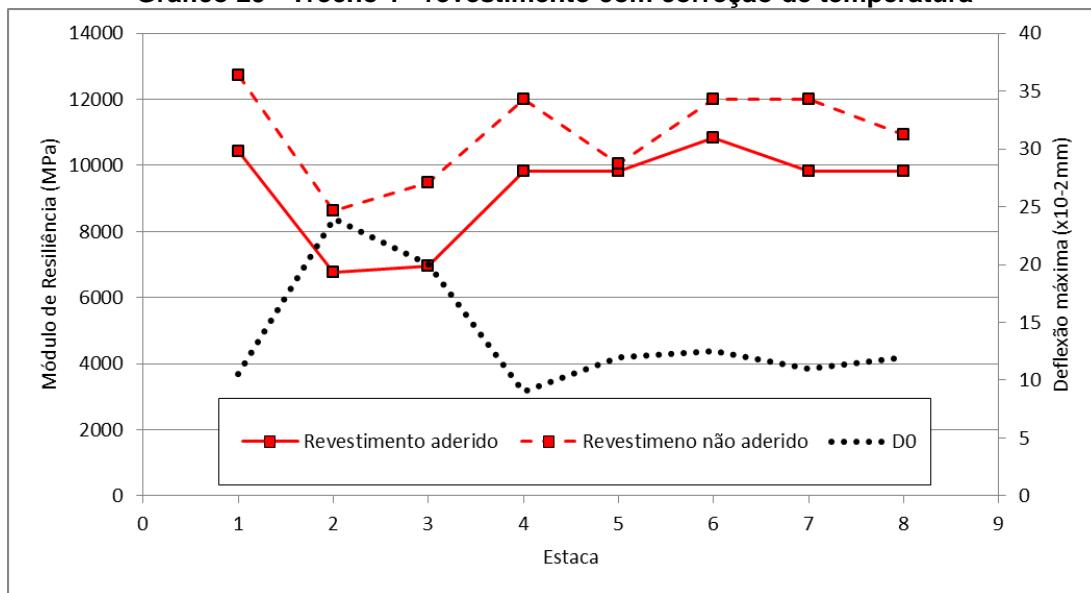
Fonte: o Autor (2020).

Do mesmo modo como foi observado nas retroanálises realizadas sem a correção da temperatura, no item 4.2.1.1, os módulos de resiliência na consideração de aderência total entre camadas são inferiores aos módulos na consideração de não aderência. A comparação mostra que houve um enrijecimento da estrutura como um todo. Este aumento da rigidez já era esperado, visto que a temperatura do pavimento no dia do ensaio estava em torno de 34,03°C e as bacias deflectométricas foram corrigidas para a temperatura de 20°C.



Como esperado, o comportamento resiliente da estrutura do pavimento se mostrou de acordo com as deflexões medidas em campo, onde nos pontos de maiores deslocamentos verticais os processos iterativos de retroanálise resultaram em módulos de resiliência menores e vice-versa. As estacas 2 e 3, como na análise anterior, apresentaram os menores valores de rigidez, onde seus módulos de resiliência retroanalisados foram menores que a média do trecho. Os maiores valores de rigidez se encontram na estaca 6 na condição de aderência com 10819,0 MPa e na estaca 1 na condição de não aderência com 12739,0 MPa.

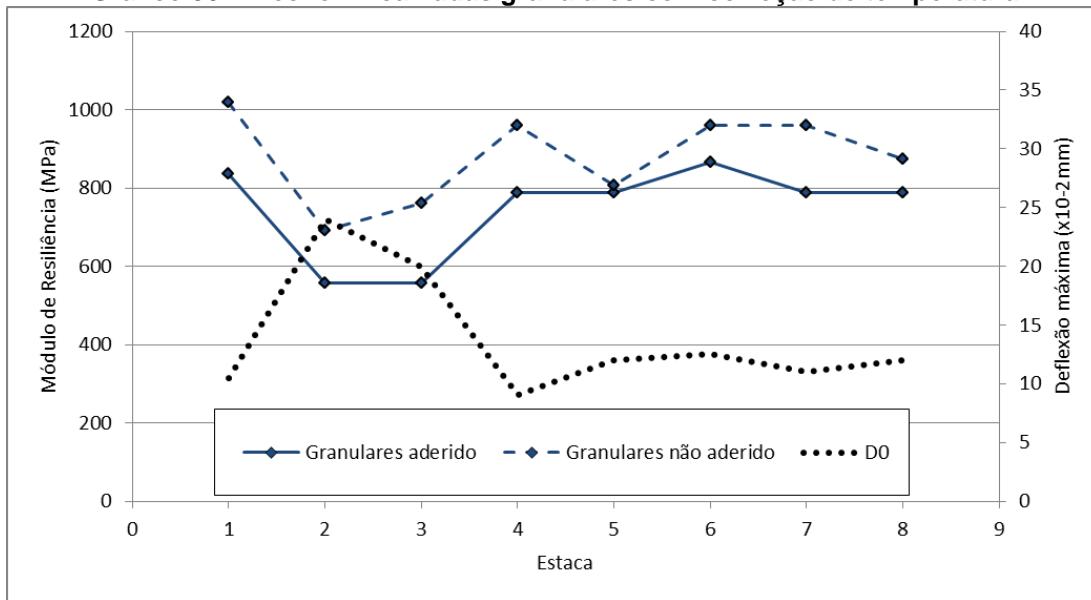
Os Gráficos 29, 30 e 31 detalham os módulos de resiliência observados no revestimento, camadas granulares e no subleito, respectivamente, e trazem os valores máximos das deflexões medidas em campo. Aqui algumas comparações com o item 4.2.1.1 são feitas.

**Gráfico 29 - Trecho 1 - revestimento com correção de temperatura**

Fonte: o Autor (2020).

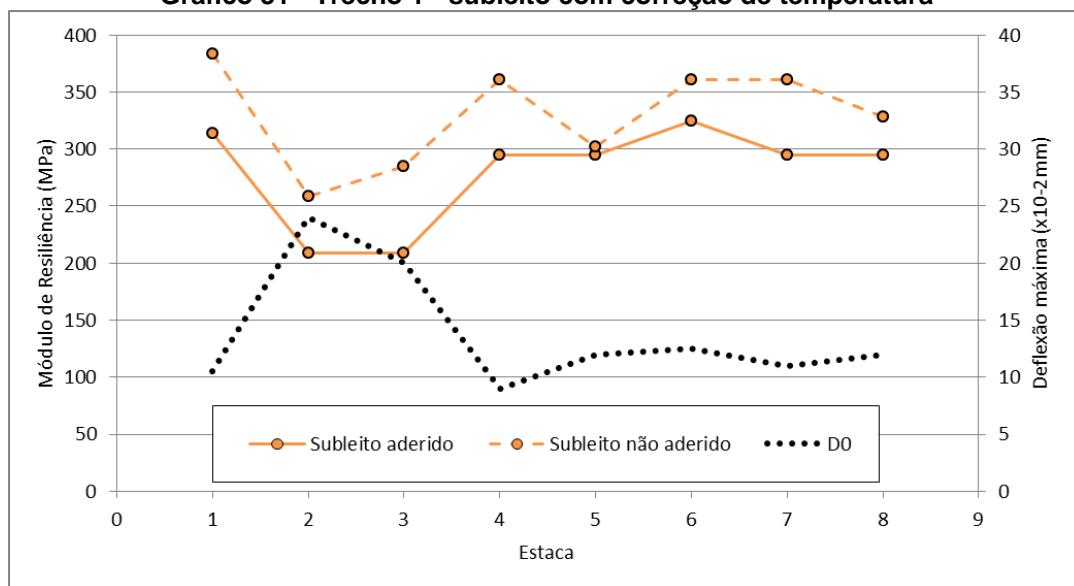
Fazendo a análise entre os Gráficos 4 e 29 se percebe que os módulos de resiliência não tiveram o mesmo aumento em todas as estacas ensaiadas. Como, por exemplo, a estaca 1 na condição de aderência, onde a correção das deflexões resultou em um aumento de aproximadamente 17% do módulo de resiliência, em contrapartida, na estaca 8, este aumento foi de apenas 1%. Além disso, pode-se destacar o ocorrido no segmento entre a estaca 4 e 5, que na consideração de aderência apresentou um aumento de 8429,0 MPa para 9706,0 MPa sem a correção da temperatura, já após a correção os módulos não mostraram este aumento, permanecendo iguais a 9835,0 MPa.

A estaca número 5 do Gráfico 4 chama atenção por apresentar um módulo de resiliência na condição de não aderência menor que o módulo na condição de aderência, fato que não ocorreu após as correções das bacias de deflexão. Este módulo resiliente deveria ter aumentado proporcionalmente como os demais, pois a correção deflectométrica em função da temperatura não implica em mudanças na estrutura do pavimento. Este ocorrido explicita o fato da dependência da sensibilidade do operador durante o processo de retroanálise.

**Gráfico 30 - Trecho 1 - camadas granulares com correção de temperatura**

Fonte: o Autor (2020).

Analizando os Gráficos 5 e 30 é possível perceber a maior estabilidade dos módulos de resiliência das camadas granulares após a correção das deflexões, visto os menores coeficientes de variação. O módulo de resiliência da base da estaca 2, por exemplo, na condição de aderência era de 220,0 MPa e após a correção apresentou um módulo de 558 MPa, um aumento de 153%, o que não ocorre nos módulos das estacas 1 e 4 na mesma condição de aderência que apresentaram um aumento de aproximadamente 17%. Estas grandes diferenças entre os módulos das estacas evidenciam a influência do operador no processo de retroanálise.

**Gráfico 31 - Trecho 1 - subleito com correção de temperatura**

Fonte: o Autor (2020).

No que diz respeito à camada de subleito, fazendo a comparação entre os Gráficos 6 e 31, todos os módulos de resiliência retroanalisados apresentaram um aumento após a correção das bacias em função da temperatura, exceto as estaca 2 e 3 na condição de aderência. A estaca 2 apresentou uma diminuição de 9% do seu módulo, caindo de 230,0 MPa para 209,0 MPa e a estaca 3 não apresentou diferença de rigidez, permanecendo com 209,0 MPa.

#### 4.3.1.2 Trecho 2

As Tabelas 32 e 33 exibem os resultados dos módulos de resiliência do revestimento, base, sub-base e subleito do Trecho 2, Rua Otto Boehm, retroanalisados pelo BackMedina a partir das bacias corrigidas à temperatura de 20°C. Também foram consideradas duas condições de aderência entre os estratos do pavimento, camadas totalmenteaderidas e camadas não aderidas entre si, o Gráfico 32 mostra esta comparação.

**Tabela 32 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas aderidas com correção de temperatura**

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)					Erro (µm)
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito		
B1	7663	614	614	219	11,5	
B2	7663	614	614	105	12,0	
B3	6966	558	558	209	3,8	
B4	8621	691	691	259	24,4	
B5	7389	592	592	222	18,6	
B6	8941	716	716	268	12,8	
B7	8128	651	651	244	19,4	
B8	6966	558	558	174	19,2	
B9	8128	651	651	244	20,5	
B10	8621	691	691	259	22,8	
Média (MPa)	7908,6	633,6	633,6	220,3	-	
DP (MPa)	659,1	52,8	52,8	46,9	-	
CV (%)	8,3	8,3	8,3	21,3	-	

Fonte: o Autor (2020).

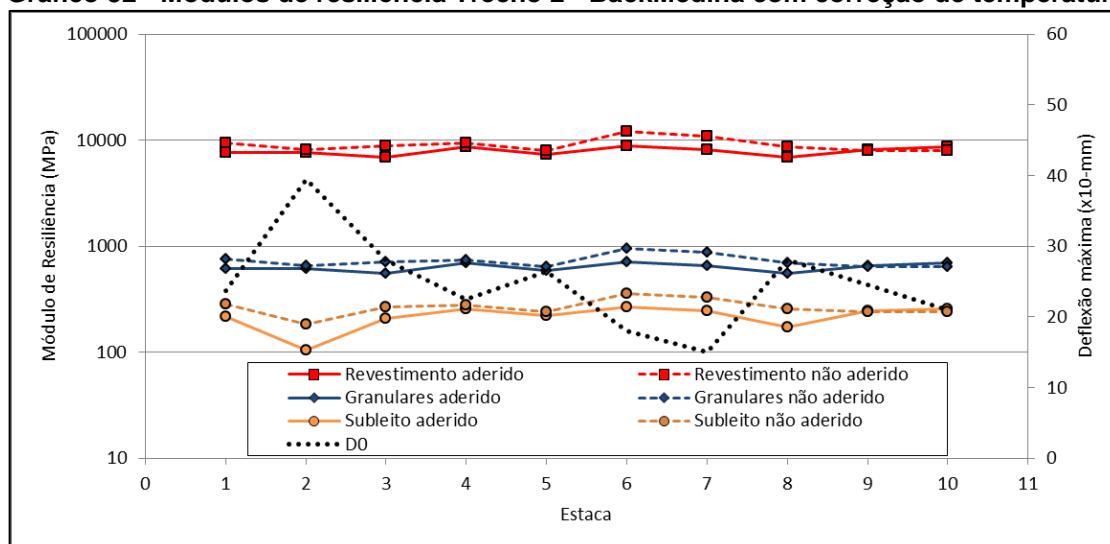
**Tabela 33 - Módulo de resiliência Trecho 2 - camadas não aderidas com correção de temperatura**

Bacia	Revestimento	Módulo de Resiliência (MPa)			Erro ( $\mu\text{m}$ )
		Base	Sub-base	Subleito	
B1	9483	760	760	285	19,4
B2	8128	651	651	184	23,1
B3	8941	716	716	268	10,4
B4	9359	749	749	281	36,0
B5	8022	642	642	241	32,5
B6	12011	961	961	361	12,7
B7	10919	874	874	328	21,8
B8	8621	691	691	259	26,7
B9	8022	642	642	241	40,2
B10	8022	642	642	241	45,4
Média (MPa)	9152,8	732,8	732,8	268,9	-
DP (MPa)	1290,5	103,2	103,2	46,9	-
CV (%)	14,1	14,1	14,1	17,4	-

**Fonte:** o Autor (2020).

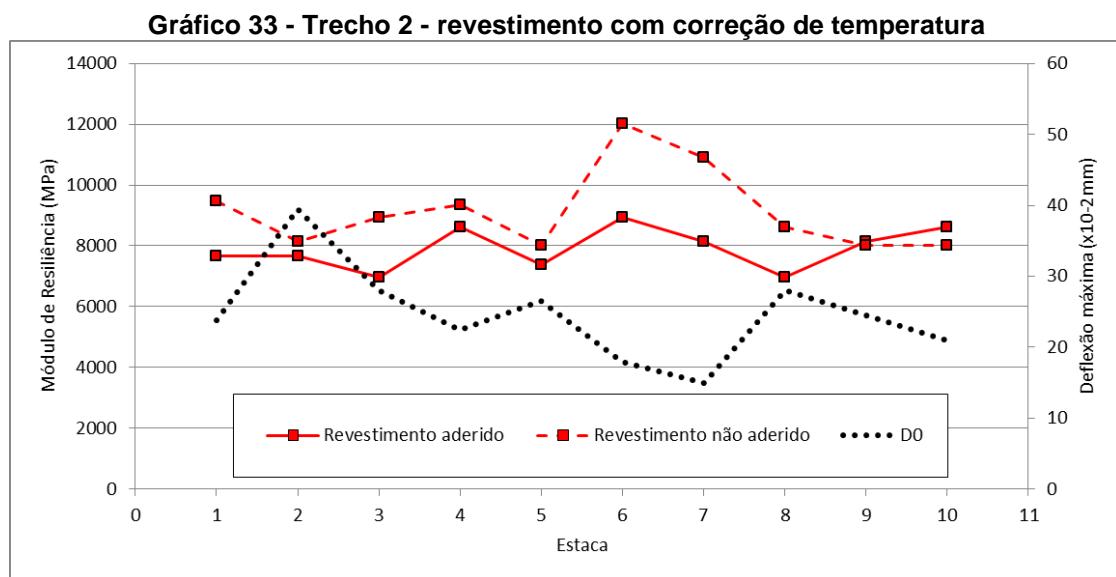
No Trecho 2, fazendo uma comparação com o item 4.2.1.2, também foi constatado o aumento da rigidez das camadas após a correção das deflexões em função da temperatura. Porém, enquanto a média dos módulos de resiliência do revestimento cresceu de 7713,8 MPa para 9152,8 MPa na consideração de não aderência entre camadas, as médias dos módulos das camadas granulares apresentou uma leve diminuição, de 739,3 MPa para 732,8 MPa. As médias dos módulos das demais camadas também tiveram um aumento, comparadas com a retroanálise sem a correção das deflexões, independente da condição de aderência.

**Gráfico 32 - Módulos de resiliência Trecho 2 - BackMedina com correção de temperatura**



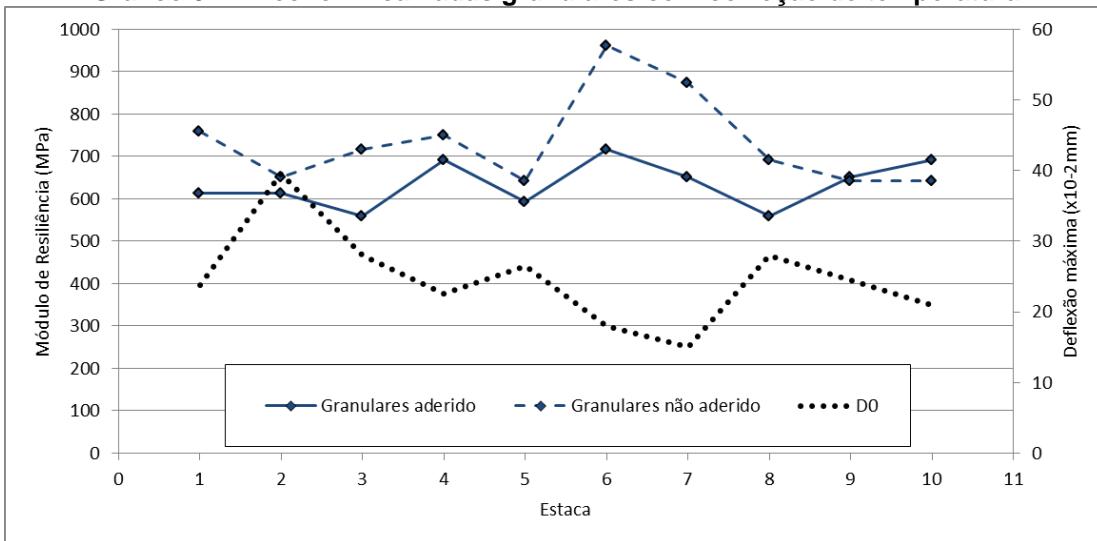
**Fonte:** o Autor (2020).

O comportamento resiliente dos materiais apresentou variações de acordo com as deflexões medidas em campo, sendo que os maiores módulos de resiliência foram constatados na estaca de número 6. Os Gráficos 33, 34 e 35 detalham os módulos de resiliência observados no revestimento, camadas granulares e no subleito, respectivamente, e trazem os valores máximos das deflexões medidas em campo.



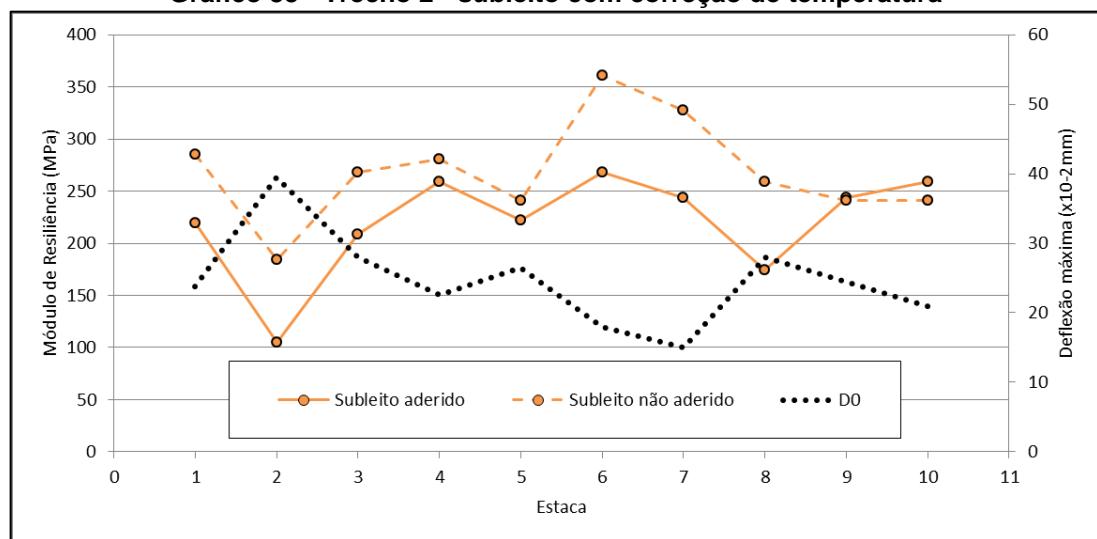
Fonte: o Autor (2020).

Confrontando o Gráfico 33 com o Gráfico 8 do revestimento da Rua Otto Boehm nota-se que na estaca 4, após a correção das deflexões em função da temperatura, não houve uma diminuição excessiva no módulo de resiliência na consideração de não aderência entre camadas. Porém, como abordado anteriormente, este fato não se deve a correção da temperatura em si, mas sim a sensibilidade de operação na utilização do software. No caso do Gráfico 8 o módulo inferido na condição de não aderência foi de 6759,0 MPa, enquanto o módulo na condição de aderência foi de 7389,0 MPa, com erros de retroanálise de 24,4 µm e 27,2 µm, respectivamente. Já no Gráfico 33 o módulo inferido na condição de não aderência foi de 9359,0 MPa, enquanto que na condição de aderência ele foi de 8621,0 MPa, com erros de 36,0 µm e 24,4 µm, respectivamente, evidenciando que a tentativa da obtenção do menor erro possível de retroanálise pode gerar módulos de resiliência irreais.

**Gráfico 34 - Trecho 2 - camadas granulares com correção de temperatura**

Fonte: o Autor (2020).

Assim como na camada de revestimento, os maiores valores de módulos de resiliência das camadas granulares estão localizados na estaca 6 com 716,0 MPa na consideração de camadas aderidas e 961,0 MPa na consideração de camadas não aderidas, o que representa um aumento de 4,45% comparado aos módulos inferidos antes da correção das deflexões devido a temperatura.

**Gráfico 35 - Trecho 2 - subleito com correção de temperatura**

Fonte: o Autor (2020).

Observando a estaca 8 do subleito deste trecho nota-se que a retroanálise da consideração de camadas não aderidas não apresentou a tendência esperada de diminuição do módulo de resiliência, o que não aconteceu na outra consideração de aderência e na retroanálise antes da correção das deflexões, como mostra o Gráfico

10. A comparação da estaca 8 do Gráfico 35 e do 13 mostra que na consideração de aderência total entre camadas o módulo de resiliência do subleito subiu de 108,0 MPa para 174,0 MPa, aumento de 61%, já na consideração de camadas não aderidas o módulo subiu de 190,0 MPa para 259,0 MPa, aumento de 36%.

#### 4.3.1.3 Trecho 3

As Tabelas 34 e 35 exibem os resultados dos módulos de resiliência do revestimento, base, sub-base e subleito do Trecho 3, Rua São Borja, retroanalisados pelo BackMedina a partir das bacias corrigidas à temperatura de 20°C. Também foram consideradas as duas condições de aderência entre os estratos do pavimento, camadas totalmente aderidas e camadas não aderidas entre si, o Gráfico 36 mostra esta comparação.

**Tabela 34 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas aderidas com correção de temperatura**

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)					Erro (µm)
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito		
B1	6966	558	558	76	15,2	
B2	6333	507	364	137	7,9	
B3	6966	334	192	119	20,9	
B4	6333	507	471	123	8,4	
B5	6333	507	507	190	7,9	
B6	6966	360	482	209	7,2	
B7	5988	558	471	130	5,3	
B8	3056	558	362	73	15,1	
B9	3781	594	302	50	21,5	
B10	6333	364	293	97	14,0	
Média (MPa)	5905,5	484,7	400,2	120,4	-	
DP (MPa)	1294,0	90,8	109,7	47,7	-	
CV (%)	21,9	18,7	27,4	39,6	-	

Fonte: o Autor (2020).

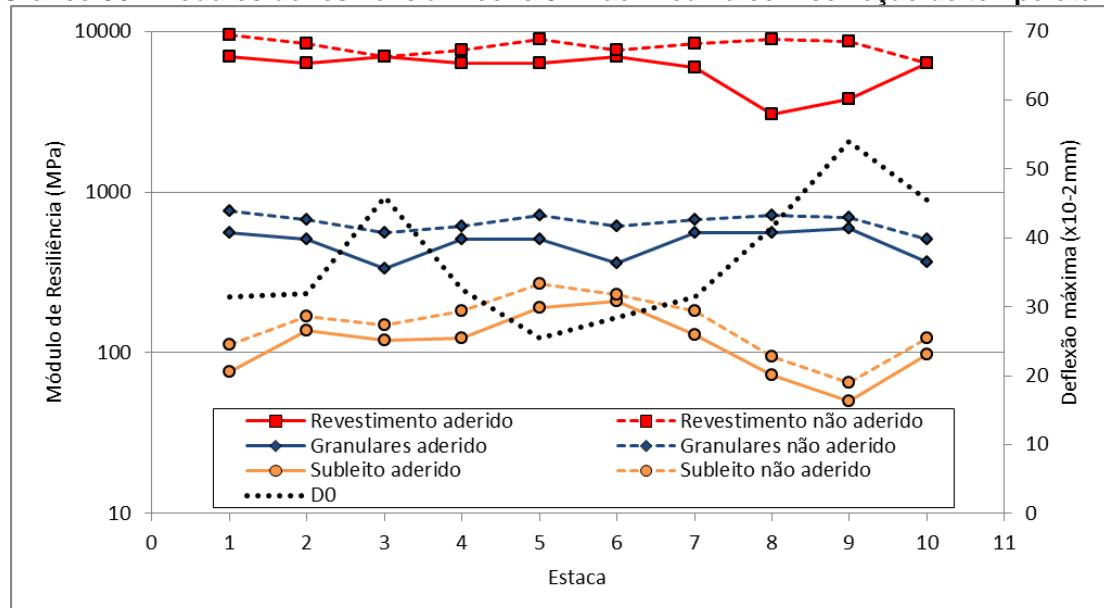
**Tabela 35 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas não aderidas com correção de temperatura**

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)					Erro (µm)
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito		
B1	9483	760	760	113	22,6	
B2	8429	675	675	169	9,0	
B3	6966	558	302	148	17,5	
B4	7663	614	614	181	13,3	
B5	8941	716	716	268	6,8	
B6	7663	614	614	230	11,3	
B7	8429	675	675	183	9,7	
B8	8941	716	716	94	19,0	
B9	8621	691	691	65	28,0	
B10	6333	507	507	123	18,0	
Média (MPa)	8146,9	652,9	627,0	157,4	-	
DP (MPa)	926,5	74,3	127,5	58,9	-	
CV (%)	11,4	11,4	20,3	37,4	-	

Fonte: o Autor (2020).

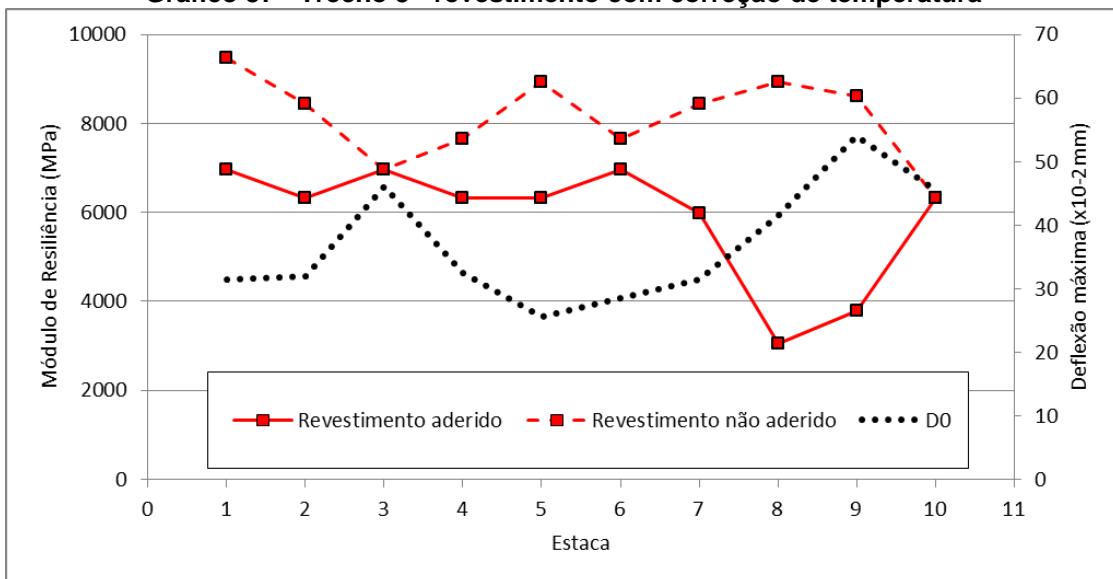
Fazendo a comparação com o item 4.2.1.3 percebe-se que, diferentemente do que ocorreu nos outros trechos, este não apresentou um aumento majoritário nos módulos de resiliência na consideração de aderência total entre camadas. Por exemplo, enquanto a bacia de número 5 na consideração de não aderência apresentou um aumento de 7,7% no revestimento, 6,1% nas camadas granulares e 5,9% no subleito em comparação com a retroanálise sem correção de temperatura, na consideração de aderência total os módulos apresentaram uma diminuição de 9,1% no revestimento, um aumento de 61% na base, diminuição de 4,7% na sub-base e uma diminuição de 9,1% no subleito.

**Gráfico 36 - Módulos de resiliência Trecho 3 - BackMedina com correção de temperatura**



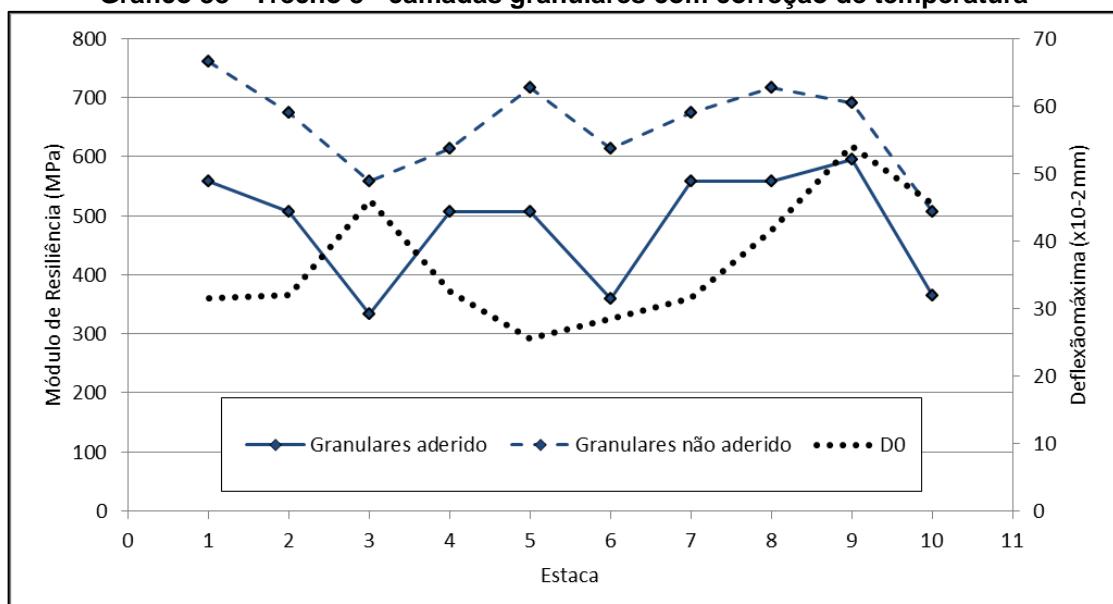
Fonte: o Autor (2020).

Na maior parte das estacas levantadas o comportamento resiliente dos materiais apresentou variações de acordo com as deflexões medidas. Não existe uma localidade que apresente módulos de resiliência muito acima dos demais, como ocorreu nos outros trechos, mas sim alguns destaques para os baixos módulos de resiliência em algumas estacas que serão comentadas pela observação dos Gráficos 37, 38 e 39, que detalham os módulos observados no revestimento, camadas granulares e no subleito, respectivamente, e trazem os valores máximos das deflexões medidas em campo.

**Gráfico 37 - Trecho 3 - revestimento com correção de temperatura**

Fonte: o Autor (2020).

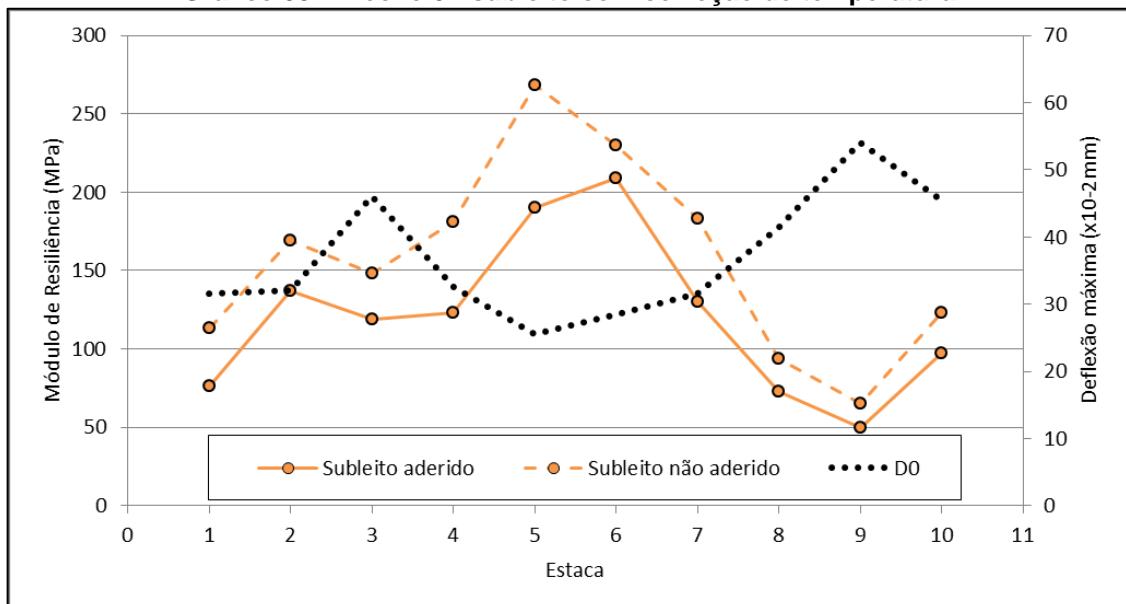
Fazendo a análise do Gráfico 37 com o 12 nota-se que a estaca número 1 apresentou um aumento no valor do módulo de resiliência do revestimento de 3362,0 MPa para 6966,0 MPa na consideração de aderência entre camadas, aumento de 107%, sendo que os erros da retroanálise são quase iguais, 14,7 µm sem a correção das deflexões e 15,2 µm após a correção das deflexões. Assim como na retroanálise feita sem a correção em função da temperatura, aqui as estacas 8 e 9 se destacam por apresentarem rigidezes baixas comparadas com a média dos módulos na consideração de camadas aderidas.

**Gráfico 38 - Trecho 3 - camadas granulares com correção de temperatura**

Fonte: o Autor (2020).

Os módulos de resiliência inferidos nas camadas granulares se mostraram de acordo com as tendências das deflexões máximas, entretanto as estaca 5 e 9 da consideração de camadas aderidas se destacam quando comparados os Gráficos 38 e 13. Antes da correção das deflexões à temperatura padrão o módulo de resiliência da estaca 5 era decrescente em relação a estaca anterior e apresentou um valor de 315,0 MPa, já após essa correção a rigidez ficou estável em relação a estaca anterior, apresentando um módulo de 507,0 MPa. Na estaca 9 mostrou um módulo de resiliência de 281,0 MPa no Gráfico 13 e um módulo de 594,0 MPa no Gráfico 38, um aumento grande de 111%.

**Gráfico 39 - Trecho 3 - subleito com correção de temperatura**



**Fonte:** o Autor (2020).

Os Gráficos 39 e 14 mostram que os módulos de resiliência inferidos ao subleito do Trecho 3 são os que estão mais de acordo com as respostas esperadas da relação entre rigidez e deflexão máxima medida, onde quanto maior a deflexão menor o módulo e vice-versa. A estaca 9 se destaca pelo baixo módulo de resiliência de 50,0 MPa na consideração de aderência entre camadas e 65,0 MPa na consideração de não aderência, valores abaixo das médias para o trecho que foram de 120,4 MPa e 157,4 MPa, respectivamente. Estes baixos módulos nesta estaca acarretam em baixos módulos de revestimento, podendo causar defeitos no pavimento.

#### 4.3.2 Módulos de resiliência retroanalisados pelo BAKFAA a partir das bacias corrigidas em função da temperatura

Com o intuito de fazer a mesma comparação dos processos iterativos de retroanálise o software BAKFAA foi novamente utilizado. Foram retroanalisadas as bacias deflectométricas adaptadas em função do carregamento do ensaio de FWD, proposto por Theisen (2009) e corrigidas à temperatura padrão de 20°C. Aqui também foram determinados os módulos de resiliência das camadas constituintes de todos os pavimentos estudados e seus parâmetros estatísticos: média, desvio padrão – DP e coeficiente de variação – CV.

##### 4.3.2.1 Trecho 1

As Tabelas 36 e 37 exibem os resultados dos módulos de resiliência do revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito do Trecho 1, Avenida Santos Dumont, retroanalisados pelo BAKFAA a partir das bacias corrigidas à temperatura de 20°C. Foram consideradas duas condições de aderência entre os estratos do pavimento, camadas totalmenteaderidas e camadas não aderidas entre si, o Gráfico 40 mostra esta comparação.

**Tabela 36 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas aderidas com correção de temperatura**

Bacia	Módulo de resiliência (MPa)					
	Revestimento	Base	Sub-base	Reforço	Subleito	Erro (µm)
B1	10033,8	802,7	802,7	802,7	301,0	15,4
B2	6541,0	523,3	523,3	523,3	196,2	18,5
B3	7444,3	595,5	595,5	595,5	223,3	11,4
B4	10235,5	818,9	818,9	818,9	307,0	10,3
B5	9083,5	726,7	726,7	726,7	272,5	9,5
B6	9738,7	779,1	779,1	779,1	292,1	9,9
B7	10441,2	835,3	835,3	835,3	313,2	9,8
B8	9836,1	786,9	786,9	786,9	295,0	9,8
Média(MPa)	9169,3	733,5	733,5	733,5	275,0	-
DP (MPa)	1330,5	106,4	106,4	106,4	39,9	-
CV (%)	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	-

Fonte: o Autor (2020).

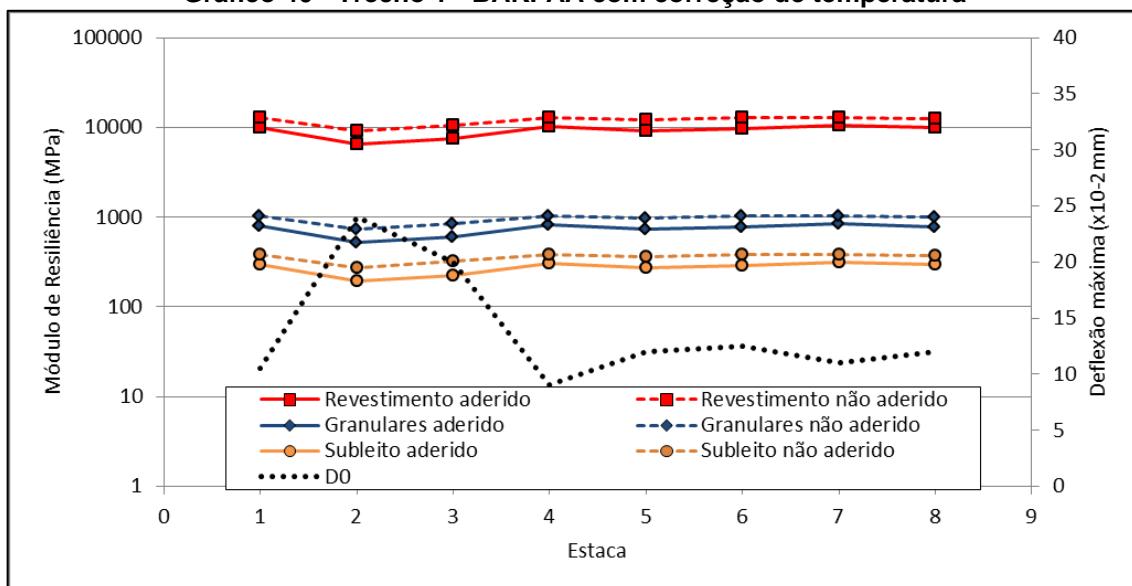
**Tabela 37 - Módulos de resiliência Trecho 1 - camadas não aderidas com correção de temperatura**

Bacia	Módulo de resiliência (MPa)					
	Revestimento	Base	Sub-base	Reforço	Subleito	Erro (μm)
B1	12867,6	1029,4	1029,4	1029,4	386,0	17,4
B2	9083,5	726,7	726,7	726,7	272,5	17,2
B3	10651,1	852,1	852,1	852,1	319,5	9,5
B4	12740,2	1019,2	1019,2	1019,2	382,1	14,1
B5	12121,9	969,8	969,8	969,8	363,6	10,9
B6	12740,2	1019,2	1019,2	1019,2	382,1	11,7
B7	12867,6	1029,4	1029,4	1029,4	386,0	13,3
B8	12489,2	999,2	999,2	999,2	374,6	12,0
Média(MPa)	11945,2	955,6	955,6	955,6	358,3	-
DP (MPa)	1282,4	102,6	102,6	102,6	38,5	-
CV (%)	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	-

Fonte: o Autor (2020).

Assim como a retroanálise com o programa BackMedina, após a correção das deflexões em função da temperatura os módulos de resiliência inferidos pelo BAKFAA também apresentaram um aumento. Tendo como base os resultados apresentados no item 4.2.2.1 os módulos aqui retroanalizados apresentaram um aumento em seus valores, com exceção da estaca número 2. Por exemplo, enquanto a bacia da estaca 5 mostrou um aumento de 25,7% em todos os materiais na consideração de aderência entre camadas, a bacia da estaca 2 permaneceu igual, como se a correção à temperatura padrão das deflexões não tivesse surtido efeito. Já na consideração de não aderência entre camadas a bacia 3, por exemplo, apresentou um aumento de 16,1% e a bacia 2 uma diminuição de 1% nos valores dos módulos de resiliência.

**Gráfico 40 - Trecho 1 - BAKFAA com correção de temperatura**

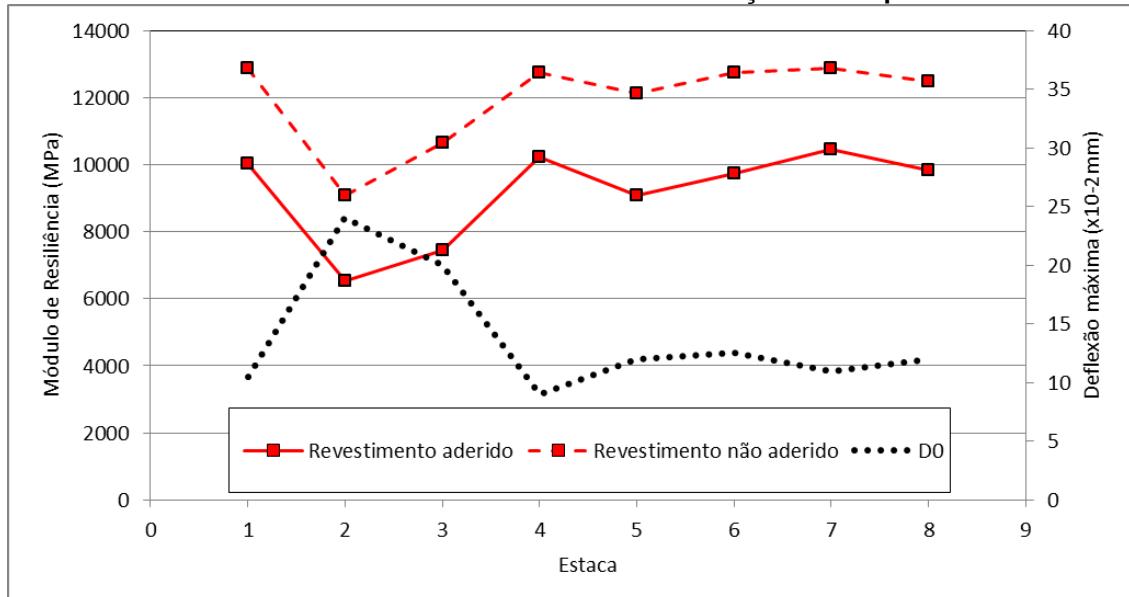


Fonte: o Autor (2020).

O comportamento resiliente da estrutura do pavimento também se mostrou de acordo com as deflexões medidas em campo, onde se percebe uma diminuição da rigidez de todos os materiais que compõem as camadas na estaca 2 que apresentou as maiores deflexões máximas. O revestimento da estaca 2, por exemplo, apresentou módulo de resiliência igual a 6541,0 MPa na condição de aderência, sendo um valor abaixo da média do trecho que é de 9288,9 MPa, já na consideração de não aderência este módulo é de 9083,5 MPa, também abaixo da média do trecho de 11945,2 MPa.

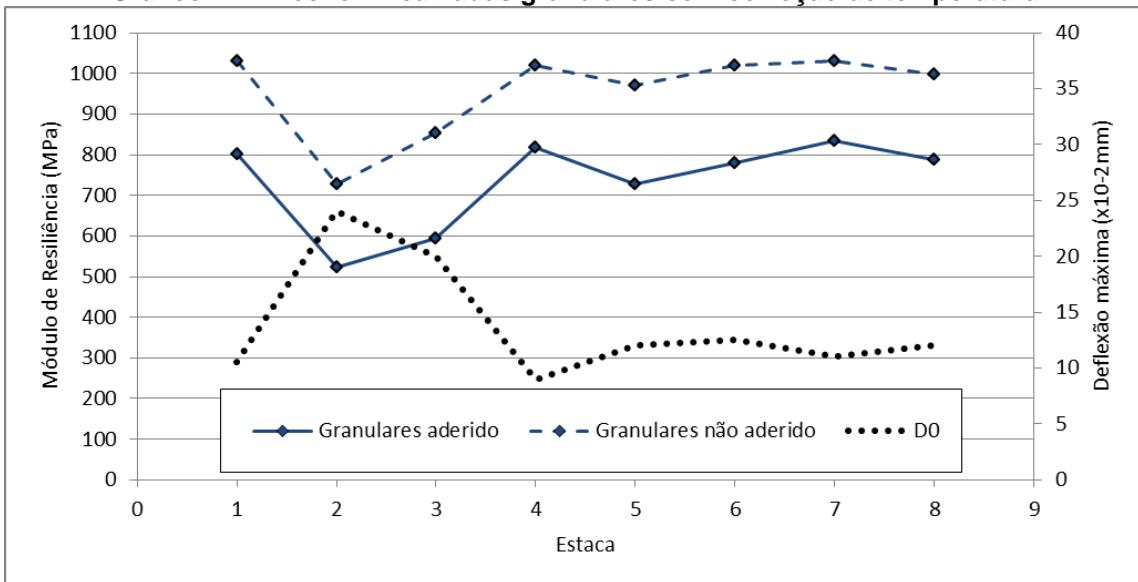
Os Gráficos 41, 42 e 43 detalham os módulos de resiliência observados no revestimento, camadas granulares e no subleito, respectivamente, e trazem os valores máximos das deflexões medidas em campo.

**Gráfico 41 - Trecho 1 - revestimento com correção de temperatura**



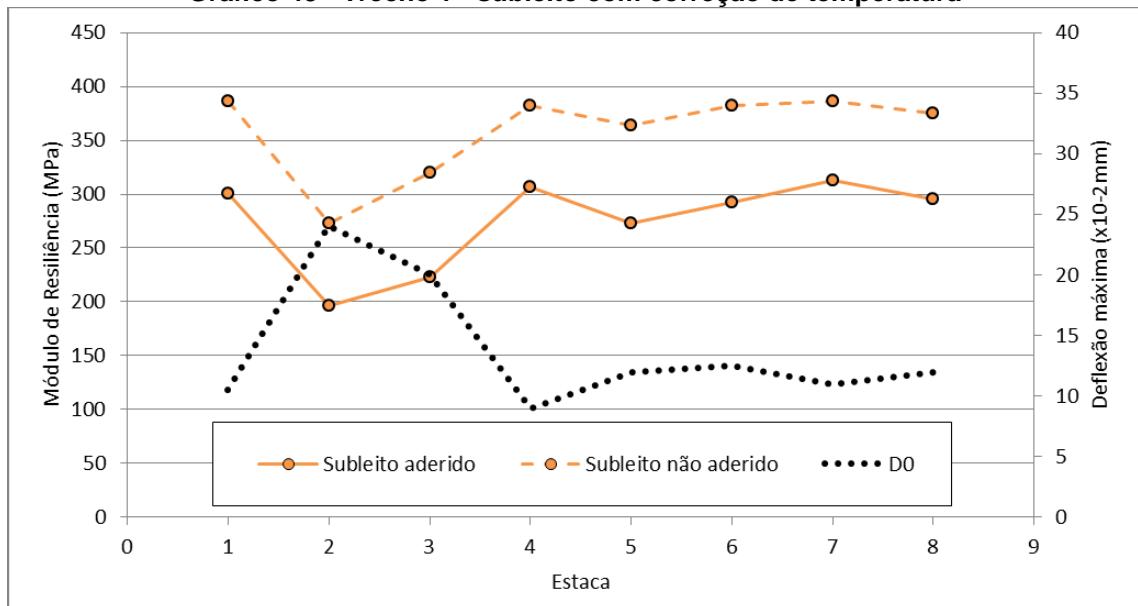
**Fonte:** o Autor (2020).

A análise dos Gráficos 41 e 16 mostra que não houve grandes variações dos módulos do revestimento. Os menores valores de módulos resilientes eram esperados na estaca 2 e assim foi observado. Ainda nesta localidade, vale ressaltar que os módulos inferidos permaneceram iguais mesmo após a correção das deflexões, o que não ocorreu nas demais, mostrando mais uma vez a influência do operador nos resultados.

**Gráfico 42 - Trecho 1 - camadas granulares com correção de temperatura**

Fonte: o Autor (2020).

Assim como na camada de revestimento, os maiores valores de módulos de resiliência das camadas granulares estão localizados na estaca 7 da consideração de camadas aderidas com 835,3 MPa, um aumento de 22,8% em relação a análise anterior e nas estacas 1 e 7 na consideração de camadas não aderidas com 1029,4 MPa, o que representou um aumento de 11,6% comparado aos módulos inferidos antes da correção das deflexões devido a temperatura.

**Gráfico 43 - Trecho 1 - subleito com correção de temperatura**

Fonte: o Autor (2020).

No que diz respeito à camada de subleito, fazendo a comparação entre os Gráficos 43 e 18, todos os módulos de resiliência retroanalisados apresentaram um aumento após a correção das bacias em função da temperatura, exceto as estaca 2. A estaca 2 na consideração de aderência entre camadas permaneceu com os mesmos módulos de resiliência inferidos e na consideração de não aderência apresentou uma diminuição de 1% do seu módulo.

#### 4.3.2.2 Trecho 2

As Tabelas 38 e 39 exibem os resultados dos módulos de resiliência do revestimento, base, sub-base e subleito do Trecho 2, Rua Otto Boehm, retroanalisados pelo BAKFAA a partir das bacias corrigidas à temperatura de 20°C. Também foram consideradas duas condições de aderência entre os estratos do pavimento, camadas totalmente aderidas e camadas não aderidas entre si, o Gráfico 44 mostra esta comparação.

**Tabela 38 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas aderidas com correção de temperatura**

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)					Erro (µm)
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito		
B1	7073,6	589,6	589,6	221,1	11,6	
B2	5151,5	412,1	412,1	154,5	22,8	
B3	6606,4	528,5	528,5	198,2	4,8	
B4	7012,9	561,0	561,0	210,3	29,7	
B5	7012,9	561,0	561,0	210,3	18,9	
B6	9642,3	771,4	771,4	289,2	10,0	
B7	9174,3	734,0	734,0	275,2	13,0	
B8	5360,7	428,8	428,8	160,8	22,2	
B9	7824,0	625,9	625,9	234,7	19,7	
B10	9174,3	734,0	734,0	275,2	19,1	
Média (MPa)	7433,0	594,6	594,6	223,0	-	
DP (MPa)	1471,0	117,7	117,7	44,1	-	
CV (%)	19,8	19,8	19,8	19,8	-	

Fonte: o Autor (2020).

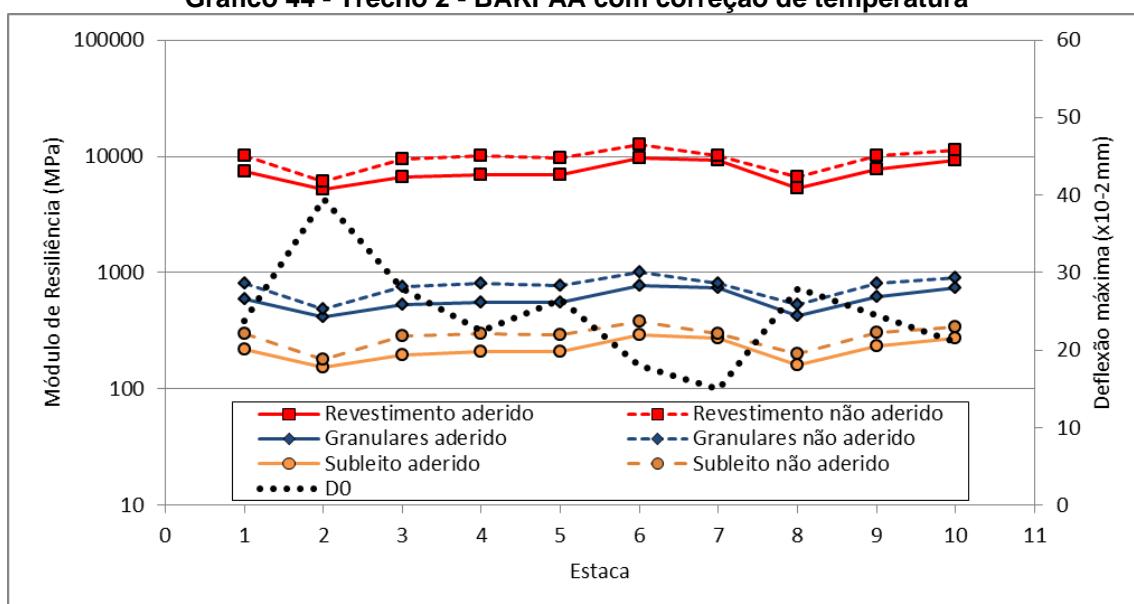
**Tabela 39 - Módulos de resiliência Trecho 2 - camadas não aderidas com correção de temperatura**

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)					Erro ( $\mu\text{m}$ )
	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito		
B1	10033,8	802,7	802,7	301,0	16,9	
B2	6040,5	483,2	483,2	181,2	28,5	
B3	9546,8	763,8	763,8	286,4	6,8	
B4	10033,8	802,7	802,7	301,0	27,2	
B5	9738,7	779,1	779,1	292,1	16,7	
B6	12614,1	1009,2	1009,2	378,4	9,7	
B7	10033,8	802,7	802,7	301,0	22,6	
B8	6672,5	533,8	533,8	200,1	32,6	
B9	10134,1	810,1	810,1	304,0	21,2	
B10	11306,3	904,5	904,5	339,1	21,9	
Média (MPa)	9615,4	769,2	769,2	288,4	-	
DP (MPa)	1846,8	147,7	147,7	55,4	-	
CV (%)	19,2	19,2	19,2	19,2	-	

Fonte: o Autor (2020).

No Trecho 2, fazendo uma comparação com o item 4.2.2.2, também foi constatado o aumento da rigidez das camadas após a correção das deflexões em função da temperatura. Na consideração de camadas totalmente aderidas a média dos módulos de resiliência do revestimento teve um aumento de 10,4% e a média das camadas granulares e do subleito um aumento de 10,1%. Já na consideração de camadas não aderidas as médias do módulo de resiliência do revestimento apresentou um aumento de 10,4%, a média das camadas granulares um aumento de 10,1% e a média do subleito um aumento de 10,2%.

**Gráfico 44 - Trecho 2 - BAKFAA com correção de temperatura**

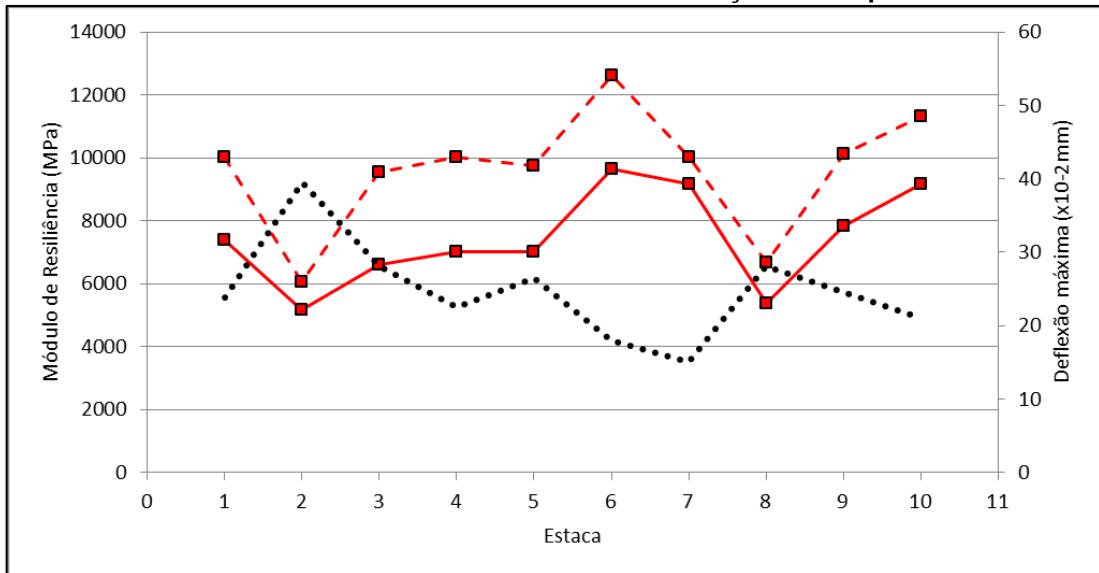


Fonte: o Autor (2020).

O comportamento resiliente dos materiais apresentou variações de acordo com as deflexões medidas em campo. Os maiores módulos de resiliência foram constatados na estaca de número 6, onde o revestimento apresentou rigidez de 9642,3 MPa na consideração de aderência e 12614,1 MPa na de não aderência, já as camadas granulares apresentaram rigidez de 771,4 MPa e 1009,2 MPa e a camada de subleito apresentou 289,2 MPa e 378,4 MPa nas duas condições de aderência.

Os Gráficos 45, 46 e 47 detalham os módulos de resiliência observados no revestimento, camadas granulares e no subleito, respectivamente, e trazem os valores máximos das deflexões medidas em campo.

**Gráfico 45 - Trecho 2 - revestimento com correção de temperatura**

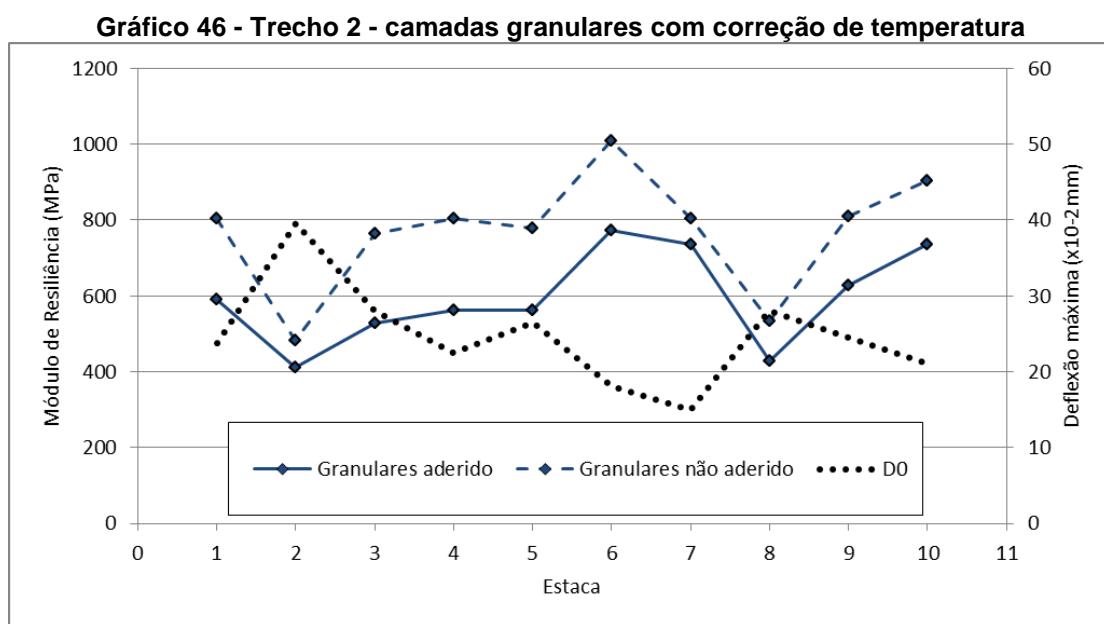


**Fonte:** o Autor (2020).

Observando o Gráfico 45 e comparando-o como o Gráfico 19 se percebe uma diferença no comportamento da bacia 5 na consideração de não aderência entre camadas. Na retroanálise após a correção das deflexões esta estaca apresentou uma leve diminuição do módulo de resiliência em comparação com a estaca anterior, onde a estaca 4 apresentou 10033,8 MPa e a estaca 5 9738,7 MPa, já antes da correção em função da temperatura ter sido feita esta diferença entre os módulos foi maior, de 10033,8 MPa na estaca 4 para 8388,4 MPa na estaca 5. Este fato, além de mostrar que a correção das deflexões não causou efeito nos módulos retroanalisisados da estaca 4, também evidenciou que o comportamento resiliente da

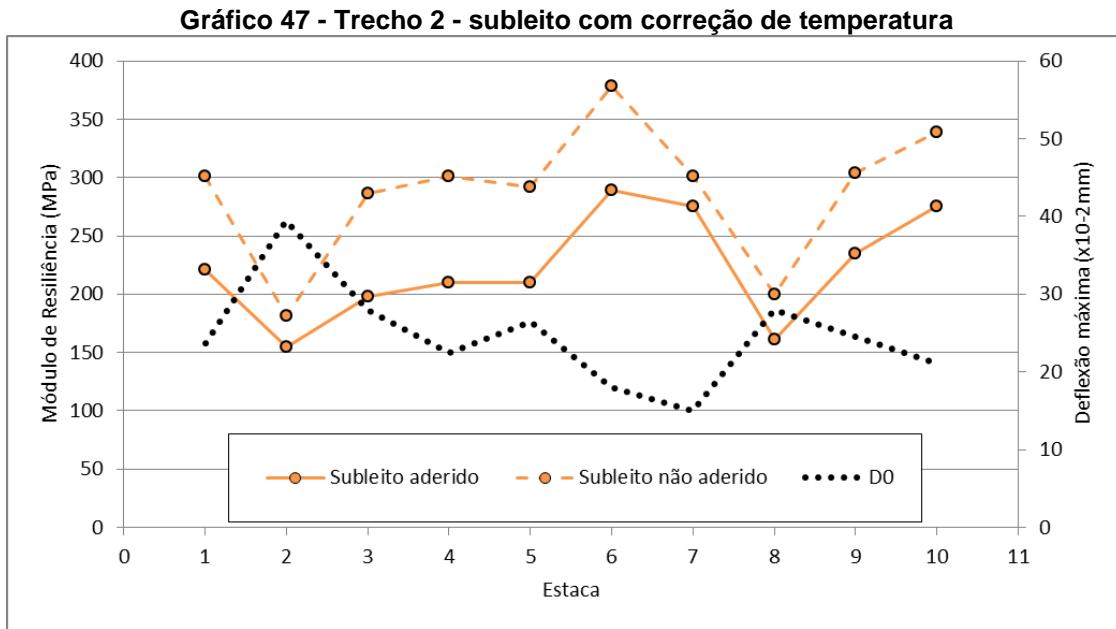
estrutura não se manteve constante, ou ainda, que houve interferência do operador na tentativa de diminuição do erro.

Ainda na mesma comparação entre gráficos nota-se que a rigidez da última estaca na consideração de camadas aderidas foi decrescente antes da correção das deflexões, vindo de 8061,1 MPa da bacia B9 para 7083,0 MPa na estaca 10, já após a correção em função da temperatura o módulo foi crescente, vindo de 7824,0 MPa na estaca 9 para 9174,3 MPa na estaca 10. Neste caso pode-se dizer que a tendência de aumento da rigidez do revestimento é válida, uma vez que o erro da segunda retroanálise foi menor.



Fonte: o Autor (2020).

Como o aumento percentual dos módulos de resiliência retroanalisados é o mesmo em todas as camadas das bacias analisadas, visualmente os gráficos que representam os estratos permanecem todos iguais, com as mesmas variações em relação à retroanálise feita antes da correção das deflexões em função da temperatura. Os menores valores de rigidez observados nas camadas granulares foram encontrados na estaca 2, com 412,1 MPa na consideração de camadas aderidas e 483,2 MPa nas camadas não aderidas, uma aumento de 2,0% e 18,4% em relação aos mesmos módulos antes da correção das deflexões.



Fonte: o Autor (2020).

Assim como nas outras camadas deste trecho, os módulos de resiliência da estaca 10 apresentaram discordâncias na consideração de aderência entre estratos comparando-se os Gráficos 47 e 22. Antes da correção das deflexões a sua rigidez foi decrescente, vindo de 246,6 MPa na estaca 9 para 212,5 MPa na estaca 10, já após a correção estes mesmos valores foram crescentes, vindo de 7824,0 MPa na estaca 9 para 9174,3 MPa na estaca 10. Aqui a interpretação é a mesma já mencionada, quanto menor o erro da retroanálise, mais significativos são os valores de módulos encontrados.

#### 4.3.2.3 Trecho 3

As Tabelas 40 e 41 exibem os resultados dos módulos de resiliência do revestimento, base, sub-base e subleito do Trecho 3, Rua São Borja, retroanalisisados pelo BAKFAA a partir das bacias corrigidas à temperatura de 20°C. Também foram consideradas as duas condições de aderência entre os estratos do pavimento, camadas totalmente aderidas e camadas não aderidas entre si, o Gráfico 48 mostra esta comparação.

**Tabela 40 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas aderidas com correção de temperatura**

Bacia	Revestimento	Módulo de Resiliência (MPa)				Erro (µm)
		Base	Sub-base	Subleito		
B1	6295,5	359,7	359,7	89,9	23,2	
B2	7605,6	434,6	434,6	108,6	10,5	
B3	5057,8	289,0	289,0	72,2	33,1	
B4	7758,5	443,3	443,3	110,8	10,2	
B5	9949,8	568,6	568,6	142,1	15,4	
B6	9280,3	530,3	530,3	132,5	18,3	
B7	8073,5	461,3	461,3	115,3	7,6	
B8	5476,9	313,0	313,0	78,2	19,6	
B9	3866,2	220,9	220,9	55,2	36,9	
B10	5586,9	319,3	319,3	79,8	16,8	
Média (MPa)	6895,1	394,0	394,0	98,4	-	
DP (MPa)	1851,8	105,8	105,8	26,4	-	
CV (%)	26,8	26,8	26,8	26,8	-	

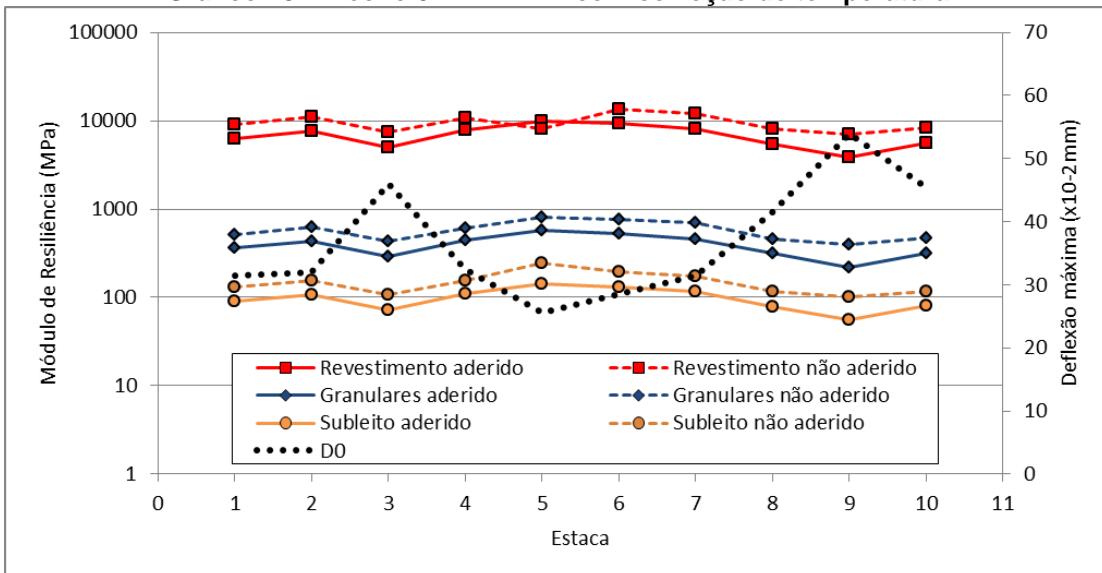
Fonte: o Autor (2020).

**Tabela 41 - Módulos de resiliência Trecho 3 - camadas não aderidas com correção de temperatura**

Bacia	Revestimento	Módulo de Resiliência (MPa)				Erro (µm)
		Base	Sub-base	Subleito		
B1	9097,5	519,9	519,9	129,9	29,5	
B2	10990,7	628,1	628,1	156,9	9,5	
B3	7530,3	430,3	430,3	107,5	23,4	
B4	10774,2	615,7	615,7	153,8	13,3	
B5	8141,9	814,0	814,0	244,3	6,8	
B6	13544,9	774,0	774,0	193,4	13,7	
B7	12140,6	693,8	693,8	173,3	8,0	
B8	8073,5	461,3	461,3	115,3	25,7	
B9	7023,7	401,3	401,3	100,3	42,8	
B10	8235,8	470,6	470,6	117,6	17,9	
Média (MPa)	9555,3	580,9	580,9	149,2	-	
DP (MPa)	2068,8	138,9	138,9	42,8	-	
CV (%)	21,6	23,9	23,9	28,7	-	

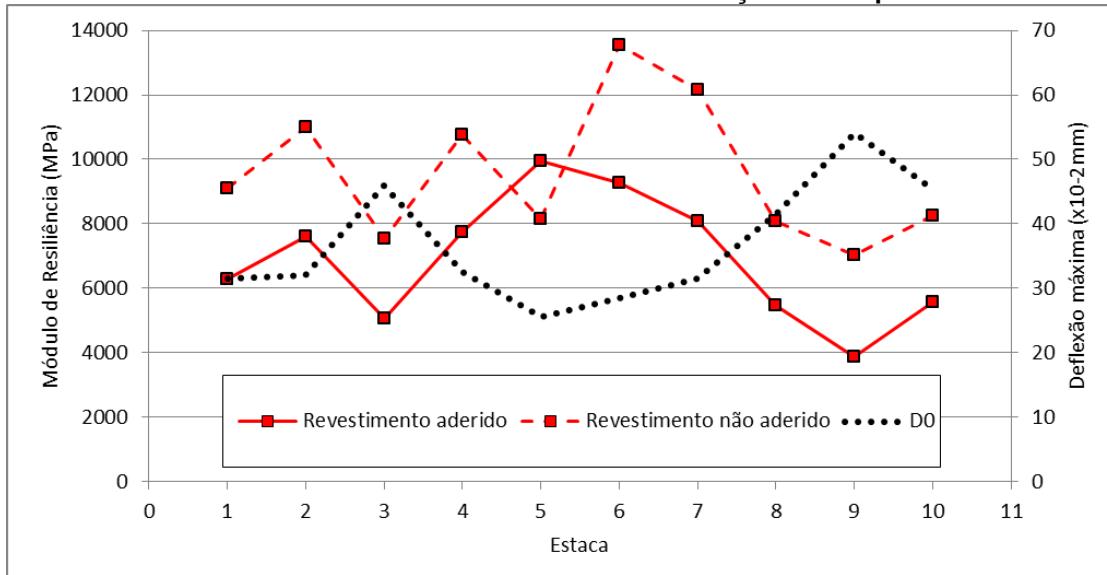
Fonte: o Autor (2020).

Fazendo a comparação com o item 4.2.2.3 notou-se que este foi o único trecho em que todas as rigidezes apresentaram um aumento após a correção das deflexões em função da temperatura. Como já havia sido mencionado, a retroanálise pelo BAKFAA após esta correção apresentou coeficientes de variação mais constantes em todos os materiais, sendo que o Trecho 3 apresentou os maiores coeficientes, mas mesmo assim, menores que 30%.

**Gráfico 48 - Trecho 3 - BAKFAA com correção de temperatura**

Fonte: o Autor (2020).

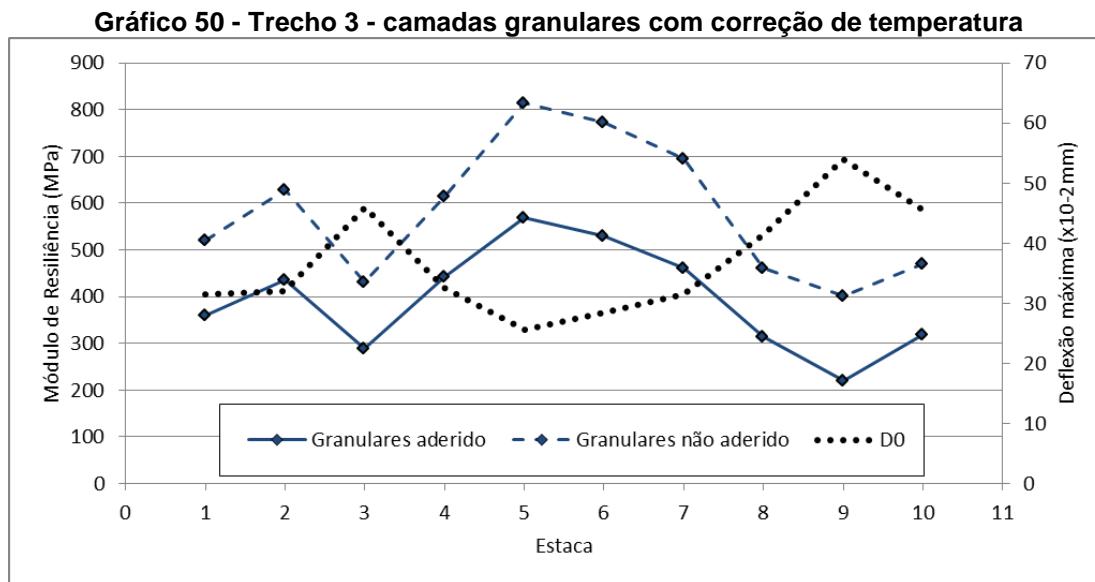
Os Gráficos 49, 50 e 51 detalham os módulos de resiliência observados no revestimento, camadas granulares e no subleito deste trecho, respectivamente, e trazem os valores máximos das deflexões medidas em campo.

**Gráfico 49 - Trecho 3 - revestimento com correção de temperatura**

Fonte: o Autor (2020).

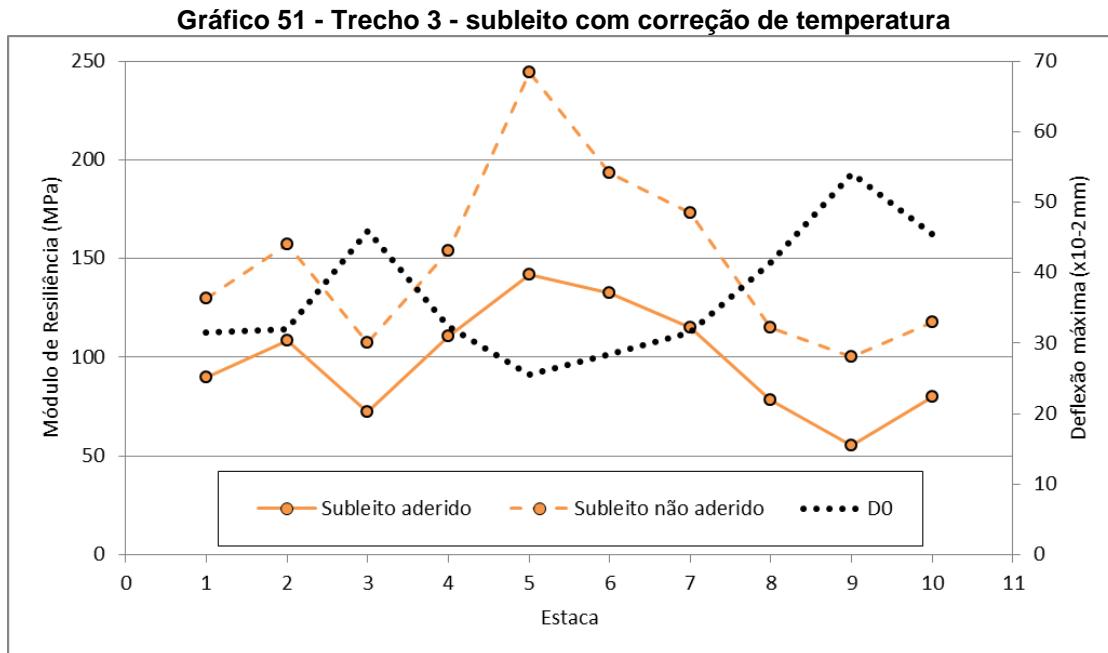
O módulo de resiliência inferido ao revestimento da estaca 5 na consideração de não aderência é inferior ao módulo inferido na consideração de camadas aderida, fato que não ocorreu nos outros trechos analisados. Apesar deste fato não ser

esperado ele também aconteceu antes da correção das deflexões, como mostrou o Gráfico 24.



Fonte: o Autor (2020).

No caso das camadas granulares os módulos inferidos a estaca 5 não apresentaram o mesmo comportamento visto na camada de revestimento. Contudo, esta mesma estaca mostrou as maiores rigidezes, 568,6 MPa na consideração de camadas aderidas e 814,0 MPa na consideração de camadas não aderidas, um aumento de 7,2% e 3,0%, respectivamente, em relação a retroanálise realizada antes da correção das deflexões. Já a estaca 9 apresentou os menores valores, 220,9 MPa na consideração de camadas aderidas e 401,3 MPa na consideração de camadas não aderidas, um aumento de 2% e 10,5%, respectivamente, em relação a retroanálise anterior.



Fonte: o Autor (2020).

Assim como as demais camadas deste trecho a retroanálise após a correção das deflexões em função da temperatura se mostrou parecida com os resultados obtidos antes da correção. Confrontando os Gráficos 51 e 26 percebe-se que as variações dos módulos de resiliência foram constantes. Os maiores módulos foram observados na estaca 5 com 142,1 MPa na consideração de camadas aderidas e 244,3 MPa na consideração de camadas não aderidas, já a estaca 9 apresentou os menores módulos inferidos, 55,2 MPa na consideração de aderência entre camadas e 100,3 MPa na consideração de não aderência.

#### 4.3.3 Influência da correção das deflexões em função da temperatura

Como exemplificado no Gráfico 27 do item 4.3 e mostrado no Apêndice A todas as deflexões de todas as bacias diminuíram após a correção proposta por Pais *et al.* (2018, tradução nossa). Isso se deve, principalmente, ao fato de as temperaturas da superfície do revestimento no momento das medições dos deslocamentos verticais estarem maiores que a temperatura de referência, pois uma temperatura elevada implica em maiores deflexões, já uma temperatura amena resulta em deflexões menores, de acordo com as propriedades dos materiais do pavimento.

Comparando as bacias deflectométricas medidas em campo com as bacias corrigidas percebe-se que as deflexões máximas e as deflexões mais próximas ao

carregamento aplicado sofrem maior influência do fator de correção, ou seja, as deflexões que estavam mais perto da carga aplicada apresentaram maior diferença numérica após a sua correção em função da temperatura. Este fato se deve ao modelo de correção escolhido que, como demonstra Pais *et al.* (2018, tradução nossa), quanto mais distante estiverem as deflexões do carregamento, menor será a influência do fator de correção. A necessidade da correção das deflexões mais afastadas do carregamento já havia sido questionada por Bueno (2016) e por Johnston (2001) que optaram por não fazê-la, o que torna a utilização da metodologia de Pais *et al.* (2018, tradução nossa) mais interessante por não desconsiderar as deflexões mais afastadas, mas sim corrigi-las de maneira mais adequada, dando maior valor ao comportamento termossensível do concreto asfáltico nas deflexões mais próximas a carga aplicada.

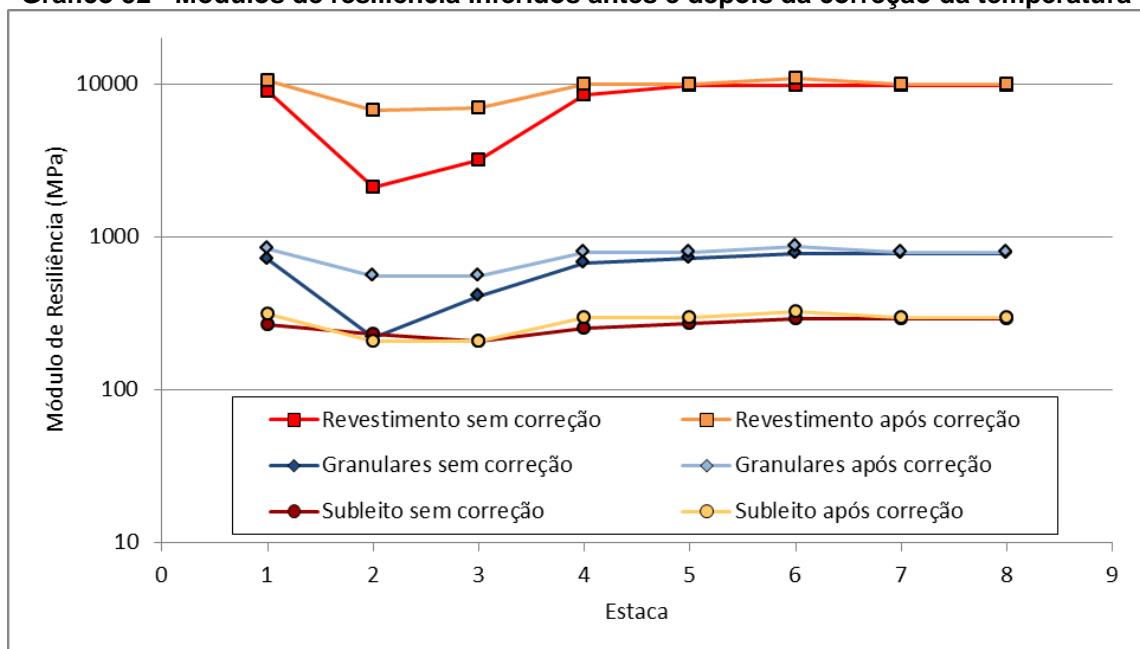
Partindo para a análise dos módulos de resiliência após a correção das deflexões pôde-se observar que houve, majoritariamente, o aumento das rigidezes retroanalisadas. Este fato se deve a temperatura mais elevada da superfície dos revestimentos durante a realização dos levantamentos de campo em relação à temperatura de referência da correção. A correção das deflexões para uma temperatura mais baixa implicou em deslocamentos verticais menores, como se os pavimentos fossem mais rígidos, assim, por consequência, os módulos de resiliência retroanalisados se tornaram numericamente maiores.

Observando o Apêndice B que mostra a diferença percentual dos módulos retroanalisados após a correção das deflexões comparados aos módulos inferidos antes das correções, existem algumas exceções onde a retroanálise das bacias apresentou resultou mais baixos. No caso das retroanálises feitas pelo BackMedina, estas exceções são as camadas granulares das bacias B2 do Trecho 1, bacias B4, B5, B9 e B10 do Trecho 2 e na camada de revestimento das bacias B3, B4, B5 e B7 do Trecho 3. Já no caso da retroanálise feita pelo BAKFAA, os valores mais baixos de módulos após a correção foram observados nas bacias B2 do Trecho 1 e nas bacias B5, B8 e B9 do Trecho 2. Outras bacias que chamam a atenção são a B2 e B3 do Trecho 1 e B1 do Trecho 3, retroanalisadas pelo BackMedina que apresentaram aumentos muito grandes nos módulos dos revestimentos provocados pela tentativa de minimização de erros da retroanálise pelo operador do software.

Tendo em vista que as correções das deflexões ocorreram de uma temperatura única para a temperatura padrão, ou seja, cada trecho avaliado possuía

uma única temperatura medida no dia do levantamento deflectométrico e posteriormente foi corrigida para 20°C, esperava-se que esta diminuição única de temperatura resultasse em um aumento proporcional das rigidezes inferidas. Entretanto, como observado no Apêndice B, os módulos de resiliência retroanalisados em cada bacia não apresentaram este aumento constante, havendo até mesmo casos de diminuição. O Gráfico 52 exemplifica o fato através de um comparativo entre os módulos de resiliência do Trecho 1 retroanalisados pelo BackMedina na consideração de camadas aderidas antes e depois da correção em função da temperatura. Como fica explícito principalmente nas estacas 2 e 3, após a correção das deflexões em função da temperatura, os módulos inferidos não são proporcionais aos módulos sem correção.

**Gráfico 52 - Módulos de resiliência inferidos antes e depois da correção da temperatura**



Fonte: o Autor (2020).

Esta desproporcionalidade constatada se deve à independência que cada bacia deflectométrica tem em relação ao trecho como um todo. Ou seja, apesar de serem levantamentos próximos uns aos outros as deflexões medidas são distintas, gerando módulos de resiliência retroanalisados distintos, podendo até mesmo afirmar a não homogeneidade dos materiais constituintes de um mesmo pavimento. Outro fator interessante que se observa no Gráfico 52 é a influência da profundidade das camadas nos módulos retroanalisados, onde a rigidez do subleito, por exemplo, não apresenta variações significativas após a correção da temperatura,

diferentemente da rigidez do revestimento em que ocorrem grandes variações devido a sua exposição direta ao ambiente externo.

Contudo, ainda se pode avaliar a influência da correção em função da temperatura através do coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ) que mede o grau de correlação linear entre duas variáveis quantitativas. A partir de um índice adimensional com valores situados entre -1 e 1 pode-se dizer o quanto linear são dois conjuntos de dados, sendo  $\rho = 1$  uma correlação linear perfeita positiva,  $\rho = -1$  uma correlação linear perfeita negativa e  $\rho = 0$  a independência linear das variáveis (SCHULTZ e SCHULTZ, 1992, apud LIRA, 2004). Assim, usando como exemplo o Gráfico 52 acima, sendo os dois conjuntos de dados os módulos antes da correção e os módulos após a correção, obtém-se coeficientes de correlação de Pearson iguais a 0,96 para o revestimento, 0,94 para a camada de base e 0,87 para o subleito, representando correlações fortes e positivas. O Apêndice C traz os coeficientes de correlação para as demais bacias e também das retroanálise com o BAKFAA.

A maior parte dos conjuntos de dados apresentou forte correlação linear, mostrando que apesar de os módulos retroanalisados não apresentarem um aumento constante após a correção das deflexões, ainda seguem a tendência dos módulos inferidos antes da correção. Os coeficientes de correlação de Pearson foram maiores nos conjuntos de dados retroanalisados pelo BAKFAA, evidenciando a maior constância que o ajuste das bacias iniciais inferidas causa nos módulos finais.

Por fim, a correção das deflexões em função da temperatura se mostra indispensável para a análise mecânica de estruturas de pavimentos, visto as diferenças dos módulos de resiliência dos materiais inferidos antes e após a correção. Entretanto, também foi observado que todas as camadas dos pavimentos sofrem com a influência da correção em função da temperatura, mesmo sendo as camadas de base, sub-base e subleito menos sensíveis às variações de temperatura e incidência de radiação solar.

#### 4.4 INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO DE ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS

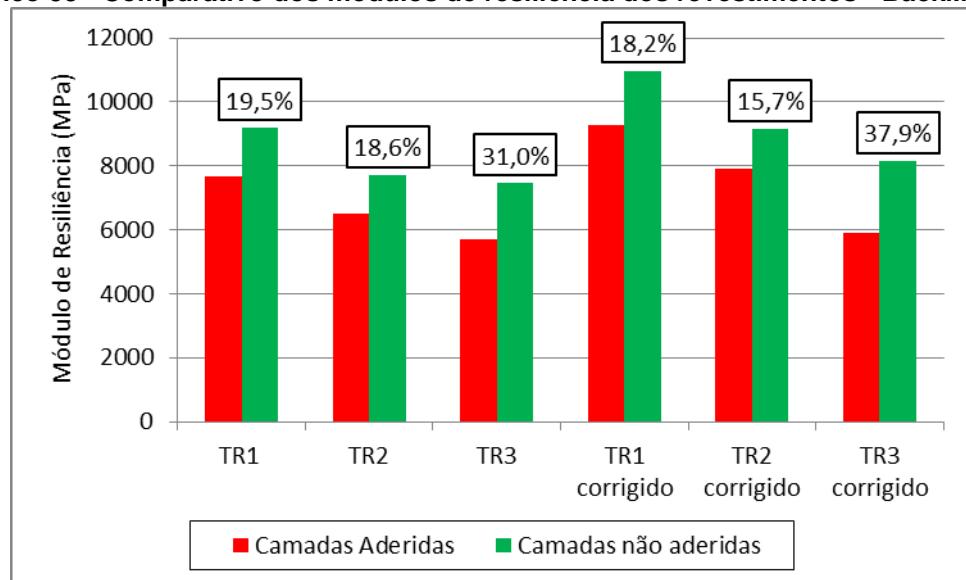
Apesar de este trabalho ter tido acesso aos projetos e conhecer a composição e espessuras de todas as camadas dos trechos avaliados, ainda não se conhecia as condições de aderência entre camadas, tanto pela falta de informações em relação à

imprimação entre revestimentos e bases quanto pelas incertezas de como os elementos estratificados de quaisquer pavimentos respondem aos carregamentos impostos. Assim, decidiu-se fazer a retroanálise dos módulos de resiliência considerando dois casos, todas as camadas dos pavimentos aderidas e todas as camadas não aderidas, tanto com o software BackMedina quanto com o BAKFAA, bem como com os dados das bacias de deflexões corrigidas em função da temperatura, com a finalidade de investigar as respostas dos módulos de resiliência inferidos.

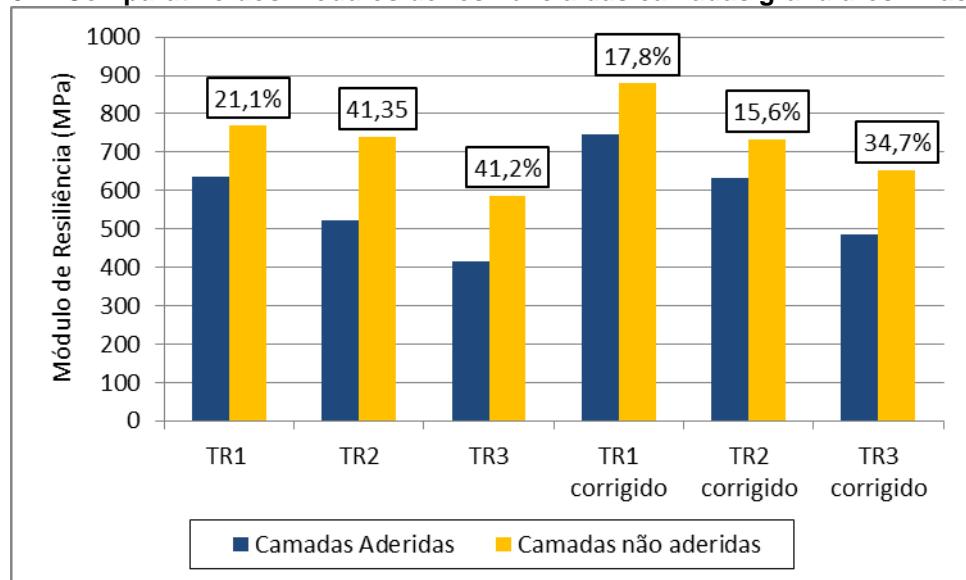
#### 4.4.1 Módulos de resiliência retroanalisados pelo BackMedina

Os Gráficos 53, 54 e 55 trazem o comparativo das médias dos módulos de resiliência dos estratos inferidos pelo BackMedina. Os Trechos 1, 2 e 3 são representados pelas siglas TR1, TR2 e TR3, respectivamente, sendo que também se apresentam os módulos inferidos de todos os trechos após a correção em função da temperatura. Os gráficos destacam as diferenças percentuais entre os dois tipos de consideração de aderência, tendo os módulos inferidos na condição de camadas aderidas como referência.

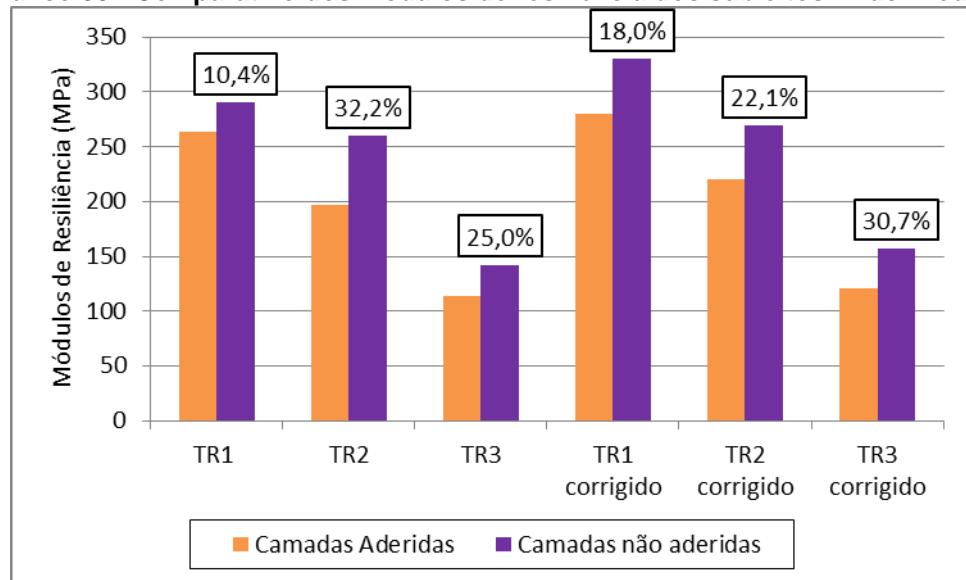
**Gráfico 53 - Comparativo dos módulos de resiliência dos revestimentos - BackMedina**



Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 54 - Comparativo dos módulos de resiliência das camadas granulares - BackMedina**

Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 55 - Comparativo dos módulos de resiliência dos subleitos - BackMedina**

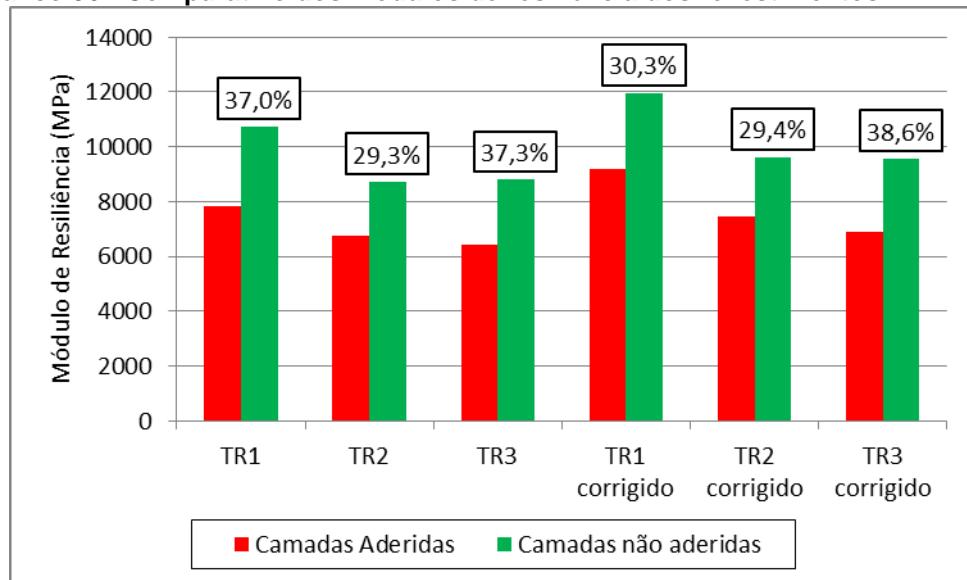
Fonte: o Autor (2020).

Observando os gráficos acima nota-se que, independente das particularidades dos trechos avaliados, fazer a consideração de não aderência na interface das camadas como dado de entrada no software resulta em módulos inferidos maiores, independentemente da camada analisada. O Trecho 3 se destaca pelas maiores diferenças percentuais entre as considerações de aderência, chegando a um aumento de 31% na camada de revestimento sem correção de temperatura e 37,9% após a correção da temperatura, devido a maior degradação dos materiais causado pelo tempo de uso.

#### 4.4.2 Módulos de resiliência retroanalisados pelo BAKFAA

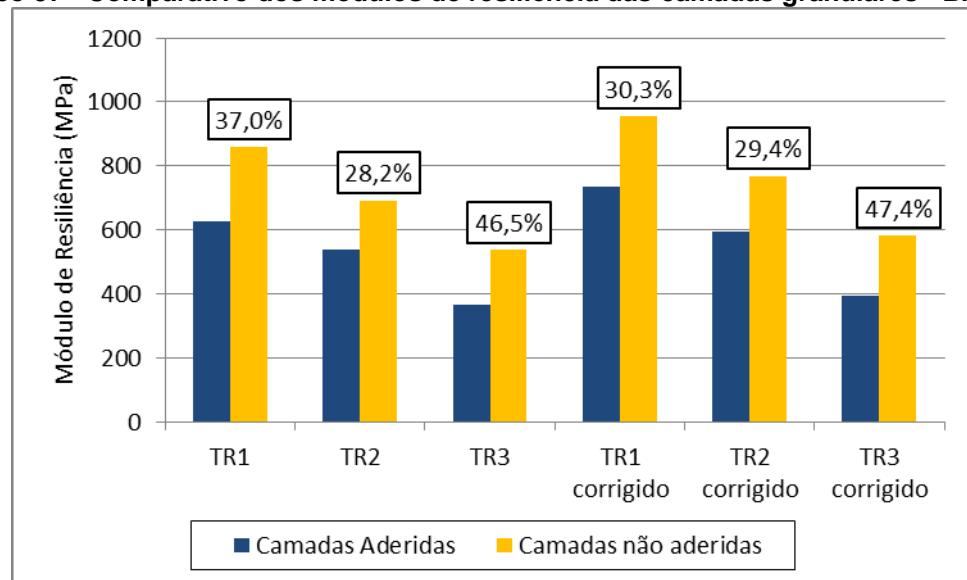
Os Gráficos 56, 57 e 58 mostram o mesmo comparativo das médias dos módulos de resiliência e suas respectivas diferenças percentuais de acordo com a consideração de aderência, porém retroanalisados pelo BAKFAA.

**Gráfico 56 - Comparativo dos módulos de resiliência dos revestimentos - BAKFAA**

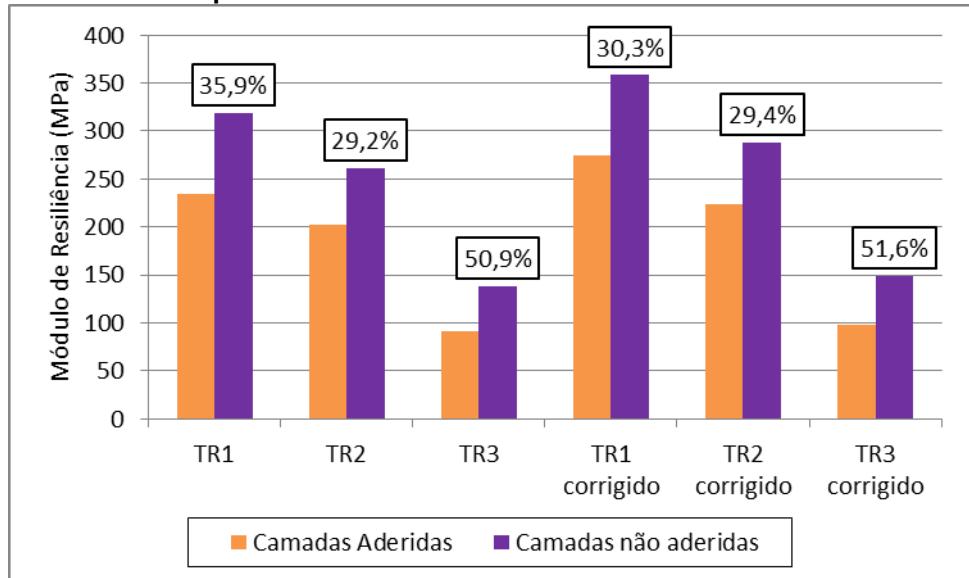


Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 57 - Comparativo dos módulos de resiliência das camadas granulares - BAKFAA**



Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 58 - Comparativo dos módulos de resiliência dos subleitos - BAKFAA**

**Fonte:** o Autor (2020).

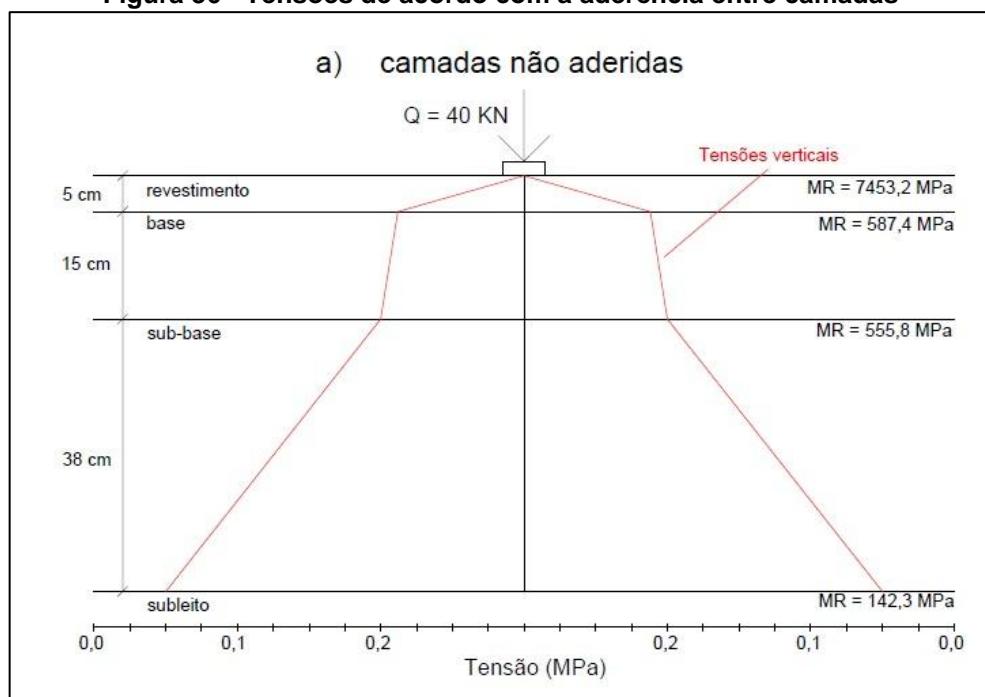
Aqui também se percebe o Trecho 3 com as maiores diferenças percentuais entre as médias dos módulos inferidos, chegando a um aumento superior a 50% dos módulos de subleito. Outro ponto importante a ser destacado em relação à comparação entre softwares é o fato de o BAKFAA apresentar maiores diferenças nos resultados dos módulos retroanalisisados dependendo da consideração de aderência entre camadas, aonde, na maioria dos casos, a consideração de interfaces não aderidas apresentaram módulos 30% mais altos que na consideração de interfaces aderidas. Isso demonstra os menores ajustes entre bacias de deflexão medidas e calculadas que o programa proporciona, haja vista os maiores valores de erros de retroanálise determinados.

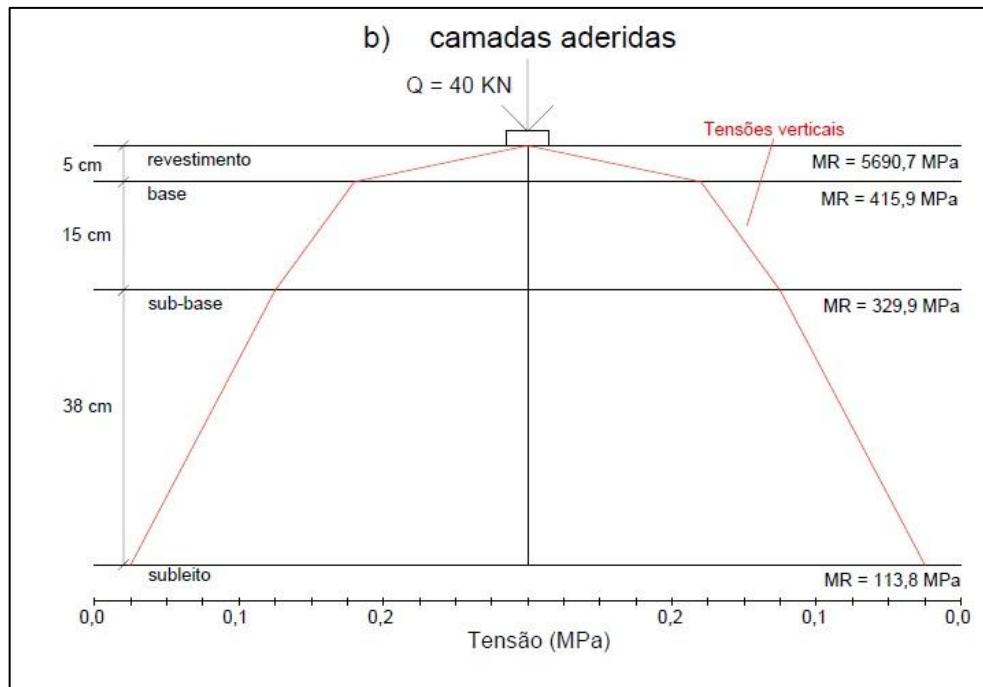
Outro fator a se destacar na comparação entre as retroanálise dos programas são as diferenças percentuais quando confrontadas as médias dos módulos das camadas granulares nas duas condições de aderência. A retroanálise das camadas granulares com o BackMedina apresentou aumentos percentuais maiores que os das camadas de revestimento e do subleito, sendo que o mesmo não ocorreu na retroanálise com o BAKFAA. Esta desigualdade poderia ser explicada pelo fato de o BackMedina solicitar ao usuário no início do processo qual é o tipo de material da camada, podendo fazer a consideração de que camadas granulares não trabalhem à tração na flexão, entretanto o software considera todas as camadas elásticas lineares, assim como o BAKFFA, e o tipo de material serve apenas como guia ao projetista (FRANCO, 2018). Portanto, as maiores diferenças encontradas nas

camadas granulares na comparação da condição de aderência pelo BackMedina diz respeito ao processo iterativo de inferência dos módulos.

No que diz respeito dos motivos de os módulos resilientes inferidos na condição de não aderência entre camadas serem numericamente maiores, Bueno (2016) propõe uma análise de tensões para a explicação do fenômeno. A Figura 36 exemplifica o comportamento das tensões quando considerado um sistema de camadas (a) sem aderência e (b) com aderência, sob solicitação de um carregamento padrão de 40 KN. A estrutura representada a seguir é o Trecho 3, onde se apresentam as médias dos módulos de resiliência retroanalisados de cada camada e as tensões geradas em cada estrato pelo carregamento, geradas pelo software AEMC.

**Figura 36 - Tensões de acordo com a aderência entre camadas**





Fonte: o Autor (2020).

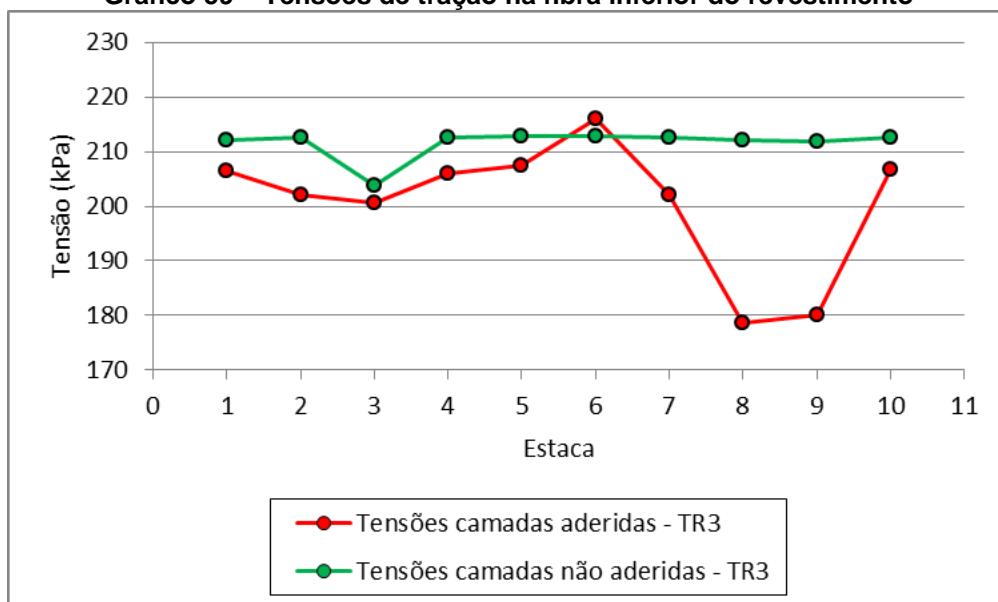
Quando se considera a estrutura de pavimento com camadas não aderidas obtém-se um diagrama de tensões pouco distribuído entre cada estrato, fazendo com que o *software* de retroanálise infira maiores rigidezes aos materiais a fim de se ajustar as bacias de deflexão medidas com as calculadas. Já quando considerado um sistema totalmente aderido, formando uma estrutura monolítica, as tensões são mais espalhadas, com distribuição progressiva dos esforços ao longo da estrutura, fazendo com que as rigidezes inferidas aos materiais sejam menores. Assim, a consideração de aderência total implica na distribuição gradual das tensões ao longo do sistema de camadas, dividindo os esforços ao longo de todos os materiais, já a não aderência implica que cada camada trabalha de forma independente.

#### 4.4.3 Efeito da aderência entre camadas no estado de tensões dos pavimentos

As condições de aderência entre as camadas dos pavimentos geram diferentes estados de tensões e deformações na estrutura, mesmo que com carregamentos idênticos. Assim, decidiu-se avaliar o efeito que as condições de interface causam nas tensões sofridas pelos trechos estudados, mais precisamente as tensões horizontais nas fibras inferiores dos revestimentos e as tensões verticais no topo dos subleitos, esforços geralmente utilizados no cálculo de desempenho e vida de fadiga dos pavimentos.

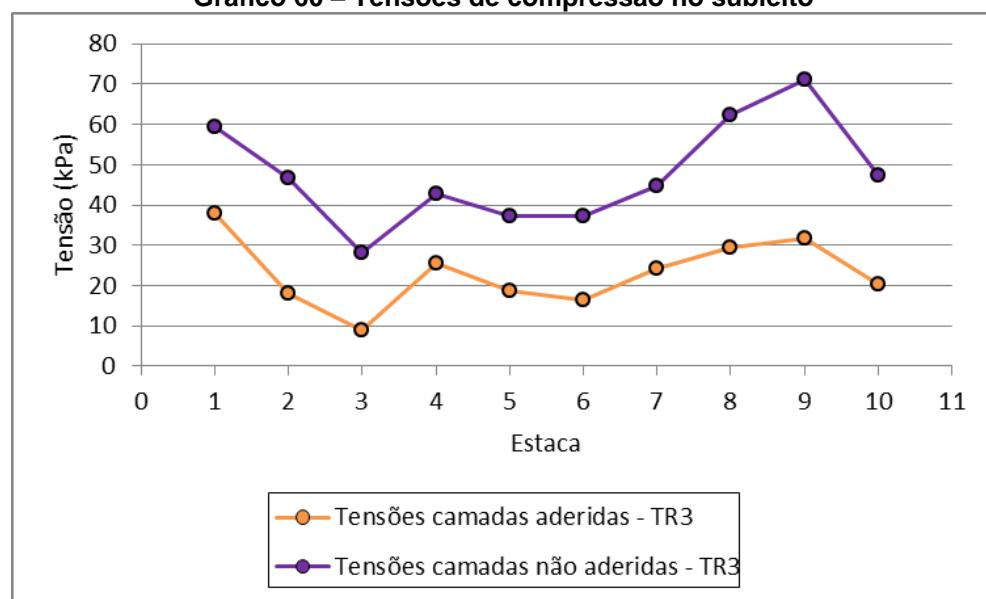
Através do software AEMC do pacote MeDiNa foi possível verificar o estado de tensões ao qual os pavimentos foram submetidos, sendo os parâmetros de entrada os mesmo utilizados nas retroanálise e também os próprios módulos de resiliência inferidos pelo BackMedina. O Gráfico 59 traz as tensões de tração por flexão na fibra inferior do revestimento do Trecho 3, Rua São Borja, e o Gráfico 60 as tensões verticais de compressão sofridas pelo topo do subleito do mesmo trecho. Os demais trechos são mostrados no Apêndice D.

**Gráfico 59 – Tensões de tração na fibra inferior do revestimento**



Fonte: o Autor (2020).

**Gráfico 60 – Tensões de compressão no subleito**



Fonte: o Autor (2020).

Quando consideradas não aderidas as camadas da estrutura, o carregamento gera tensões maiores em comparação com camadas totalmente aderidas, sendo que no caso das tensões no revestimento ainda se observa uma maior constância dos esforços calculados na condição de camadas não aderidas. Resultados semelhantes foram encontrados por Santos Assis e Fernandes Jr. (2019) que observaram maiores tensões e deformações em análises feitas considerando pavimentos com interfaces de camadas não aderidas, onde os autores mostram que no caso das deformações verticais de compressão no subleito podem apresentar valores duas vezes maiores devido a esta consideração.

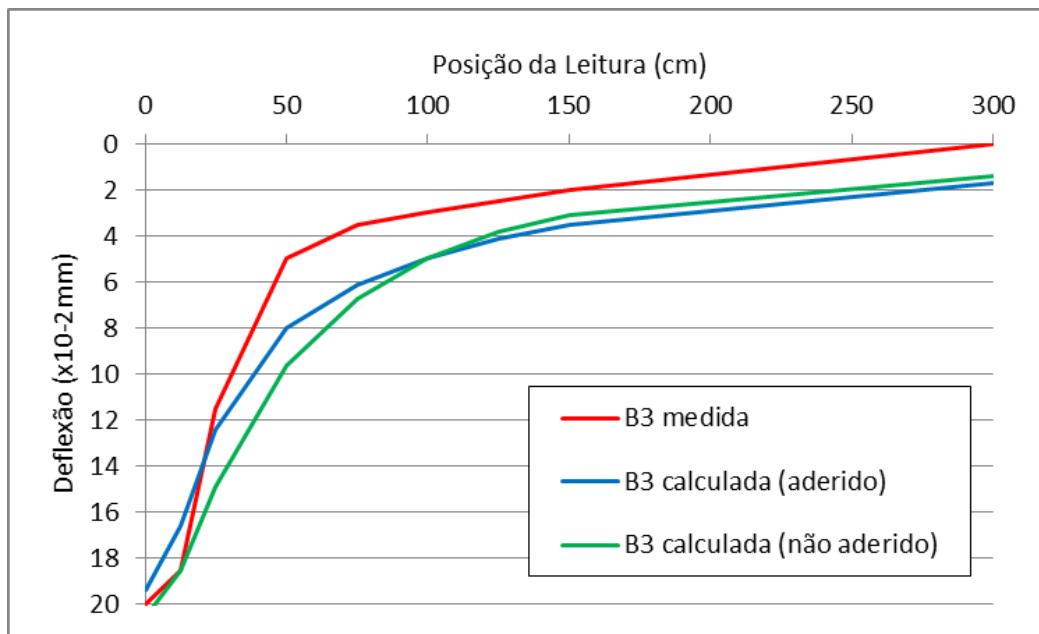
#### 4.5 AVALIAÇÃO DAS RETROANÁLISES

Tendo em vista a impossibilidade da plena utilização dos softwares de análise elástica devido aos carregamentos aplicados nos ensaios de campo, foi necessária a adaptação conforme demonstrado no item 4.1. Contudo, esta metodologia adaptativa não faz a conversão de dados obtidos por viga Benkelman para dados de FWD, mas sim torna possível a retroanálise das bacias obtidas por viga Benkelman por ajustá-las a uma condição semelhante a um ensaio de FWD.

Para avaliar os efeitos que esta adaptação causa nos módulos de resiliência retroanalisados e também avaliar o próprio levantamento deflectométrico, foram geradas bacias teóricas através do programa AEMC, do pacote MeDiNa, a partir dos módulos inferidos pelo BackMedina e, posteriormente, estas bacias foram comparadas com as bacias medidas em campo. O Gráfico 61 exemplifica através da bacia B3 do Trecho 1 como se comportam os delineamentos das bacias medida e calculadas. Os mesmos dados de entrada utilizados na retroanálise pelo BackMedina foram utilizados no software AEMC, bem como os próprios módulos de resiliência inferidos. Além disso, na avaliação dos módulos inferidos considerando camadas aderidas, as deflexões também foram calculadas considerando as camadas aderidas, já na avaliação dos módulos inferidos considerando as camadas não aderidas, as deflexões foram calculadas desconsiderando aderência entre os estratos.

**Gráfico 61 - Comparação das bacias de deflexão 3 - Trecho 1**

Bacia	Condição	Deflexões ( $\times 10^{-2}$ mm)									Erro ( $\mu\text{m}$ )
		D <sub>0</sub>	D <sub>12,5</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>75</sub>	D <sub>100</sub>	D <sub>125</sub>	D <sub>150</sub>	D <sub>300</sub>	
B3	Medida	20,0	18,5	11,5	5,0	3,5	3,0	2,5	2,0	0,0	-
	Calculada (aderido)	19,4	16,6	12,4	8,0	6,1	5,0	4,1	3,5	1,7	1,9
	Calculada (não aderido)	20,5	18,5	14,9	9,6	6,7	5,0	3,8	3,1	1,4	2,4



Fonte: o Autor (2020).

No caso desta bacia, apesar de as deflexões medidas e calculadas não serem idênticas, o delineamento das bacias são parecidos, sendo observada a diferença que a bacia medida apresentou menores deflexões nas leituras mais afastadas do carregamento. Vale ressaltar que as bacias calculadas têm o aspecto mais suavizado devido às considerações que o software faz de materiais elástico-lineares e homogêneos. As demais comparações são apresentadas no Apêndice E.

Os erros apresentados no Gráfico 61 não são os erros da retroanálise, mas sim o distanciamento entre a bacia medida em campo e as bacias calculadas pelo AEMC, determinados através da raiz quadrática média – RMS. Tendo em vista que a bacia medida em campo foi utilizada para a inferência dos módulos de resiliência das camadas do pavimento pelo BackMedina, gerando uma bacia calculada e um erro que compara estas duas bacias, espera-se que as bacias calculadas pelo AEMC, programa do mesmo pacote, calcule a mesma bacia de deflexão determinada pelo BackMedina, ou seja, os erros encontrados pelos dois softwares deveriam ser iguais, entretanto isso não ocorre pelo fato dos carregamentos

utilizados como dados de entrada serem diferentes. No *software* BackMedina foi utilizado o carregamento de eixo padrão modificado para que se enquadrasse nos requisitos do programa (viga Benkelman para FWD), já no *software* AEMC o carregamento utilizado foi eixo padrão convencional.

Observando todas as bacias de deflexão calculadas no Apêndice E, se nota que os casos onde as análises foram feitas com os módulos de resiliência considerando as camadas não aderidas geram bacias calculadas com deflexões maiores nas posições de leitura iniciais quando comparadas as bacias determinadas a partir dos módulos considerando camadas aderidas, fenômeno que ocorre devido a maior independência entre cada estrato, onde são geradas maiores tensões e deformações. Contudo, o item 4.2.1 mostra que os módulos de resiliência retroanalisados considerando camadas não aderidas são maiores que os módulos na condição de camadas aderidas, ou seja, suas deflexões determinadas deveriam ser menores. Torna-se explícito então que a condição de aderência entre camadas é um fator de grande influência na avaliação de uma estrutura de pavimento onde, mesmo estruturas mais rígidas tendem a sofrer maiores deformações quando seus estratos não são aderidos.

#### 4.6 ANÁLISE DE VIDA ÚTIL

A partir das retroanálises dos módulos de resiliência feita com o BackMedina e com o BAKFAA e empregando o *software* de Análise Elástica de Múltiplas Camadas – AEMC para o cálculo das deformações específicas, tanto de tração na fibra inferior do revestimento quanto de compressão no topo do subleito, foi possível fazer a estimativa de vida útil dos pavimentos. Foram utilizadas as Equações 12 e 17, apresentadas no item 2.5 do Referencial Teórico para prever o número de solicitações do eixo padrão que são necessárias para que as estruturas apresentem trincamentos e afundamentos de trilha de roda.

A Tabela 42 traz as informações das análises mecanísticas dos três trechos analisados. Para o cálculo da vida de fadiga dos trechos foram utilizadas as médias dos módulos de resiliência dos revestimentos, pois de acordo com Pandolfo, Echeverria e Specht (2016) a sua média é capaz de representar o trecho. Além disso, as deformações específicas de tração no revestimento e de compressão no

subleito foram calculadas a partir da aplicação de uma carga de eixo padrão rodoviário.

**Tabela 42 - Análise macanística para o cálculo da vida de fadiga**

Trecho	Condição das camadas	BackMedina			BAKFAA		
		MR (MPa)	$\epsilon_t$ (m/m)	$\epsilon_v$ (m/m)	MR (MPa)	$\epsilon_t$ (m/m)	$\epsilon_v$ (m/m)
1	Aderido	7682,37	6,17E-5	3,18E-5	7824,31	6,29E-5	3,48E-5
	Não aderido	9182,75	9,14E-5	-	10720,52	8,02E-5	-
2	Aderido	6502,70	3,08E-5	9,01E-5	6734,18	3,07E-5	8,87E-5
	Não aderido	7713,80	6,54E-5	-	8710,70	6,89E-5	-
3	Aderido	5690,70	4,45E-5	1,11E-4	6206,88	5,16E-5	1,09E-4
	Não aderido	7453,20	8,15E-5	-	8797,25	8,56E-5	-

**Fonte:** o Autor (2020).

Em ambos os casos, utilizando os módulos retroanalisados pelo BackMedina quanto pelo BAKFAA, as deformações específicas de tração na fibra inferior dos revestimentos apresentaram resultados na casa de  $10^{-5}$  m/m. Porém, para o cálculo das deformações específicas no topo do subleito, nos casos de consideração de camadas não aderidas, o software AEMC indicou que não ocorrem deformações de compressão. Diferentemente da situação onde as camadas estão totalmente aderidas, formando um elemento único de estrutura de pavimento, as camadas não aderidas proporcionaram a não compressão dos subleitos devido às altas rigidezes das suas camadas superiores.

A Tabela 43 mostra os resultados da aplicação dos dados de deformação específica contidos na Tabela 42 nas Equações 12 e 17, fazendo a estimativa de vida de fadiga com o cálculo de  $N_f$  e  $N_{atr}$ , avaliando os trincamentos e deformações permanentes, respectivamente. Além disso, com a impossibilidade de se fazer um estudo de tráfego dos trechos, analisou-se o levantamento viário realizado pela Prefeitura de Joinville (2014), a fim de comparar vias similares às do estudo. Foi observado o número de repetições do eixo padrão ( $N_{med}$ ) de vias de mesmas características estimadas para o ano de 2018, mesmo ano dos levantamentos deflectométricos deste trabalho. O Trecho 1 foi comparado ao  $N_{med}$  de uma via arterial de mesmas características de tráfego e sentido. O Trecho 3 foi utilizado o  $N_{med}$  de uma via local próxima ao trecho e por apresentarem características similares de tráfego. Já para o Trecho 2 não foi necessária a comparação com outras vias, uma vez que já existia o levantamento da mesma.

**Tabela 43 – Estimativa de vida dos pavimentos**

Trecho	Condição das camadas	BackMedina		BAKFAA		Medido
		N <sub>f</sub>	N <sub>atr</sub>	N <sub>f</sub>	N <sub>atr</sub>	
1	Aderido	1,91E7	1,86E11	1,78E7	1,25E11	3,64E5
	Não aderido	5,51E6	-	7,09E6	-	
2	Aderido	1,52E8	1,76E9	1,51E8	1,88E8	1,44E6
	Não aderido	1,61E7	-	1,27E7	-	
3	Aderido	5,97E7	6,87E8	3,60E7	7,34E8	3,08E6
	Não aderido	8,88E6	-	6,85E6	-	

Fonte: o Autor (2020).

Os resultados mostram que as estruturas de pavimento com camadas totalmente aderidas entre si têm uma maior vida de fadiga, comparados os N<sub>f</sub> nas duas situações de aderência, ou seja, pavimentos constituídos de estratos não aderidos apresentam defeitos de trincas mais precocemente. Isto ocorre devido ao maior travamento das camadas que geram menores tensões de tração nas camadas de revestimento. Contudo, fazendo a comparação do N<sub>f</sub> e N<sub>atr</sub> com os N<sub>med</sub>, percebe-se que o número de passagem de veículos necessários para causar trincamentos superficiais e afundamentos permanentes é superior ao número N levantado no ano de 2018, assim, não existem defeitos nos trechos em estudo e ainda não há a necessidade da tomada de ações de manutenção.

No que diz respeito à análise de vida de fadiga o software BackMedina inferiu módulos de resiliência de revestimentos mais baixos comparados ao BAKFAA, porém os módulos retroanalisisados das bases foram maiores, gerando deformações de tração menores na fibra inferior dos revestimentos e, consequentemente, acarretando em maiores valores de N<sub>f</sub>. Além disso, é possível perceber que na condição de camadas totalmente aderidas o número de solicitações para que surjam danos no pavimento é maior, resultado da melhor distribuição de tensões nas camadas, onde não existem descontinuidades devido à aderência. Em relação à análise de deformações permanentes, destacam-se os valores elevados de N<sub>atr</sub> do Trecho 1, decorrentes das altas rigidezes das camadas granulares e de revestimento que contribuíram para a baixas deformações no subleito.

## 5 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste estudo foi a avaliação estrutural de três pavimentos urbanos da cidade de Joinville – SC através da retroanálise de bacias de deflexão levantadas em campo por ensaio de viga Benkelman. A retroanálise ainda gera algumas incertezas no meio técnico devido às considerações de materiais homogêneos e lineares feitas pelos softwares de análise elástica, porém é uma maneira útil de se estimar e avaliar as propriedades das camadas dos pavimentos existentes.

Parte dessa dúvida que os processos de retroanálise geram vêm da não unicidade de resultados encontrados por diferentes programas computacionais, como foi o caso aqui avaliado. Apesar de os softwares BackMedina e BAKFAA avaliarem os mesmos parâmetros físicos dos pavimento e os mesmos carregamentos ao qual estavam submetidos, ainda assim resultam em módulos de resiliência diferentes. Enquanto o BackMedina infere às camadas rigidezes menores o BAKFAA resulta em rigidezes maiores e com maiores erros de retroanálise devido ao seu processo iterativo que tende a manter o delineamento da bacia de deflexão teórica de partida. Este fato também torna os módulos resilientes inferidos pelo BAKFAA menos dispersos, com coeficientes de variação menores, representando uma menor precisão dos resultados dos módulos em detrimento ao delineamento preestabelecido.

Entretanto, independentemente do software, foram observados maiores rigidezes inferidas ao Trecho 1 e menores rigidezes no Trecho 3, evidenciando a influência da passagem do tráfego e do tempo nos módulos de resiliência dos materiais das camadas, uma vez que o primeiro trecho teve sua execução feita recentemente e inauguração no ano de 2018, já o outro trecho teve sua abertura ao tráfego há mais de duas décadas. Além disso, o Trecho 1 foi o único que se observou locais onde os módulos de resiliência apresentaram valores discrepantes aos demais, porém constatou-se que os levantamentos deflectométricos desta localidade foram feitos sobre um aterro de solo reforçado, não representando um defeito estrutural na via.

Contudo, também foram observados módulos de resiliência retroanalisados numericamente superiores aos módulos da maioria das literaturas consultadas.

Algumas causas podem ser atribuídas a esta constatação: a abordagem empírica com que o levantamento com viga Benkelman foi realizado, apresentando muitos erros sistemáticos de ensaio; a desconsideração do efeito de superposição do carregamento imposto por metade do eixo do caminhão, uma vez que o ensaio de viga Benkelman considera apenas um semieixo; e a necessidade de correção das deflexões medidas por viga Benkelman para que se enquadrassem ao carregamento de FWD aceito pelos softwares que, apesar de serem as mesmas deformações, não representam a situação real de carregamento. Esta última situação pode gerar dúvidas a respeitos dos resultados da retroanálise, porém a conversão dos carregamentos é uma metodologia válida para se aplicar, por exemplo, na avaliação de pavimentos em localidades que não dispõem de muitos recursos financeiros.

Como esperado as rigidezes dos estratos dos pavimentos aumentaram após a correção das deflexões em função da temperatura, pois a temperatura de referência utilizada era menor que a do ambiente durante os levantamentos deflectométricos. É importante ressaltar que a metodologia de correção de temperatura a 20°C utilizada neste trabalho não é usual e muito menos normatizada no Brasil, entretanto se mostrou útil por atribuir menores pesos às deflexões mais afastadas do carregamento. Nesta pesquisa esta correção foi feita com o intuito de comparar os módulos de resiliência retroanalisados dos diferentes trechos, uma vez que as deformações nas vias foram medidas em situações de temperaturas diferentes, entretanto a correção das bacias de deflexão em função da temperatura é mais interessante para casos de análise estrutural de um mesmo pavimento em situações climatológicas distintas, garantindo que a temperatura não seja um fator que influenciará nos módulos inferidos.

Em relação às condições de aderência entre interfaces das camadas, tanto as retroanálises com o software BackMedina quanto como BAKFAA, mostraram que a consideração de interfaces totalmenteaderidas resulta em módulos de resiliência menores comparados aos módulos das camadas na consideração de interfaces não aderidas. Porém, apesar de inferirem camadas mais rígidas, a consideração de camadas não aderidas também gera estados de esforços maiores nos pavimentos, principalmente de tensões de tração na fibra inferior do revestimento e de tensão vertical no subleito, o que leva a uma diminuição da vida útil das estruturas. Assim sendo, a não aderência entre estratos acelera o surgimento de defeitos, ressaltando

a importância dos estudos deste parâmetro no dimensionamento e reforço de pavimentos.

Contudo, observando os números de solicitações necessárias para que ocorram defeitos de trincas e/ou afundamentos e comparando-os aos números de solicitações estimadas das vias para o ano do levantamento, percebe-se que todos os trechos, em teoria, não precisariam de manutenção. Entretanto, o que na realidade foi observado, principalmente no Trecho 2 que é mais antigo e mais solicitado, é que existem alguns defeitos superficiais e que já ocorreram intervenções para a sua conservação, evidenciando o fato que a inexistência de controle tecnológico durante a sua execução, ou ainda, a não conferência de espessuras reais de campo, gera resultados imprecisos dos módulos de resiliência retroanalisados e, consequentemente, de análise de vida útil.

O novo Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa, mesmo ainda não estando oficializado como a metodologia a ser empregada no Brasil, permite a avaliação de pavimentos já existentes através do software BackMedina. Este programa de retroanálise se mostrou eficiente na inferência de módulos de resiliência dos materiais quando comparado com um software estrangeiro, como o BAKFAA, gerando retroanálises com menores erros. Entretanto, a análise laboratorial dos materiais ainda é um diferencial quando se avalia estruturalmente um pavimento, sendo até mesmo uma sugestão para futuros trabalhos, para que se tente investigar e suprir as deficiências de projetos de pavimentos urbanos de Joinville que não recebem o devido controle tecnológico.

## REFERÊNCIAS

- ALBERNAZ, C. A. V. **Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão.** 1997. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica:** materiais projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros.** 3. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.
- BORGES, C. B. S. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina.** 2001. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- BUENO, L. D. **Avaliação deflectométrica e de rigidez: estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS.** 2016. 471 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- CANESTRARI, F.; FERROTI, G.; LU, X.; MILLIEN, A.; PARTL, M. N.; PETITI, C.; PHELIPOT-MARDELÉ, A.; PIBER, H.; RAAB, C. Mechanical testing of interlayer bonding in asphalt pavements. In: RILEM STATE-OF-THE-ART REPORTS. **Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials.** 9. v. Suíça: Springer Nature, 2013. cap. 6, p. 303-360.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO, J. R., F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118:2014.** 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.
- COSTA, G. M.; ALBUQUERQUE, F. S.; MENDONÇA, A. T.; ALBUQUERQUE, T. M. A. Efeito de diferenças de características mecânicas de materiais para pavimentos obtidos em laboratório e campo. In: **XXVIII ANPET** – Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, Curitiba, Paraná, 2014.
- DER – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO. **IP-DE-P00/003 – avaliação funcional e estrutural de pavimento.** São Paulo, 2006.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 024: Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman.** Rio de Janeiro, 1994.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – PRO 011: Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis.** Rio de Janeiro, 1979.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – PRO 273: Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”. Rio de Janeiro, 1996.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de conservação rodoviária, publicação IPR – 710.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação, publicação IPR – 719.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2006a.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos, publicação IPR – 720.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2006b.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 005/2003 – TER – Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia.** Rio de Janeiro, 2003.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 133/2010 – ME – Pavimentação asfáltica – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2010.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 134/2017 – ME – Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2017.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 410/2017 – ME – Solos – Prova de carga estática em placa para controle de qualidade na execução de aterros solo-enrocamento – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2017.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Relatório técnico – Catálogo de soluções de manutenção para pavimentos flexíveis.** Rio de Janeiro, 2015.

FERNANDES, I. S. **Avaliação do comportamento mecânico da camada de brita graduada “in situ”.** 2000. 199 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FERNANDES JR., J. L. **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos.** 1994. 328 p. Tese (Doutorado em Transportes) Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

FAA – FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **BAKFAA – FAA Backcalculation.** Versão 2.1.0.1, out 2017. Disponível em: <<https://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Safety-PapersPublications/Airport>>

-Safety-Detail/ArtMID/3682/ArticleID/11/BAKFAA-version-2101 > Acesso em: mar. 2019.

FERNANDES, I. S.; TRICHÊS, G. Contribuição à caracterização do comportamento mecânico da camada de brita graduada "in situ". In: Seminário Nacional de Modernas Técnicas Rodoviárias, 2, 2000, Florianópolis: **Anais do 2º Seminário Nacional de Modernas Técnicas Rodoviárias**. Florianópolis, 2000.

FRANCO, F. A. C. P. **BackMedina**: módulo de retroanálise do MeDiNa. Versão 1.1.0, abr. 2018. Disponível em: < [http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/installar\\_medina\\_1\\_0\\_2.msi/view](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/installar_medina_1_0_2.msi/view) > Acesso em: out. 2018.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 2007. 315 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GOMES, L. H. C.; ALBERNAZ, C. A. V.; FERNANDES, J. L. Estudo da equivalência operacional entre equipamentos deflectométricos – estudo de caso em rodovia localizada em Ouro Branco – MG. In: Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões BRASVIAS, 8, 2013, Santos: **Anais 8ª CBR & C BRASVIAS**. Santos: CBR & C BRASVIAS, 2013.

GOMES, L. H. C. **Equivalência operacional entre equipamentos deflectométricos – Estudo de caso em rodovia localizada em Ouro Branco – MG**. 2012. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

GRASMICK, J. G.; MOONEY, M. A.; SURDAHL, R.W.; VOTH, M.; SENSENEY, C. Capturing a layer response during the curing of stabilized earthwork using a multiple sensor lightweight deflectometer. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Reston, VA, 2015, v. 27, n. 6. Disponível em: < [https://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001137](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001137) >. Acesso em: 18 maio 2018.

GUZZARLAPUDI, S. D.; ADIGOPULA, V. K.; KUMAR, R. Comparative studies of lightweight deflectometer and Benkelman beam deflectometer in low volume roads. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**. Índia, 2016, v. 3, n. 5, p. 438-447. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756416302008> >. Acesso em: 17 maio 2018.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. P. **Modern Pavement Management**. 1. ed. United States: Krieger Publishing Company, 1994.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Joinville – IBGE Cidades**. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/joinville/panorama> >. Acesso em: 21 fev. 2019.

JOHNSTON, M. G. **Estudo de obtenção do número estrutural em pavimentos flexíveis.** 2001. 187 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

KAKUDA, F. M. **Desenvolvimento e utilização de um equipamento de grandes dimensões na análise do comportamento mecânico de uma seção de pavimento sob carregamento cíclico.** 2010. 290 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

KAKUDA, F. M.; PARREIRA, A. B.; FABBRI, G. T. P. Desenvolvimento de um equipamento de grandes dimensões para análise de estruturas de pavimentos. **Revista Transportes.** São Paulo, 2010, v. 18, n. 2, p. 81-89. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/427/348>>. Acesso em: 23 maio 2018.

KARAMI, M.; NIKRAZ, H.; SEBAYANG, S.; IRIANTI, L. Laboratory experiment on resilient modulus of BRA modified asphalt mixtures. **International Journal of Pavement Research and Technology.** China, 2018, v. 11, n. 1, p. 38-46. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681417300810>>. Acesso em: 24 maio 2018.

KIM, R. Y.; HIBBS, B.; LEE, Y. Temperature correction of deflections and backcalculated asphalt concrete moduli. **Transportation Research Board,** Washington, 1995, v. 1473, p. 55-62. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1473/1473-007.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2019.

KUMAR, R.; ADIGOPULA, V. K.; GUZZARLAPUDI, S. D. Stiffness-based quality control evaluation of modified subgrade soil using lightweight deflectometer. **Journal of Materials in Civil Engineering.** Reston, VA, 2017, v. 29, n. 9. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001958>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

LIRA, S. A. **Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações.** 2004. 209 p. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia dos Setores de Ciências Exatas e de Tecnologia) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

LOPES, J. E. R. **Contributo para o estudo da utilização do deflectómetro de impacto ligeiro.** 2010. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.

MACEDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para a avaliação estrutural de pavimentos flexíveis.** 1996. 478 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

MACHADO, A. B. A. S. B. **Contribuição para a avaliação estrutural de infraestruturas rodoviárias por métodos não destrutivos.** 2012. 196 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

MARCON, A. F. **Contribuição ao desenvolvimento de um Sistema de Gerência de Pavimentos para a malha rodoviária de Santa Catarina**. 1996. 398 p. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1996.

MARTÍNEZ, R. M.; PIUSSEAUT, E. T. Obtención de um modelo computacional com el software SIGMA/W, para reproducir los resultados del ensayo com la viga Benkelman. **Revista de Arquitectura e Ingeniería**. Cuba, 2014, v. 8, n. 1, p. 1-13. Disponible em: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4741445>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

MAZARI, M.; TIRADO, C.; ABDALLAH, I.; NAZARIAN, S. Mechanistic estimation of lightweight deflectometer target field modulus for construction quality control. **Geotechnical Testing Journal**. West Conshohockner, PA, 2016, v. 39, n. 6, p. 965-977. Disponible em: <[https://www.astm.org/DIGITAL\\_LIBRARY/JOURNALS/GEOTECH/PAGES/GTJ20150266.htm](https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/GEOTECH/PAGES/GTJ20150266.htm)>. Acesso em: 17 maio 2018.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciêncie Ltda., 2015.

MEDINA, J. Tropical soils in pavement design. In: ISSMGE, 12, 1989, Rio de Janeiro: **Trabalho XII ISSMGE**. Rio de Janeiro: ISSMGE, 1989.

MINHOTO, M.; PAIS, J. C.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. P. The influence of temperature variation in the prediction of the pavement overlay life. **Road Materials and Pavement Design**. Londres, 2005, v. 6, n. 3, p. 365-384. Disponible em: <[https://www.researchgate.net/publication/245440894\\_The\\_Influence\\_of\\_Temperature\\_Variation\\_in\\_the\\_Prediction\\_of\\_the\\_Pavement\\_Overlay\\_Life](https://www.researchgate.net/publication/245440894_The_Influence_of_Temperature_Variation_in_the_Prediction_of_the_Pavement_Overlay_Life)>. Acesso em: 17 jul. 2019.

MOHAMMAD, L. N.; HUANG, B.; PUPPALA, A. J.; ALLEN, A. Regression model for resilient modulus of subgrade soils. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. Washington, DC, 2014, v. 1687, p. 47-54. Disponible em: <<https://trrjournalonline.trb.org/doi/abs/10.3141/1687-06>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

MOMM, L.; DOMINGUES, F. A. A. Comportamento de misturas asfálticas à deflexão: módulo, um dilema não resolvido. In: Reunião Anual de Pavimentação, 30, 1996, Salvador: **Trabalho 30ª RAPv**. Salvador: RAPv, 1996.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. 366 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

MOUSAVI, S. H.; GABR, M. A.; BORDEN, R. H. Subgrade resilient modulus prediction using light-weight deflectometer data. **Canadian Geotechnical Journal**. Canadá, 2017, v. 54, n. 3, p. 304-312. Disponível em: <<https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/75590/1/cgj-2016-0062.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2018.

NGUYEN, B. T.; MOHAJERANI, A. Resilient modulus of fine-grained soil and a simple testing and calculation method for determining an average resilient modulus value for pavement design. **Transportation Geotechnics**. Austrália, 2016, v. 7, p. 59-70. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214391216300095>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

NÓBREGA, E. S. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**. 2003. 384 p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

PAIS, J.; SANTOS, C.; PEREIRA, P.; KALOUSH, K. The adjustment of pavement deflection due to temperature variation. **International Journal of Pavement Engineering**. Londres, 2018. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298436.2018.1557334?journalCode=gpav20>>. Acesso em: 17 jul. 2019.

PANDOLFO, D. K.; ECHEVERRIA, J. A. S.; SPECHT, L. P. Análise mecanística de um pavimento flexível restaurado a partir do MR obtido em diferentes softwares de retroanálise com dados de viga Benkelman. **Revista de Engenharia Civil IMED**. Passo Fundo, 2016, v. 3, n. 2, p. 71-86. Disponível em: <<https://seer.imed.edu.br/index.php/revistaec/article/view/1593/1032>>. Acesso em: 23 maio 2018.

PARKER JR., F. Estimation of paving materials design moduli from Falling Weight Deflectometer measurement. **Transportation Research Record**, Washington, 1991, v. 1293, p. 42-51.

PEREIRA, D. S. **Estudo do comportamento de pavimentos de concreto simples em condições de aderência entre placa de concreto e base cimentada ou asfáltica**. 2003. 299 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PEREIRA, J. M. B. **Um procedimento de retroanálise para pavimentos flexíveis baseado na teoria do ponto inerte e em modelagem matemática**. 2007. 938 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

PFEIL, W.; PFEIL, M. S. **Estruturas de Madeira**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2. ed. Rio de Janeiro: S. Pinto, 2002.

PREUSSLER, E. S.; VALE, A. F.; CARVALHO, R. L.E.; PINTO, I. E. Retroanálise – processos para a avaliação estrutural de pavimentos. In: Reunião Anual de

Pavimentação, 32, 2000, Brasília: **Trabalho 32ª RAPv.**.. Brasília: RAPv, 2000, v.1 p. 336-346.

**PREUSSLER, L. A. Contribuição ao estudo de deformabilidade de camadas de pavimentos.** 2007. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

**PREFEITURA DE JOINVILLE. Serviço de avaliação da superfície de pavimentos flexíveis, dimensionamento de recapeamento, reforços de pavimentos flexíveis e projetos de engenharia viária.** Joinville: Fundação Instituto de Pesquisa e Planejamento para o Desenvolvimento Sustentável de Joinville – IPPUJ, 2014.

**QUEIROZ, C. A. V. Performance prediction models for pavement management in Brazil.** 1981. 317 p. Tese (Doutorado em Filosofia) Universidade do Texas, Austin, 1981.

**RESENDE, M. R.; BERNUCCI, L. L. B.; QUINTANILHA, J. A.** Classificação híbrida: pixel a pixel e baseada em objetos para o monitoramento da condição da superfície dos pavimentos rodoviários. **Boletim de Ciências Geodésicas.** Curitiba, 2012, v. 18, n. 3, p. 397-420. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/29183>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

**RÉUS,T. F.; SILVA, C. A. P.; FONTENELE, H. B.** Análise empírico-mecanística do efeito do excesso de carga veículos comerciais. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil.** Goiânia, 2014, v. 9, n. 2, p. 57-70. Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/reec/article/view/29489>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

**ROCHA FILHO; N. R.** **Estudo de técnicas para avaliação estrutural de pavimentos por meio de levantamentos deflectométricos.** 1996. 185 p. Dissertação (Mestrado em Ciência na Área de Infraestrutura de Transportes) Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1996.

**RODRIGUES, P. R.** **Medidas de deflexão em pavimentos asfálticos urbanos com o deflectômetro de peso leve.** 2018. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2018.

**SAAVEDRA, J.** Saavedra: Joinville está distante do objetivo de pavimentar 722 quilômetros de ruas. **A Notícia**, Joinville, 02 dez. 2017. Disponível em: <<http://anoticia.clicrbs.com.br/sc/geral/noticia/2017/12/saavedra-joinville-esta-distante-do-objetivo-de-pavimentar-722-quilometros-de-ruas-10051970.html>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

**SALLES, L. S.; BALBO, J. T.** Experimental continuously reinforced concrete pavement parameterization using nondestructive methods. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais.** São Paulo, 2016, v. 9, n. 2, p. 263-274. Disponível em: <<http://www.revistas.ibracon.org.br/index.php/riem/issue/view/58>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

SALVIANO, W. R. A. **Análise do controle construtivo de um pavimento semirrígido por deflexão.** 2015. 294 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SALVIANO, W. R. A.; MOTTA, L. G. M. Análise do controle construtivo de um trecho de pavimento semirrígido por deflexão. In: **44º Reunião Anual de Pavimentação**, Foz do Iguaçu, Paraná, 2015.

SANTOS. A. G.; ASSIS, R. K. M.; FESNANDES JR, J. L. Efeito da aderência entre camadas na previsão de desempenho de pavimentos asfálticos. **Revista Transportes**. São Paulo, 2019, v. 27, n. 2, p. 89-101.

SANTOS, P. J. C. R. **Utilização de deflectômetro de peso leve (LWD) em pavimento rodoviário.** 2014. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

SANTOS, R. O. G.; REZENDE, L. R.; SILVA, V. M. S.; COSTA, L. C. S.; HÓMEZ, J. H. G. Monitoramento do desempenho da técnica de reciclagem profunda em pavimentos do estado de Goiás. **Revista Transportes**. São Paulo, 2017, v. 25, n. 4, p. 27-41. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1244/664>>. Acesso em: 23 maio 2018.

SARKER, P.; TUTUMLUER, E. Falling weight deflectometer testing based mechanistic-empirical overlay thickness design approach for low-volume road in Illinois. **International Conference on Transportation and Development**. Illinois, 2016, p. 920-932. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784479926.083>>. Acesso em: 17 maio 2018.

SCHERER, R. G. **Estudo da influência da condição de aderência entre camadas de pavimentos em seu comportamento mecânico.** 2018. 172 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Preservação Ambiental) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

SCHULTZ, D. P.; SCHULTZ, S. E. **História da psicologia moderna.** 16. ed. São Paulo: Cultrix, 1992.

SEPUD – SECRETARIA DE PLANEJAMENTO URBANO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Mobilidade. In: **Joinville - Cidade em dados 2018**. Joinville: Prefeitura de Joinville, 2018.

SHRP – STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Procedure for temperature correction of maximum deflections.** Washington: National Research Council, 1993.

SILVA, C. F. S. C. **Análise de tensões em pavimentos a partir de modelo físico instrumentado.** 2014. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SILVA, T. O.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; CALIJURI, M. L.; MACHADO, C. C. Influência do tráfego de veículos comerciais em rodovias vicinais não pavimentadas: estudo de caso aplicado à VCS 346, Viçosa, MG. **Revista Árvore**. Viçosa, 2011, v. 35, n. 3, p. 539-545. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622011000300016&script=sci\\_abstract&tlang=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622011000300016&script=sci_abstract&tlang=pt)>. Acesso em: 21 abr. 2018.

SIMM JR, G. P. **Estudo do comportamento de estruturas de pavimentos com materiais alternativos visando a redução dos custos de pavimentação no Estado de Santa Catarina**. 2007. 333 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SOLOCAP. **FWD (Falling Weight Deflectometer) – Avaliação Estrutural**. Disponível em: <[http://www.solocap.com.br/solocap2/?page\\_id=669](http://www.solocap.com.br/solocap2/?page_id=669)>. Acesso em: 15 abr. 2018.

STAMP; D. H.; MOONEY, M. A. Influence of lightweight deflectometer characteristics on deflection measurement. **Geotechnical Testing Journal**. West Conshohocken, PA, 2013, v. 36, n. 2, p. 216-226. Disponível em: <[http://uct.mines.edu/publications/mooney/2013/InfluenceLightWeightDeflectometer\\_GTJ\\_2013.pdf](http://uct.mines.edu/publications/mooney/2013/InfluenceLightWeightDeflectometer_GTJ_2013.pdf)>. Acesso em: 17 maio 2018.

SULEIMAN, M. T.; GOPALAKRISHNAN, K.; KEVERN, J. T. Structural response of previous concrete pavement system using falling weight deflectometer testing and analysis. **Journal of Transportation Engineering**. Reston, VA, 2011, v. 137, n. 12, p. 907-917. Disponível em: <[https://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000295](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000295)>. Acesso em: 25 abr. 2018.

THEISEN, K. M.; MATTOS, J. R. G.; TREICHEL, D.S.; CERATTI, J. A. P. Método de retroanálise de bacias obtidas por carregamento de eixo padrão através do uso de softwares adaptados para FWD. In: **XXIII ANPET** – Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes: Editora da UFFES, v. 2. Vitória, Espírito Santo, 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](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: 28 mar. 2019.

TUTIKIAN, B. F.; BOLINA, F. L.; FERNANDES, B.; EHRENBRING, H. Z.; GIL, A. M. Análise da trafegabilidade de rodovia segundo as manifestações patológicas nas placas de concreto: estudo de caso. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**. São Leopoldo, 2015, v. 11, n. 1, p. 9-21. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/295087714\\_Analise\\_da\\_trafegabilidade\\_de\\_rodovia\\_segundo\\_as\\_manifestacoes\\_patologicas\\_nas\\_placas\\_de\\_concreto\\_estudo\\_de\\_caso](https://www.researchgate.net/publication/295087714_Analise_da_trafegabilidade_de_rodovia_segundo_as_manifestacoes_patologicas_nas_placas_de_concreto_estudo_de_caso)>. Acesso em: 25 abr. 2018.

USDOT – UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Use of nondestructive testing in the evaluation of airport pavements**. Advisory Circular AC, n. 150/5370-11B. Washington, 2011.

VASSOLER, G.; CHONG, W.; SPECHT, L. P. Comportamento mecânico de pavimentos flexíveis submetidos a gradientes térmicos. **Acta Scientiarum. Technology.** Maringá, 2011, v. 33, n. 3, p. 265-271. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/10848>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.

YU, J.; XIONG, C.; ZHANG, X. LI, W. More accurate modulus back-calculation by reducing noise information from in-situ measured asphalt pavement deflection basin using regression model. **Construction and Building Materials.** China, 2018, v. 158, p. 1026-1034. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817320524>>. Acesso em: 29 maio 2018.

ZHENG, Y.; ZHANG, P.; LIU, H. Correlation between pavement temperature and deflection basin form factors of asphalt pavement. **International Journal of Pavement Engineering.** Londres, 2017, v. 20, n. 8, p. 874-883. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/319063486\\_Correlation\\_between\\_pavement\\_temperature\\_and\\_deflection\\_basin\\_form\\_factors\\_of\\_asphalt\\_pavement](https://www.researchgate.net/publication/319063486_Correlation_between_pavement_temperature_and_deflection_basin_form_factors_of_asphalt_pavement)>. Acesso em: 17 jul. 2019.

## ANEXO A – PLANILHA DE ENSAIO DA VIGA BENKELMAN PARA OS TRECHOS 1, 2 E 3

ENSAIO DE VIGA BENKELMAN - AVENIDA SANTOS DUMONT (04/01/2018, TEMP. AR=26 °C)													
SEGMENTO	ENSAIO	LOGRADOURO	OBSERVAÇÃO	DEFORMAÇÃO MEDIDA (mm) LEVANTAMENTO DE CAMPO									
				L <sub>0</sub>	L <sub>12,5</sub>	L <sub>25</sub>	L <sub>50</sub>	L <sub>75</sub>	L <sub>100</sub>	L <sub>125</sub>	L <sub>150</sub>	L <sub>300</sub>	L <sub>1000</sub>
1	E-1	Av. Stos. Dumont	Viaduto, pista da esquerda, bordo externo.	3,98	3,91	3,87	3,81	3,80	3,79	3,79	3,78	3,77	3,77
1	E-2	Av. Stos. Dumont	Viaduto, pista da esquerda, bordo externo.	5,34	5,29	5,06	4,96	4,91	4,90	4,88	4,86	4,86	4,86
1	E-3	Av. Stos. Dumont	Viaduto, pista da esquerda, bordo externo.	5,05	5,02	4,88	4,75	4,72	4,71	4,70	4,69	4,65	4,65
1	E-4	Av. Stos. Dumont	Pista da direita, eixo (Portaria da transstusa).	3,29	3,29	3,26	3,21	3,19	3,20	3,19	3,18	3,11	3,11
1	E-5	Av. Stos. Dumont	Pista da direita, eixo (Portaria da transstusa).	4,60	4,59	4,55	4,46	4,46	4,44	4,44	4,42	4,36	4,36
1	E-6	Av. Stos. Dumont	Pista da direita, eixo (Portaria da transstusa).	5,62	5,54	5,50	5,45	5,45	5,43	5,42	5,43	5,38	5,37
1	E-7	Av. Stos. Dumont	Pista da direita, eixo (Portaria da transstusa).	4,17	4,16	4,06	4,04	4,03	4,03	3,99	3,97	3,96	3,95
1	E-8	Av. Stos. Dumont	Pista da direita, eixo (Portaria da transstusa).	5,28	5,25	5,20	5,13	5,10	5,07	5,10	5,09	5,04	5,04
BACIA DE DEFORMAÇÃO COM VIGA BENKELMAN (NORMA DNIT 133/2010 -ME)													
				D <sub>0</sub>	D <sub>12,5</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>75</sub>	D <sub>100</sub>	D <sub>125</sub>	D <sub>150</sub>	D <sub>300</sub>	L <sub>1000</sub>
				10,50	7,00	5,00	2,00	1,50	1,00	1,00	0,50	0,00	0,00
				24,00	21,50	10,00	5,00	2,50	2,00	1,00	0,00	0,00	0,00
				20,00	18,50	11,50	5,00	3,50	3,00	2,50	2,00	0,00	0,00
				9,00	9,00	7,50	5,00	4,00	4,50	4,00	3,50	0,00	0,00
				12,00	11,50	9,50	5,00	5,00	4,00	4,00	3,00	0,00	0,00
				12,50	8,50	6,50	4,00	4,00	3,00	2,50	3,00	0,50	0,00
				11,00	10,50	5,50	4,50	4,00	4,00	2,00	1,00	0,50	0,00
				12,00	10,50	8,00	4,50	3,00	1,50	3,00	2,50	0,00	0,00

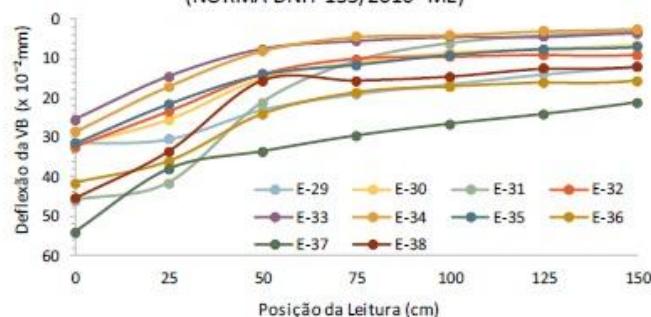
ENSAIO DE VIGA BENKELMAN - RUA OTTO BOEHM (26/01/2018, TEMP. AR=26 °C)													
SEGMENTO	ENSAIO	LOGRADOURO	OBSERVAÇÃO	DEFORMAÇÃO MEDIDA (mm) LEVANTAMENTO DE CAMPO									
				L <sub>0</sub>	L <sub>12,5</sub>	L <sub>25</sub>	L <sub>50</sub>	L <sub>75</sub>	L <sub>100</sub>	L <sub>125</sub>	L <sub>150</sub>	L <sub>300</sub>	L <sub>1000</sub>
2	E-9	R. Otto Boehm	Bordo direito, sentido bairro-centro.	4,48	4,43	4,33	4,23	4,19	4,18	4,16	4,14	4,10	4,00
2	E-10	R. Otto Boehm	Bordo direito, sentido bairro-centro.	5,79	5,71	5,58	5,39	5,34	5,25	5,22	5,22	5,20	5,00
2	E-11	R. Otto Boehm	Bordo direito, sentido bairro-centro.	6,67	6,63	6,48	6,34	6,28	6,24	6,21	6,18	6,12	6,11
2	E-12	R. Otto Boehm	Bordo direito, sentido bairro-centro.	7,29	7,03	6,96	6,63	6,62	6,59	6,85	6,86	6,84	6,84
2	E-13	R. Otto Boehm	Bordo direito, sentido bairro-centro.	4,48	4,28	4,20	4,02	4,00	3,98	3,96	3,95	3,95	3,95
2	E-14	R. Otto Boehm	Bordo direito, sentido bairro-centro.	5,35	5,35	5,21	5,10	5,07	5,00	5,00	4,99	4,99	4,99
2	E-15	R. Otto Boehm	Bordo direito, sentido bairro-centro.	6,67	6,65	6,65	6,54	6,46	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37
2	E-16	R. Otto Boehm	Bordo direito, sentido bairro-centro.	3,36	3,31	3,17	3,13	3,10	3,11	3,06	2,80	2,80	2,80
2	E-17	R. Otto Boehm	Bordo direito, sentido bairro-centro.	8,37	8,12	8,02	7,96	7,90	7,90	7,89	7,89	7,89	7,88
2	E-18	R. Otto Boehm	Bordo direito, sentido bairro-centro.	4,47	4,26	4,14	4,09	4,07	4,07	4,06	4,06	4,06	4,05
BACIA DE DEFORMAÇÃO COM VIGA BENKELMAN (NORMA DNIT 133/2010 -ME)													
				D <sub>0</sub>	D <sub>12,5</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>75</sub>	D <sub>100</sub>	D <sub>125</sub>	D <sub>150</sub>	D <sub>300</sub>	L <sub>1000</sub>
				23,75	21,50	16,50	11,50	9,50	8,75	8,00	7,00	5,00	0,00
				39,50	35,50	29,00	19,50	17,00	12,50	11,00	11,00	10,00	0,00
				28,00	26,00	18,50	11,50	8,50	6,50	5,00	3,50	0,50	0,00
				22,50	9,50	6,00	#####	#####	#####	0,50	1,00	0,00	0,00
				26,50	16,50	12,50	3,50	2,50	1,50	0,50	0,00	0,00	0,00
				18,00	18,00	11,00	5,50	4,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00
				15,00	14,00	14,00	8,50	4,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
				28,00	25,50	18,50	16,50	15,00	15,50	13,00	0,00	0,00	0,00
				24,50	12,00	7,00	4,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,00
				21,00	10,50	4,50	2,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50	0,00

## ENSAIO DE VIGA BENKELMAN - RUA SÃO BORJA (16/04/2018, TEMP. AR=21 °C)

SEGMENTO	ENSAIO	LOGRADOURO	OBSERVAÇÃO	DEFORMAÇÃO(mm)							
				L <sub>0</sub>	L <sub>25</sub>	L <sub>50</sub>	L <sub>75</sub>	L <sub>100</sub>	L <sub>125</sub>	L <sub>150</sub>	L <sub>300</sub>
4	E-29	Rua São Borja	Bordo direito, sentido bairro-centro	7,70	7,68	7,53	7,45	7,40	7,35	7,31	7,07
4	E-30	Rua São Borja	Bordo direito, sentido bairro-centro	8,12	7,99	7,78	7,70	7,65	7,63	7,61	7,48
4	E-31	Rua São Borja	Bordo direito, sentido bairro-centro	7,37	7,28	6,87	6,66	6,57	6,53	6,51	6,45
4	E-32	Rua São Borja	Bordo direito, sentido bairro-centro	5,61	5,43	5,24	5,16	5,15	5,14	5,14	4,96
4	E-33	Rua São Borja	Bordo direito, sentido bairro-centro	7,87	7,65	7,51	7,47	7,45	7,45	7,43	7,36
4	E-34	Rua São Borja	Bordo direito, sentido bairro-centro	7,22	6,99	6,81	6,74	6,73	6,71	6,70	6,65
4	E-35	Rua São Borja	Bordo direito, sentido bairro-centro	4,03	3,83	3,68	3,63	3,58	3,55	3,54	3,40
4	E-36	Rua São Borja	Bordo direito, sentido bairro-centro	5,46	5,35	5,11	5,00	4,97	4,95	4,94	4,63
4	E-37	Rua São Borja	Bordo direito, sentido bairro-centro	7,22	6,90	6,81	6,73	6,67	6,62	6,56	6,14
4	E-38	Rua São Borja	Bordo direito, sentido bairro-centro	7,38	7,14	6,78	6,78	6,76	6,72	6,71	6,47

BACIA DE DEFORMAÇÃO COM VIGA BENKELMAN (NORMA DNIT 133/2010 -ME)											
DEFLEXÃO (x 10 <sup>-3</sup> mm)											
D <sub>0</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>75</sub>	D <sub>100</sub>	D <sub>125</sub>	D <sub>150</sub>	D <sub>300</sub>				
31,50	30,50	23,00	19,00	16,50	14,00	12,00	0,00				
32,00	25,50	15,00	11,00	8,50	7,50	6,50	0,00				
46,00	41,50	21,00	10,50	6,00	4,00	3,00	0,00				
32,50	23,50	14,00	10,00	9,50	9,00	9,00	0,00				
25,50	14,50	7,50	5,50	4,50	4,50	3,50	0,00				
28,50	17,00	8,00	4,50	4,00	3,00	2,50	0,00				
31,50	21,50	14,00	11,50	9,00	7,50	7,00	0,00				
41,50	36,00	24,00	18,50	17,00	16,00	15,50	0,00				
54,00	38,00	33,50	29,50	26,50	24,00	21,00	0,00				
45,50	33,50	15,50	15,50	14,50	12,50	12,00	0,00				



**APÊNDICE A – CORREÇÃO DAS DEFLEXÕES MEDIDAS PARA A TEMPERATURA DE REFERÊNCIA DE 20°C**

Trecho 1 – Avenida Santos Dumont

Bacia	Condição	Deflexão ( $\times 10^{-2}$ mm)							
		D <sub>0</sub>	D <sub>12,5</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>75</sub>	D <sub>100</sub>	D <sub>125</sub>	D <sub>150</sub>
B1	Medida	10,50	7,00	5,00	2,00	1,50	1,00	1,00	0,50
	Corrigida (aderido)	7,73	5,19	3,76	1,56	1,21	0,84	0,86	0,45
	Corrigida (não aderido)	7,96	5,34	3,87	1,60	1,25	0,86	0,89	0,46
B2	Medida	24,00	21,50	10,00	5,00	2,50	2,00	1,00	0,00
	Corrigida (aderido)	17,33	15,63	7,38	3,82	1,98	1,64	0,85	0,00
	Corrigida (não aderido)	17,45	15,74	7,43	3,85	1,99	1,65	0,85	0,00
B3	Medida	20,00	18,50	11,50	5,00	3,50	3,00	2,50	2,00
	Corrigida (aderido)	14,29	13,31	8,40	3,78	2,74	2,43	2,10	1,73
	Corrigida (não aderido)	14,54	13,55	8,55	3,85	2,79	2,48	2,13	1,76
B4	Medida	9,00	9,00	7,50	5,00	4,00	4,50	4,00	3,50
	Corrigida (aderido)	6,57	6,62	5,60	3,87	3,20	3,73	3,43	3,10
	Corrigida (não aderido)	6,83	6,88	5,82	4,02	3,33	3,88	3,57	3,22
B5	Medida	12,00	11,50	9,50	5,00	5,00	4,00	4,00	3,00
	Corrigida (aderido)	8,84	8,54	7,16	3,90	4,04	3,35	3,46	2,68
	Corrigida (não aderido)	8,90	8,59	7,21	3,93	4,07	3,37	3,49	2,70
B6	Medida	12,50	8,50	6,50	4,00	4,00	3,00	2,50	3,00
	Corrigida (aderido)	9,30	6,37	4,95	3,15	3,27	2,54	2,18	2,71
	Corrigida (não aderido)	9,35	6,41	4,97	3,17	3,28	2,55	2,20	2,72
B7	Medida	11,00	10,50	5,50	4,50	4,00	4,00	2,00	1,00
	Corrigida (aderido)	8,19	7,87	4,18	3,55	3,27	3,38	1,75	0,90
	Corrigida (não aderido)	8,23	7,91	4,21	3,56	3,28	3,40	1,76	0,91
B8	Medida	12,00	10,50	8,00	4,50	3,00	1,50	3,00	2,50
	Corrigida (aderido)	8,93	7,87	6,09	3,55	2,45	1,27	2,67	2,26
	Corrigida (não aderido)	8,90	7,85	6,07	3,54	2,44	1,26	2,61	2,25

### Trecho 2 – Rua Otto Boehm

Bacia	Condição	Deflexão ( $\times 10^{-2}$ mm)								
		D <sub>0</sub>	D <sub>12,5</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>75</sub>	D <sub>100</sub>	D <sub>125</sub>	D <sub>150</sub>	D <sub>300</sub>
B1	Medida	23,75	21,50	16,50	11,50	9,50	8,75	8,00	7,00	5,00
	Corrigida (aderido)	17,12	15,61	12,16	8,78	7,51	7,16	6,77	6,12	5,22
	Corrigida (não aderido)	17,93	16,34	12,73	9,19	7,86	7,50	7,09	6,41	5,46
B2	Medida	39,50	35,50	29,00	19,50	17,00	12,50	11,00	11,00	10,00
	Corrigida (aderido)	27,47	24,86	20,62	14,36	12,97	9,87	8,98	9,28	10,07
	Corrigida (não aderido)	28,00	25,35	21,02	14,64	13,22	10,06	9,16	9,46	10,27
B3	Medida	28,00	26,00	18,50	11,50	8,50	6,50	5,00	3,50	0,50
	Corrigida (aderido)	20,47	19,14	13,83	8,90	6,81	5,40	4,29	3,10	0,53
	Corrigida (não aderido)	20,98	19,63	14,18	9,13	6,99	5,53	4,40	3,18	0,54
B4	Medida	22,50	9,50	6,00	0,00	0,00	0,00	0,50	1,00	0,00
	Corrigida (aderido)	16,83	7,16	4,59	0,00	0,00	0,00	0,44	0,91	0,00
	Corrigida (não aderido)	17,73	7,54	4,83	0,00	0,00	0,00	0,46	0,96	0,00
B5	Medida	26,50	16,50	12,50	3,50	2,50	1,50	0,50	0,00	0,00
	Corrigida (aderido)	19,90	12,48	9,60	2,78	2,06	1,28	0,44	0,00	0,00
	Corrigida (não aderido)	20,19	12,66	9,74	2,82	2,09	1,30	0,45	0,00	0,00
B6	Medida	18,00	18,00	11,00	5,50	4,00	0,50	0,50	0,00	0,00
	Corrigida (aderido)	13,67	13,77	8,54	4,42	3,33	0,43	0,45	0,00	0,00
	Corrigida (não aderido)	14,30	14,40	8,94	4,63	3,49	0,45	0,47	0,00	0,00
B7	Medida	15,00	14,00	14,00	8,50	4,50	0,00	0,00	0,00	0,00
	Corrigida (aderido)	11,26	10,59	10,75	6,76	3,71	0,00	0,00	0,00	0,00
	Corrigida (não aderido)	11,55	10,86	11,03	6,93	3,80	0,00	0,00	0,00	0,00
B8	Medida	28,00	25,50	18,50	16,50	15,00	15,50	13,00	0,00	0,00
	Corrigida (aderido)	19,73	18,10	13,33	12,31	11,60	12,41	10,76	0,00	0,00
	Corrigida (não aderido)	20,60	18,90	13,92	12,86	12,11	12,95	11,23	0,00	0,00
B9	Medida	24,50	12,00	7,00	4,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50
	Corrigida (aderido)	18,75	9,25	5,48	3,24	0,84	0,87	0,90	0,46	0,55
	Corrigida (não aderido)	18,87	9,31	5,51	3,26	0,84	0,87	0,90	0,47	0,56
B10	Medida	21,00	10,50	4,50	2,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50
	Corrigida (aderido)	15,88	8,00	3,48	1,60	0,83	0,86	0,44	0,46	0,55
	Corrigida (não aderido)	16,55	8,33	3,63	1,67	0,86	0,89	0,46	0,48	0,57

### Trecho 3 – Rua São Borja

Bacia	Condição	Deflexão ( $\times 10^{-2}$ mm)							
		D <sub>0</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>75</sub>	D <sub>100</sub>	D <sub>125</sub>	D <sub>150</sub>	D <sub>300</sub>
B1	Medida	31,50	30,50	23,00	19,00	16,50	14,00	12,00	0,00
	Corrigida (aderido)	26,70	26,16	20,11	16,94	15,01	12,98	11,34	0,00
	Corrigida (não aderido)	26,94	26,40	20,29	17,10	15,14	13,10	11,44	0,00
B2	Medida	32,00	25,50	15,00	11,00	8,50	7,50	6,50	0,00
	Corrigida (aderido)	27,57	22,23	13,33	9,97	7,86	7,07	6,24	0,00
	Corrigida (não aderido)	27,78	22,41	13,44	10,05	7,92	7,12	6,29	0,00
B3	Medida	46,00	41,50	21,00	10,50	6,00	4,00	3,00	0,00
	Corrigida (aderido)	39,45	36,02	18,58	9,48	5,52	3,75	2,87	0,00
	Corrigida (não aderido)	39,79	36,33	18,74	9,56	5,57	3,78	2,89	0,00
B4	Medida	32,50	23,50	14,00	10,00	9,50	9,00	9,00	0,00
	Corrigida (aderido)	27,87	20,40	12,39	9,02	8,74	8,44	8,61	0,00
	Corrigida (não aderido)	28,30	20,71	12,58	9,16	8,88	8,57	8,74	0,00
B5	Medida	25,50	14,50	7,50	5,50	4,50	4,50	3,50	0,00
	Corrigida (aderido)	22,52	12,96	6,83	5,11	4,26	4,35	3,45	0,00
	Corrigida (não aderido)	22,80	13,12	6,92	5,18	4,32	4,40	3,49	0,00
B6	Medida	28,50	17,00	8,00	4,50	4,00	3,00	2,50	0,00
	Corrigida (aderido)	25,03	15,11	7,25	4,16	3,77	2,88	2,45	0,00
	Corrigida (não aderido)	25,17	15,19	7,29	4,18	3,79	2,90	2,46	0,00
B7	Medida	31,50	21,50	14,00	11,50	9,00	7,50	7,00	0,00
	Corrigida (aderido)	27,13	18,74	12,44	10,42	8,32	7,07	6,72	0,00
	Corrigida (não aderido)	27,44	18,96	12,58	10,54	8,41	7,15	6,80	0,00
B8	Medida	41,50	36,00	24,00	18,50	17,00	16,00	15,50	0,00
	Corrigida (aderido)	35,21	30,92	21,01	16,52	15,48	14,85	14,66	0,00
	Corrigida (não aderido)	35,34	31,03	21,09	16,58	15,53	14,91	14,72	0,00
B9	Medida	54,00	38,00	33,50	29,50	26,50	24,00	21,00	0,00
	Corrigida (aderido)	45,47	32,38	29,10	26,14	23,94	22,11	19,71	0,00
	Corrigida (não aderido)	45,66	32,52	29,22	16,25	24,04	22,20	19,80	0,00
B10	Medida	45,50	33,50	15,50	15,50	14,50	12,50	12,00	0,00
	Corrigida (aderido)	38,74	28,86	13,61	13,88	13,25	11,64	11,39	0,00
	Corrigida (não aderido)	39,05	29,09	13,72	14,00	13,35	11,73	11,48	0,00

## APÊNDICE B – DIFERENÇA PERCENTUAL DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA APÓS A CORREÇÃO DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS

A seguir se apresentam as diferenças percentuais dos módulos de resiliência retroanalisados antes da correção deflectométrica em função da temperatura comparados com os módulos retroanalisados após a correção, através do software BackMedina.

**Trecho 1 – Avenida Santos Dumont**

Bacia		Diferença (%)							
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Revestimento	Aderido	16,7	223,7	119,2	16,7	1,3	11,5	1,3	1,3
	Não aderido	16,7	101,9	16,7	8,6	6,1	19,4	19,4	15,1
Base	Aderido	16,8	153,6	36,8	16,7	9,0	11,4	1,3	1,3
	Não aderido	16,7	14,8	16,7	8,3	6,1	19,2	19,2	15,0
Sub-base	Aderido	16,8	-9,1	0,0	16,7	1,3	11,4	1,3	1,3
	Não aderido	16,7	6,1	16,7	8,3	6,1	19,2	19,2	15,0
Reforço	Aderido	16,8	-9,1	0,0	16,7	1,3	11,4	1,3	1,3
	Não aderido	16,7	6,1	16,7	8,3	6,1	19,2	19,2	15,0
Subleito	Aderido	17,2	-9,1	0,0	16,6	8,9	11,7	1,4	1,4
	Não aderido	16,8	6,1	16,8	8,7	6,0	19,5	19,5	15,1

**Trecho 2 – Rua Otto Boehm**

Bacia		Diferença (%)									
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
Revestimento	Aderido	21,0	21,0	10,0	16,7	55,3	6,1	6,1	0,0	136,6	16,7
	Não aderido	6,1	6,1	16,7	38,5	50,3	4,7	16,7	16,7	38,5	18,7
Base	Aderido	21,1	40,8	10,1	16,7	55,8	32,1	6,0	0,0	46,3	6,1
	Não aderido	6,1	6,0	16,6	-14,3	-7,1	4,5	16,7	16,7	-14,3	-26,5
Sub-base	Aderido	21,1	68,7	90,4	16,7	1,0	6,1	6,0	0,0	-9,1	6,1
	Não aderido	6,1	6,0	16,6	-14,3	-7,1	4,5	16,7	16,7	-14,3	-26,5
Subleito	Aderido	46,0	26,5	18,1	16,7	-3,5	5,9	6,1	61,1	-9,0	6,1
	Não aderido	18,8	54,6	18,6	-14,3	-6,9	4,6	16,7	36,3	-14,3	-26,5

### Trecho 3 – Rua São Borja

		Diferença (%)									
Bacia		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
Revestimento	Aderido	107,2	0,0	-5,7	-9,1	-9,1	10,0	-10,0	0,0	7,4	0,0
	Não aderido	10,0	10,0	0,0	10,0	7,7	10,0	10,0	16,7	16,7	0,0
Base	Aderido	-9,1	0,0	35,2	-0,6	61,0	22,9	3,1	0,0	111,4	24,2
	Não aderido	10,0	9,9	0,0	10,0	6,1	10,0	9,9	16,6	16,7	26,8
Sub-base	Aderido	15,3	41,1	20,0	46,3	-4,7	10,6	45,4	48,4	7,5	13,6
	Não aderido	10,0	9,9	38,5	10,0	6,1	10,0	9,9	16,6	35,8	0,0
Subleito	Aderido	11,8	11,4	10,2	6,0	-9,1	10,0	5,7	1,4	8,7	16,9
	Não aderido	15,3	12,7	8,0	13,1	5,9	10,0	13,0	11,9	8,3	11,8

A seguir se apresentam as diferenças percentuais dos módulos de resiliência retroanalisados antes da correção deflectométrica em função da temperatura comparados com os módulos retroanalisados após a correção, através do software BAKFAA.

### Trecho 1 – Avenida Santos Dumont

		Diferença (%)							
Bacia		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Revestimento	Aderido	16,1	0,0	7,2	19,6	25,7	22,0	20,8	22,0
	Não aderido	11,6	-1,0	16,1	14,9	13,8	11,6	11,6	11,6
Base	Aderido	16,1	0,0	7,2	19,6	25,7	22,0	20,8	22,0
	Não aderido	11,6	-1,0	16,1	14,9	13,8	11,6	11,6	11,6
Sub-base	Aderido	16,1	0,0	7,2	19,6	25,7	22,0	20,8	22,0
	Não aderido	11,6	-1,0	16,1	14,9	13,8	11,6	11,6	11,6
Reforço	Aderido	16,1	0,0	7,2	19,6	25,7	22,0	20,8	22,0
	Não aderido	11,6	-1,0	16,1	14,9	13,8	11,6	11,6	11,6
Subleito	Aderido	16,1	0,0	7,2	19,6	25,7	22,0	20,8	22,0
	Não aderido	11,6	-1,0	16,1	14,9	13,8	11,6	11,6	11,6

### Trecho 2 – Rua Otto Boehm

		Diferença (%)									
Bacia		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
Revestimento	Aderido	28,2	2,0	24,5	8,3	-1,0	14,9	2,0	4,1	-2,9	29,5
	Não aderido	19,6	18,4	24,5	0,0	16,1	4,1	8,3	-2,0	12,7	9,4
Base	Aderido	28,2	2,0	24,5	8,3	-1,0	14,9	2,0	4,1	-2,9	29,5
	Não aderido	30,1	18,4	24,5	0,0	16,1	4,1	8,3	-2,0	12,6	9,4

	Aderido	28,2	2,0	24,5	8,3	-1,0	14,9	2,0	4,1	-2,9	29,5
Sub-base	Não aderido	30,1	18,4	24,5	0,0	16,1	4,1	8,3	-2,0	12,6	9,4
	Aderido	28,2	2,0	24,5	8,3	-1,0	14,9	2,0	4,1	-2,9	29,5
Subleito	Não aderido	19,6	18,4	24,5	0,0	16,1	4,1	8,3	-2,0	12,7	9,4

### Trecho 3 – Rua São Borja

		Diferença (%)									
Bacia		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
Revestimento	Aderido	8,3	9,4	1,0	10,5	7,2	4,1	12,7	9,4	2,0	9,4
	Não aderido	4,1	11,6	3,1	11,6	3,0	6,2	12,7	10,5	10,5	12,7
Base	Aderido	8,3	9,4	1,0	10,5	7,2	4,1	12,7	9,4	2,0	9,4
	Não aderido	4,1	11,6	3,1	11,6	3,0	6,2	12,7	10,5	10,5	12,7
Sub-base	Aderido	8,3	9,4	1,0	10,5	7,2	4,1	12,7	9,4	2,0	9,4
	Não aderido	4,1	11,6	3,1	11,6	3,0	6,2	12,7	10,5	10,5	12,7
Subleito	Aderido	8,3	9,4	1,0	10,5	7,2	4,1	12,7	9,4	2,0	9,4
	Não aderido	4,1	11,6	3,1	11,6	3,0	6,2	12,7	10,5	10,5	12,7

## APÊNDICE C – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE MÓDULOS DE RESILIÊNCIA ANTES E APÓS A CORREÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

A seguir se apresentam os coeficientes de correlação de Pearson ( $\rho$ ) para os módulos de resiliência inferidos pelo software BackMedina.

Interpretação (LIRA, 2004):

- $\rho > 0,9$  – correlação linear muito forte;
- $\rho$  entre 0,7 a 0,9 – correlação linear forte;
- $\rho$  entre 0,5 a 0,7 – correlação linear moderada;
- $\rho$  entre 0,3 a 0,5 – correlação linear fraca;
- $\rho$  entre 0,0 a 0,3 – correlação linear desprezível.

### Trecho 1 – Avenida Santos Dumont

	Camadas aderidas	Camadas não aderidas
Revestimento	0,96	0,88
Base	0,94	0,94
Sub-base	0,86	0,93
Reforço do subleito	0,86	0,93
Subleito	0,87	0,93

### Trecho 2 – Rua Otto Boehm

	Camadas aderidas	Camadas não aderidas
Revestimento	0,39	0,90
Base	0,46	0,47
Sub-base	0,66	0,47
Subleito	0,90	0,64

### Trecho 3 – Rua São Borja

	Camadas aderidas	Camadas não aderidas
Revestimento	0,67	0,93
Base	0,63	0,92
Sub-base	0,88	0,94
Subleito	0,98	1,00

A seguir se apresentam os coeficientes de correlação de Pearson ( $\rho$ ) para os módulos de resiliência inferidos pelo software BAKFAA.

#### Trecho 1 – Avenida Santos Dumont

	Camadas aderidas	Camadas não aderidas
Revestimento	0,94	0,94
Base	0,94	0,94
Sub-base	0,94	0,94
Reforço do subleito	0,94	0,94
Subleito	0,94	0,90

#### Trecho 2 – Rua Otto Boehm

	Camadas aderidas	Camadas não aderidas
Revestimento	0,86	0,94
Base	0,85	0,92
Sub-base	0,85	0,92
Subleito	0,85	0,94

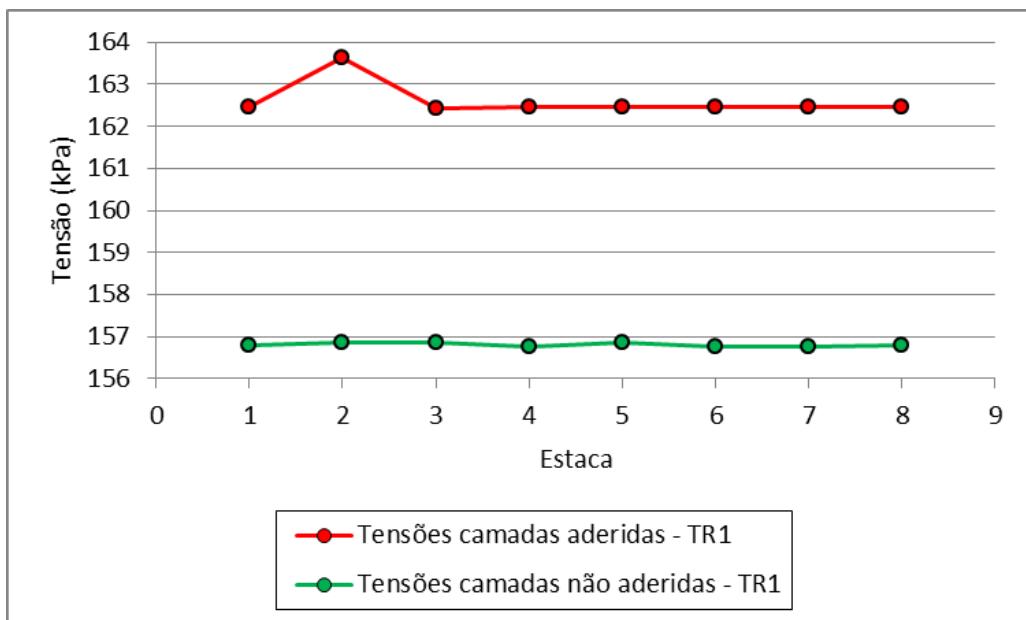
#### Trecho 3 – Rua São Borja

	Camadas aderidas	Camadas não aderidas
Revestimento	0,99	0,99
Base	0,99	0,99
Sub-base	0,99	0,99
Subleito	0,99	0,99

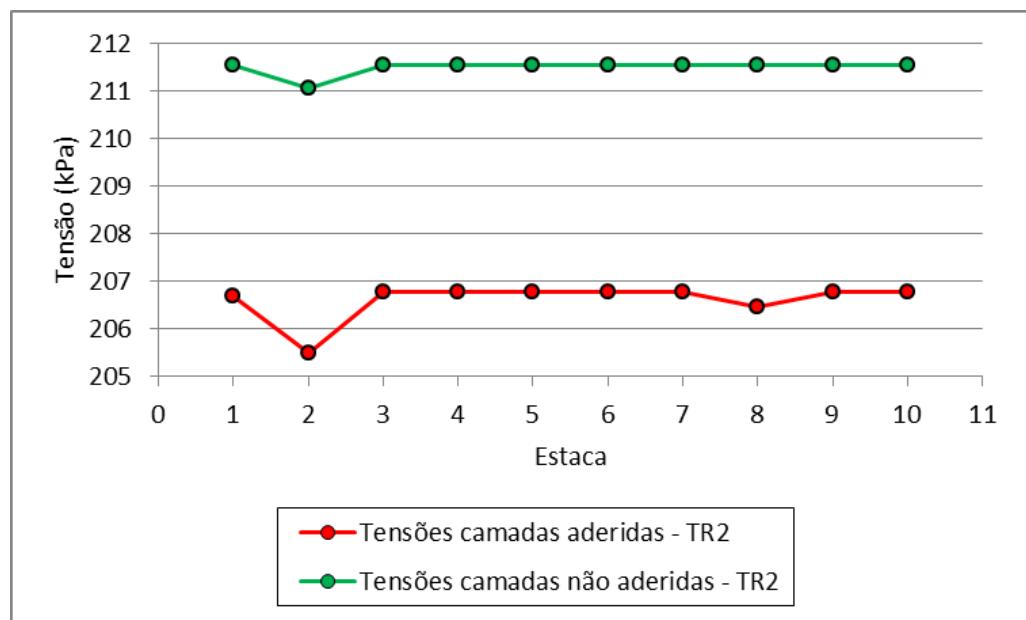
## APÊNDICE D – ANÁLISE DE TENSÕES DOS TRECHOS

Tensões de tração devido à flexão na fibra inferior do revestimento:

Trecho 1 – Avenida Santos Dumont

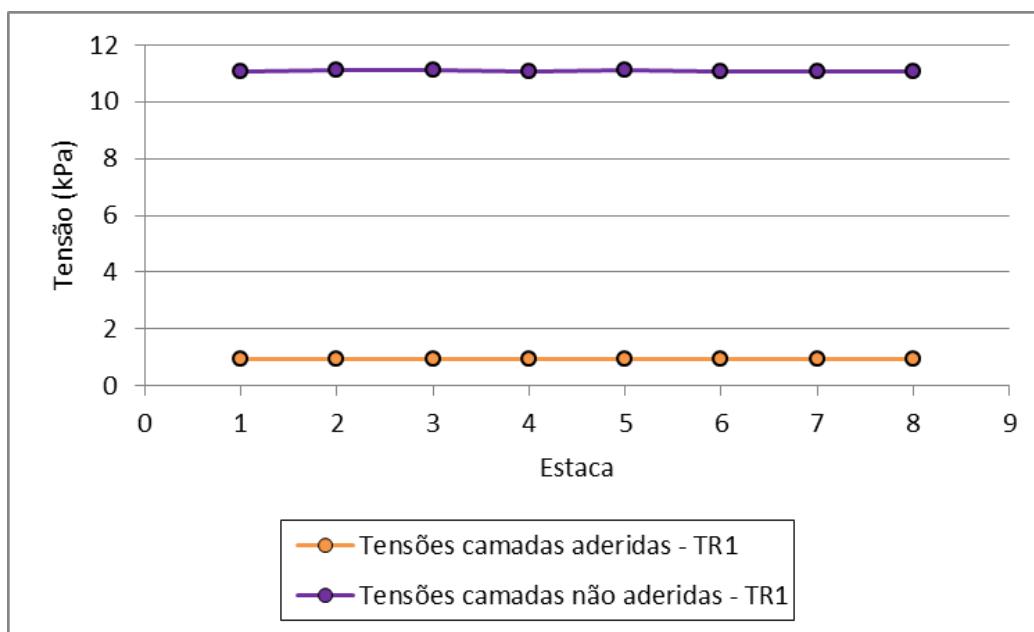


Trecho 2 – Rua Otto Boehm

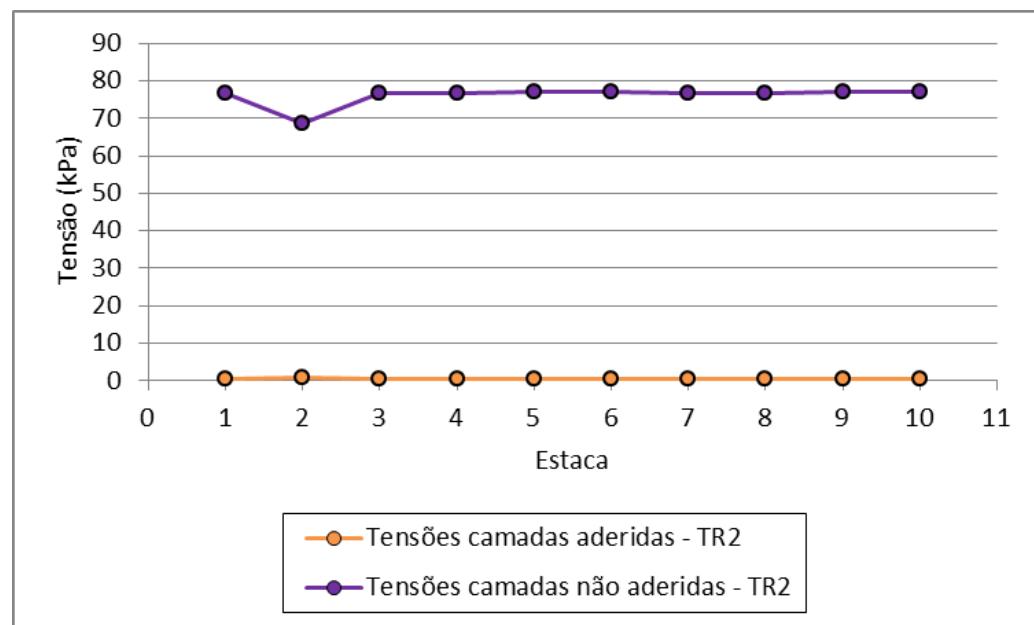


Tensões de compressão no topo do subleito:

Trecho 1 – Avenida Santos Dumont



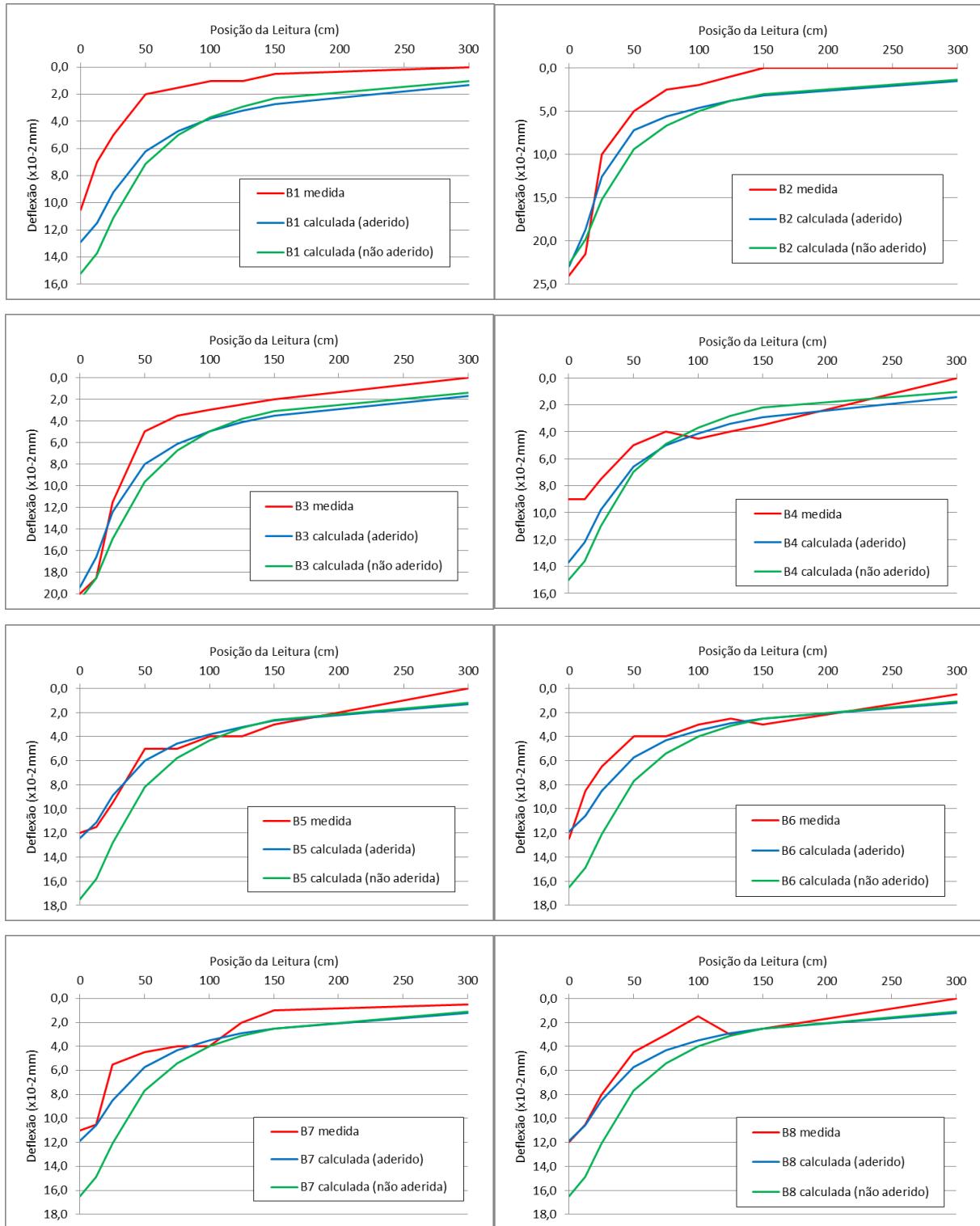
Trecho 2 – Rua Otto Boehm



## APÊNDICE E – COMPARAÇÃO ENTRE BACIAS DE DEFLEXÃO MEDIDAS EM CAMPO E CALCULADAS PELO SOFTWARE AEMC

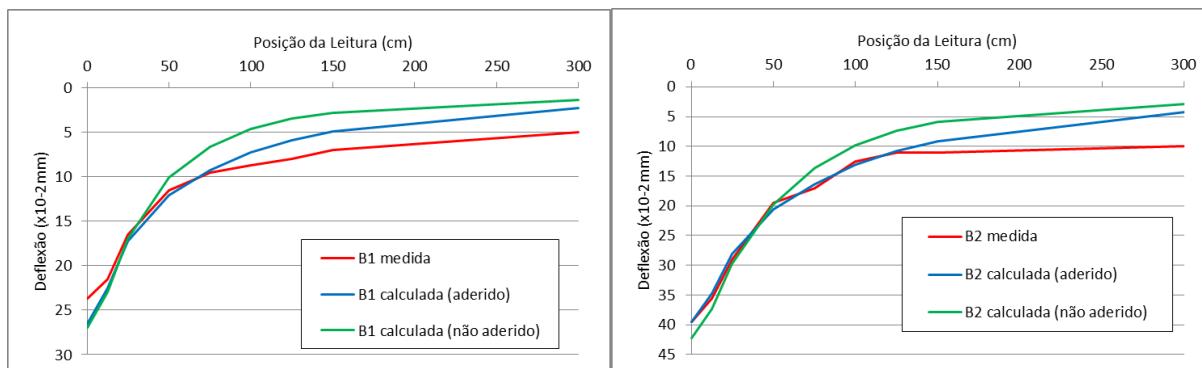
Comparação das bacias de deflexão do Trecho 1 – Avenida Santos Dumont

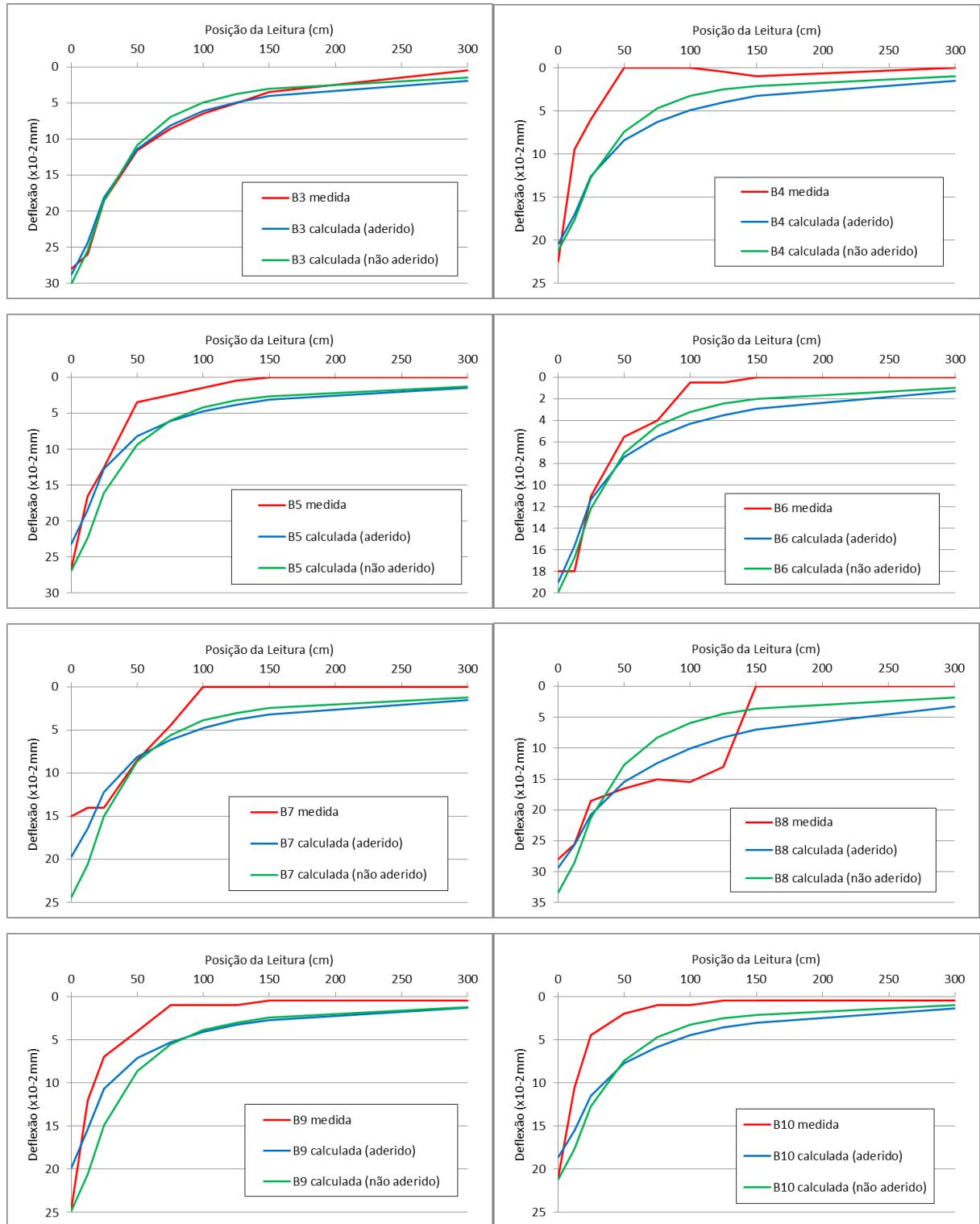
Bacia	Condição	Deflexão ( $\times 10^{-2}$ mm)										Erro ( $\mu\text{m}$ )
		D <sub>5</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>75</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>125</sub>	D <sub>150</sub>	D <sub>175</sub>	D <sub>200</sub>	
B1	Medida	10,5	7,0	5,0	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,0	-	
	Calculada (aderido)	12,9	11,5	9,2	6,2	4,7	3,8	3,2	2,7	1,3	3,2	
	Calculada (não aderido)	15,2	13,7	11,1	7,1	5,0	3,7	2,9	2,3	1,0	4,2	
B2	Medida	24,0	21,5	10,0	5,0	2,5	2,0	1,0	0,0	0,0	-	
	Calculada (aderido)	22,9	18,7	12,6	7,2	5,6	4,6	3,8	3,2	1,5	2,5	
	Calculada (não aderido)	22,6	19,8	15,2	9,4	6,7	5,0	3,8	3,0	1,4	3,3	
B3	Medida	20,0	18,5	11,5	5,0	3,5	3,0	2,5	2,0	0,0	-	
	Calculada (aderido)	19,4	16,6	12,4	8,0	6,1	5,0	4,1	3,5	1,7	1,9	
	Calculada (não aderido)	20,5	18,5	14,9	9,6	6,7	5,0	3,8	3,1	1,4	2,4	
B4	Medida	9,0	9,0	7,5	5,0	4,0	4,5	4,0	3,5	0,0	-	
	Calculada (aderido)	13,7	12,2	9,8	6,6	5,0	4,1	3,4	2,9	1,4	2,2	
	Calculada (não aderido)	15,0	13,6	11,0	7,0	4,9	3,7	2,8	2,2	1,0	3,0	
B5	Medida	12,0	11,5	9,5	5,0	5,0	4,0	4,0	3,0	0,0	-	
	Calculada (aderido)	12,4	11,1	8,9	6,0	4,6	3,8	3,2	2,7	1,3	0,7	
	Calculada (não aderido)	17,5	15,8	12,8	8,2	5,8	4,3	3,3	2,6	1,2	2,8	
B6	Medida	12,5	8,5	6,5	4,0	4,0	3,0	2,5	3,0	0,5	-	
	Calculada (aderido)	11,9	10,6	8,5	5,7	4,3	3,5	2,9	2,5	1,2	1,2	
	Calculada (não aderido)	16,5	14,9	12,1	7,7	5,4	4,0	3,1	2,5	1,1	3,4	
B7	Medida	11,0	10,5	5,5	4,5	4,0	4,0	2,0	1,0	0,5	-	
	Calculada (aderido)	11,9	10,6	8,5	5,7	4,3	3,5	2,9	2,5	1,2	1,3	
	Calculada (não aderido)	16,5	14,9	12,1	7,7	5,4	4,0	3,1	2,5	1,1	3,5	
B8	Medida	12,0	10,5	8,0	4,5	3,0	1,5	3,0	2,5	0,0	-	
	Calculada (aderido)	11,9	10,6	8,5	5,7	4,3	3,5	2,9	2,5	1,2	1,0	
	Calculada (não aderido)	16,5	14,9	12,1	7,7	5,4	4,0	3,1	2,5	1,1	3,0	



### Comparação das bacias de deflexão do Trecho 2 – Rua Otto Boehm

Bacia	Condição	Deflexão ( $\times 10^{-2}$ mm)						Erro (μm)
		$D_{n}$	$D_{12,5}$	$D_{25}$	$D_{50}$	$D_{75}$	$D_{100}$	
B1	Medida	23,7	21,5	16,5	11,5	9,5	8,7	8,0
	Calculada (aderido)	26,5	22,5	17,3	12,1	9,3	7,3	5,9
B2	Calculada (não aderido)	27,0	23,0	17,0	10,1	6,6	4,6	3,5
	Medida	39,5	35,5	29,0	19,5	17,0	12,5	11,0
B3	Calculada (aderido)	39,5	34,7	28,1	20,6	16,3	13,1	10,8
	Calculada (não aderido)	42,2	37,3	29,7	19,7	13,6	9,8	7,4
B4	Medida	28,0	26,0	18,5	11,5	8,5	6,5	5,0
	Calculada (aderido)	28,8	24,3	18,1	11,4	8,1	6,1	4,9
B5	Calculada (não aderido)	30,1	25,4	18,5	10,8	6,9	4,9	3,7
	Medida	22,5	9,5	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0
B6	Calculada (aderido)	20,4	17,0	12,6	8,4	6,3	4,9	4,0
	Calculada (não aderido)	21,2	17,6	12,7	7,4	4,7	3,3	2,5
B7	Medida	26,5	16,5	12,5	3,5	2,5	1,5	0,5
	Calculada (aderido)	23,2	18,4	12,7	8,2	6,1	4,7	3,8
B8	Calculada (não aderido)	26,9	22,3	16,1	9,4	6,0	4,2	3,2
	Medida	18,0	18,0	11,0	5,5	4,0	0,5	0,5
B9	Calculada (aderido)	19,0	15,6	11,3	7,4	5,5	4,3	3,5
	Calculada (não aderido)	19,9	16,7	12,2	7,0	4,5	3,2	2,4
B10	Medida	15,0	14,0	14,0	8,5	4,5	0,0	0,0
	Calculada (aderido)	19,7	16,4	12,2	8,1	6,1	4,8	3,8
	Calculada (não aderido)	24,4	20,6	15,0	8,6	5,6	3,9	3,0
	Medida	28,0	25,5	18,5	16,5	15,0	15,5	13,0
	Calculada (aderido)	29,3	25,6	20,8	15,5	12,4	10,1	8,3
	Calculada (não aderido)	33,4	28,5	21,3	12,7	8,3	5,9	4,5
	Medida	24,5	12,0	7,0	4,0	1,0	1,0	0,0
	Calculada (aderido)	19,8	15,4	10,7	7,1	5,3	4,1	3,3
	Calculada (não aderido)	24,8	20,6	14,9	8,6	5,5	3,9	3,0
	Medida	21,0	10,5	4,5	2,0	1,0	1,0	0,5
	Calculada (aderido)	18,6	15,5	11,5	7,7	5,8	4,5	3,6
	Calculada (não aderido)	21,2	17,6	12,7	7,4	4,7	3,3	2,5





### Comparação das bacias de deflexão do Trecho 3 – Rua São Borja

Bacia	Condição	Deflexão ( $\times 10^{-2}$ mm)						Erro ( $\mu\text{m}$ )
		$D_0$	$D_{15}$	$D_{30}$	$D_{45}$	$D_{60}$	$D_{75}$	
B1	Medida	31,5	30,5	23,0	19,0	16,5	14,0	12,0
	Calculada (aderido)	36,0	27,2	21,8	18,2	15,4	13,1	11,2
B2	Medida	40,2	29,7	21,6	16,3	12,4	9,7	7,8
	Calculada (não aderido)	32,0	25,5	15,0	11,0	8,5	7,5	6,5
B3	Medida	33,9	22,7	15,2	11,3	8,8	7,2	6,0
	Calculada (aderido)	34,2	22,9	15,2	10,8	7,9	6,1	4,8
B4	Medida	46,0	41,5	21,0	10,5	6,0	4,0	3,0
	Calculada (aderido)	48,9	30,9	18,5	13,0	10,0	8,0	6,6
B5	Medida	50,6	33,2	18,9	11,9	8,2	6,2	5,0
	Calculada (não aderido)	32,5	23,5	14,0	10,0	9,5	9,0	9,0
B6	Medida	31,2	21,9	15,2	11,6	9,3	7,6	6,4
	Calculada (não aderido)	34,9	22,6	14,5	10,2	7,4	5,6	4,5
B7	Medida	25,5	14,5	7,5	5,5	4,5	4,5	3,5
	Calculada (aderido)	24,9	13,6	8,6	6,5	5,2	4,2	3,5
B8	Medida	25,5	15,6	9,4	6,4	4,6	3,4	2,8
	Calculada (não aderido)	28,5	17,0	8,0	4,5	4,0	3,0	2,5
B9	Medida	28,1	15,4	9,6	7,2	5,7	4,6	3,8
	Calculada (aderido)	30,9	18,9	11,4	7,7	5,5	4,2	3,4
B10	Medida	31,5	21,5	14,0	11,5	9,0	7,5	7,0
	Calculada (não aderido)	31,0	21,0	14,5	11,1	8,8	7,2	6,0
B10	Medida	33,0	21,7	14,2	10,0	7,3	5,6	4,4
	Calculada (aderido)	34,0	21,0	14,0	10,5	7,0	5,5	5,5
B10	Medida	36,0	31,5	24,0	18,5	17,0	15,5	15,5
	Calculada (não aderido)	32,2	23,8	18,6	15,1	12,4	10,5	9,9
B10	Medida	38,0	33,5	29,5	26,5	21,0	20,0	20,0
	Calculada (aderido)	42,3	32,7	27,0	22,6	19,2	16,4	16,4
B10	Medida	45,1	30,0	20,7	16,1	12,9	10,6	8,9
	Calculada (não aderido)	42,9	29,9	20,5	14,8	10,9	8,4	6,7

