



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE CORRELATIVA DAS MEDIDAS DE DEFLEXÃO
COM VIGA BENKELMAN E FWD EM PAVIMENTOS
RODOVIÁRIOS REVESTIDOS COM ASFALTO DA
RODOVIA BR 104/PB**

JOSÉ FRANCISCO DE OLIVEIRA NETO

Caruaru, Dezembro de 2015

JOSÉ FRANCISCO DE OLIVEIRA NETO

**ANÁLISE CORRELATIVA DAS MEDIDAS DE DEFLEXÃO
COM VIGA BENKELMAN E FWD EM PAVIMENTOS
RODOVIÁRIOS REVESTIDOS COM ASFALTO DA
RODOVIA BR 104/PB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil do Centro
Acadêmico do Agreste - CAA, da
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE,
como requisito para o título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Área de concentração: Transportes

Orientadora: Profa. MSc Shirley Minnell de
Oliveira

Caruaru, Dezembro de 2015

Catálogo na fonte:
Bibliotecária - Simone Xavier CRB/4-1242

O48a Oliveira Neto, José Francisco de.
Análise correlativa das medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos rodoviários revestidos com asfalto da rodovia BR 104/PB. / José Francisco de Oliveira Neto. - Caruaru: O Autor, 2015.
54f. il. ; 30 cm.

Orientadora: Shirley Minnell Ferreira de Oliveira.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2015.
Inclui referências bibliográficas

1. Vigas - Deformações. 2. Deflexão de pavimento. 3. Pavimentos. 4. Rodovias. I. Oliveira, Shirley Minelli Ferreira. (Orientadora). II. Título

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2015-255)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
Centro Acadêmico do Agreste
Núcleo de Tecnologia
Curso de Bacharelado em Engenharia Civil

A comissão examinadora da Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso

**ANÁLISE CORRELATIVA DAS MEDIDAS DE DEFLEXÃO COM VIGA
BENKELMAN E FWD EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS REVESTIDOS COM
ASFALTO DA RODOVIA BR 104/PB**

Defendido por:

JOSÉ FRANCISCO DE OLIVEIRA NETO

Considera o candidato APROVADO

Caruaru, 15 de Dezembro de 2015

SHIRLEY MINNELL FERREIRA DE OLIVEIRA – Núcleo de
Tecnologia/CAA/UFPE
(Orientadora)

JOCILENE OTILIA DA COSTA – Núcleo de Tecnologia/CAA/UFPE
(Avaliador 1)

JOSÉ MOURA SOARES – Núcleo de Tecnologia/CAA/UFPE
(Avaliador 2)

SYLVANA MELO DOS SANTOS – Núcleo de Tecnologia/CAA/UFPE
(Coordenadora da Disciplina)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me iluminado nesta caminhada e não me deixar desanimar diante das muitas dificuldades e pela força pra seguir em busca dos meus objetivos.

A minha mãe, que foi minha primeira professora e continua me ensinando na vida. Se existe um motivo para eu levantar e lutar cada dia da minha vida é pra lhe retribuir tudo o que me foi dado, mesmo sabendo que nunca será suficiente.

À minha família por toda a força e incentivo, em especial minha avó que é a representação de garra da Família Oliveira.

À minha orientadora, Professora Shirley Minnell de Oliveira, por sua paciência e dedicação e por acreditar em meu esforço. Seu apoio, estímulo e críticas construtivas foram muito importantes para minha formação como pessoa e profissional que um dia me tornarei.

Aos mestres pela dedicação, compreensão e paciência e por exercerem a profissão com prazer mesmo diante das limitações ainda existentes na UFPE-CAA. Gostaria de agradecer em especial a professora Marília Marinho pelas conversas e conselhos e a professora Leidjane de Oliveira por ser uma mãe para todos.

Aos meus amigos, antigos e recentes, que estiveram ao meu lado na vida acadêmica e, alguns, na pessoal. Luttemberg., Marília Braga, Guilherme, Renan Ferreira, Anderson Torres, Bruninha, Claudio, Fabinho, Elaine, Jayne, Mariberto, Laysa, Marcelo, Wesley, Anderson (Cabelin), Elyda e os demais, obrigado por aguentarem minhas besteiras diárias e se divertirem junto comigo.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer a Projeteq Projetos Tecnicos Ltda, por disponibilizar os dados para que o trabalho fosse realizado.

RESUMO

ANÁLISE CORRELATIVA DAS MEDIDAS DE DEFLEXÃO COM VIGA BENKELMAN E FWD EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS REVESTIDOS COM ASFALTO DA RODOVIA BR 104/PB.

O avanço tecnológico é, atualmente, umas das principais causas do desenvolvimento da humanidade. Com o advento da informática, em consequência desse avanço, processos que antes demandavam grande quantidade de mão de obra e tempo, passaram a ser realizados de maneira mais rápida e eficiente. Este trabalho apresenta e analisa os resultados de um estudo envolvendo o levantamento deflectométrico do pavimento por meio de dois equipamentos, a viga Benkelman e o Falling Weight Deflectometer (FWD), muito empregados no Brasil para esta finalidade. Os levantamentos foram realizados em um trecho da BR 104, cuja extensão analisada possui aproximadamente 10 km, com início em Cuité-PB e final em Campina Grande-PB. O trecho total foi dividido em 23 segmentos homogêneos de acordo com os critérios do Método das Diferenças Acumuladas (AASHTO). Em seguida é feita uma análise estatística de cada segmento. Também é calculada a deflexão característica de cada segmento homogêneo que é utilizada para o cálculo da correlação entre os equipamentos, resultando em uma reta de regressão que apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 21%.

Palavras-chave: viga Benkelman. FWD. Segmentos Homogêneos. Deflexões Características.

ABSTRACT

CORRELATIVE ANALYSIS OF THE MEASUREMENTS OF DEFLEXION WITH BENKELMAN BEAMS AND FWD IN HIGHWAY PAVEMENTS SURFACED WITH ASPHALT IN THE HIGHWAY BR 104/PB.

Technological progress is, currently, one of the main reasons of human development. Due the advent of the computer, as a consequence of this progress, tasks that previously demanded a large amount of time and manpower now may be performed faster and more effectively. This work shows and analyzes the results of a study involving a deflectometer survey of the pavement utilizing two apparatus, the Benkelman beam and the Falling Weight Deflectometer (FWD), largely utilized in Brazil for this purpose. The surveys were conducted in a stretch of the highway BR 104, where the analyzed extension is approximately 10 km, from Cuité-PB to Campina Grande-PB. First of all, the total stretch was divided in 23 homogeneous segments according the criteria of Cumulative Difference Method (AASHTO). Secondly a statistical analysis of each segment was done. After that, it is calculated the characteristic deflection of each homogeneous segment in order to find the correlation between the equipment, resulting in a regression line that showed a coefficient of determination (R^2) of 21%.

Keywords: Benkelman beam. FWD. Homogeneous Segments. Characteristic Deflection.

**“... tudo posso naquele que me fortalece”
(Filipenses 4.13)**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FWD - Falling Weight Deflectometer

VB – Viga Benkelman

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da Viga Benkelman.....	15
Figura 2 – Esquema do sistema de referência na Viga Benkelman.....	15
Figura 3 – Esquema Operacional da Viga Benkelman (Posicionamento do caminhão e da Viga.....	16
Figura 4 – Esquema Operacional da Viga Benkelman (Leitura final).....	16
Figura 5 – Dynatest FWD.....	17
Figura 6 – Esquema do FWD.....	17
Figura 7 – Perfil do trecho experimental – BR 101/RJ, Niterói-Manilha.....	18
Figura 8 – Perfil do trecho experimental – BR 040/RJ, Areal- Moura-Brasil.....	18
Figura 9 – Correlação entre VB e FWD.....	23
Figura 10 – Localização da BR 104.....	25
Figura 11 – Localização do trecho estudado.....	26
Figura 12 – Exemplo de delimitação dos segmentos homogêneos.....	28
Figura 13 – Gráfico obtido pelo Método das Diferenças Acumuladas para o FWD.....	31
Figura 14 – Esquema da seleção dos segmentos homogêneos para o FWD.....	32
Figura 15 – Gráfico obtido pelo Método das Diferenças Acumuladas para a VB.....	33
Figura 16 – Esquema da seleção dos segmentos homogêneos para a VB.....	33
Figura 17 – Gráfico de Dispersão das Deflexões Características.....	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Exemplo do Método das Diferenças Acumuladas para o FWD.....	31
Quadro 2 – Exemplo do Método das Diferenças Acumuladas para a VB.....	32
Quadro 3 – Divisão dos Segmentos Homogêneos do trecho em estudo.....	34
Quadro 4 – Análise estatística dos segmentos (VB).....	35
Quadro 5 – Análise estatística dos segmentos (FWD).....	36
Quadro 6 – Deflexões Características.....	38

SUMÁRIO

<i>1 INTRODUÇÃO.....</i>	<i>12</i>
<i>1.1 Justificativa.....</i>	<i>13</i>
<i>1.2 Motivação.....</i>	<i>13</i>
<i>1.3 Objetivos.....</i>	<i>13</i>
<i>1.3.1 Objetivo Geral.....</i>	<i>13</i>
<i>1.3.2 Objetivos Específicos.....</i>	<i>14</i>
<i>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</i>	<i>14</i>
<i>2.1 Viga Benkelman.....</i>	<i>14</i>
<i>2.2 Falling Weigh Deflectometer(FWD).....</i>	<i>16</i>
<i>2.3 Correlação Viga Benkelman x FWD.....</i>	<i>18</i>
<i>2.4 Estatística Descritiva.....</i>	<i>24</i>
<i>3 METODOLOGIA.....</i>	<i>25</i>
<i>3.1 Área de Estudo.....</i>	<i>25</i>
<i>3.2 Seleção dos Segmentos Homogêneos.....</i>	<i>26</i>
<i>3.3 Análise da Regressão FWDxViga.....</i>	<i>28</i>
<i>3.4 Coeficiente de Determinação e Coeficiente de Correlação.....</i>	<i>29</i>
<i>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....</i>	<i>30</i>
<i>4.1 Segmentos Homogêneos.....</i>	<i>30</i>
<i>4.2 Análise Estatística.....</i>	<i>34</i>
<i>4.3 Estruturas do Pavimento.....</i>	<i>37</i>
<i>4.4 Correlação Obtida.....</i>	<i>38</i>
<i>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</i>	<i>39</i>
<i>6 RECOMENDAÇÃO.....</i>	<i>40</i>
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</i>	<i>41</i>
<i>APÊNCIDE.....</i>	<i>43</i>

1 INTRODUÇÃO

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas para o aperfeiçoamento dos procedimentos que possibilitem uma melhor investigação dos pavimentos e para o aumento da eficácia dos métodos de dimensionamento de reforço estrutural. Grande parte dessas pesquisas baseia-se no estudo da deformabilidade elástica como parâmetro definidor da capacidade estrutural do pavimento, modelado como um conjunto estratificado de camadas que pode ser analisado a partir das tensões, deformações e deslocamentos gerados em seu interior, quando o mesmo é solicitado por cargas exteriores.

No início da aplicação da técnica de levantamento defletométrico, em meados do século XX, quando eram realizados os ensaios de placa e, em seguida, passaram a ser utilizados os ensaios com a Viga Benkelman, era medida apenas a deflexão no ponto de aplicação de carga e, eventualmente, a uma distância de 25 cm, para o cálculo do raio de curvatura.

Atualmente, são levantados no campo vários pontos da bacia de deflexão, mesmo quando se utiliza a Viga Benkelman, equipamento associado à grande experiência acumulada pelo meio técnico brasileiro, que utiliza um carregamento estático e cujas principais limitações são: dificuldade de determinação da curvatura e tamanho da bacia de deflexão e a morosidade dos levantamentos. A medida de deflexão reversível obtida com a viga Benkelman é a ferramenta mais utilizada no meio rodoviário para projetos de reforço de pavimentos, tanto para a identificação das deficiências da estrutura como para a definição das espessuras de camadas de reforço.

O avanço tecnológico observado nas últimas décadas resultou em equipamentos capazes de determinar as bacias de deflexões a partir de carregamentos dinâmicos (que simulam um veículo em movimento), com maior produtividade e menor interferência humana, representados pelo FWD (“Falling Weight Deflectometer”).

Ambos os equipamentos medem as deflexões, mas observa-se que as deflexões obtidas pela Viga Benkelman e pelo FWD, em um mesmo local de um pavimento, são diferentes, em razão de muitos fatores como a estrutura ensaiada, as condições climáticas, a metodologia de ensaio aplicada e não apenas do tipo de carregamento aplicado. Muitos esforços têm sido realizados na tentativa de obtenção de equações de correlação entre os dois equipamentos, de forma a permitir o emprego de deflexões obtidas com o FWD pelos métodos do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) para o projeto de reforço de pavimentos flexíveis e nos sistemas de gerência de pavimentos, que se utiliza de deflexões obtidas com a Viga Benkelman.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o uso cada vez mais intenso do equipamento Falling Weight Deflectometer - FWD, devido a uma série de vantagens em relação à viga, já é possível converter as deflexões obtidas pelo FWD em deflexões equivalentes da viga Benkelman.

Como nas últimas quatro décadas, a viga tem sido o equipamento mais utilizado no Brasil, criou-se um enorme banco de dados. Nos últimos anos, muitas empresas tem contratado o levantamento com o FWD, mas as normas do DNIT de projeto de restauração consideram os valores obtidos pela viga e para se adequar aos procedimentos o DNIT aceita que os levantamentos com FWD tenham seus valores de deflexão convertidos para viga.

1.2 MOTIVAÇÃO

A avaliação de um pavimento tem a finalidade de fornecer subsídios necessários para que se possa programar ou prever sua manutenção e conservação além de fornecer dados para projetos de reforço ou recapeamento.

É de grande importância econômica a avaliação dos pavimentos no aspecto funcional e estrutural, tanto para quem executa quanto para os usuários. Com as informações obtidas pelos equipamentos FWD e Viga Benkelman, podem ser usados para determinar a capacidade de suporte, estimar a vida remanescente e as necessidades de recuperação para uma determinada vida útil do pavimento.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é encontrar a correlação entre os valores de deflexão do pavimento obtidos pelos equipamentos Falling Weight Deflectometer – FWD e a Viga Benkelman no pavimento da rodovia BR 104/PB.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1 – Fazer uma análise estatística descritiva das deflexões com a finalidade de descrever o comportamento das mesmas. Nessa análise será calculada a média, desvio-padrão, variância, valores de máximo e mínimo.
- 2 – Analisar qual melhor modelo se adequa à correlação.

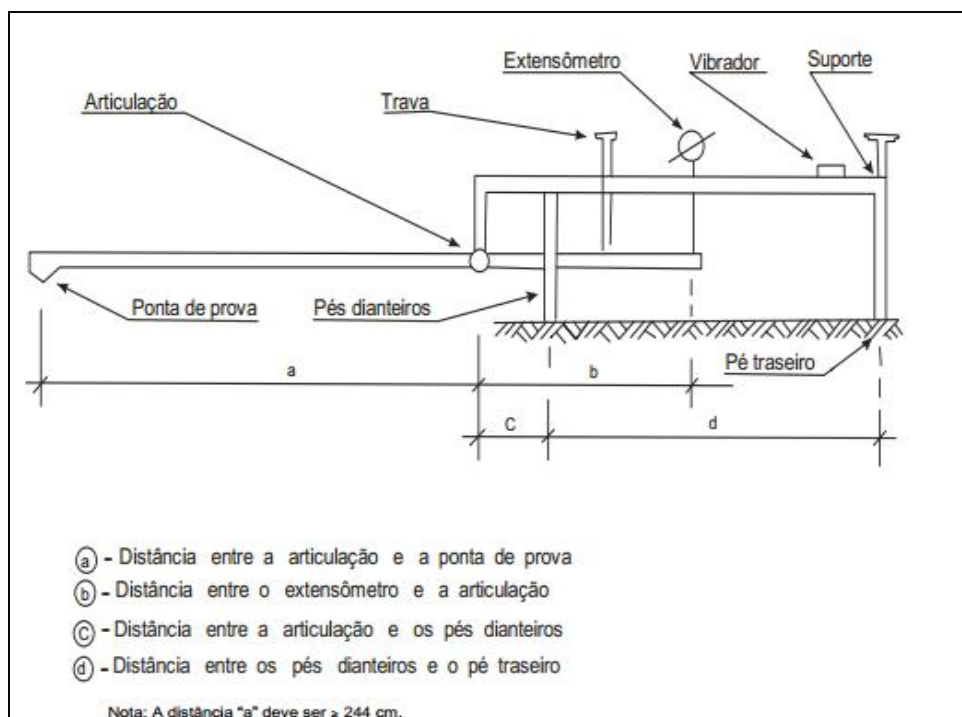
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Viga Benkelman

A Viga Benkelman é um aparelho destinado a medir as deflexões produzidas em um extensômetro acionado por uma alavanca interfixa, cuja relação entre os comprimentos dos braços é conhecida. Nas Figuras 1 e 2 são apresentados os elementos componentes da Viga Benkelman.

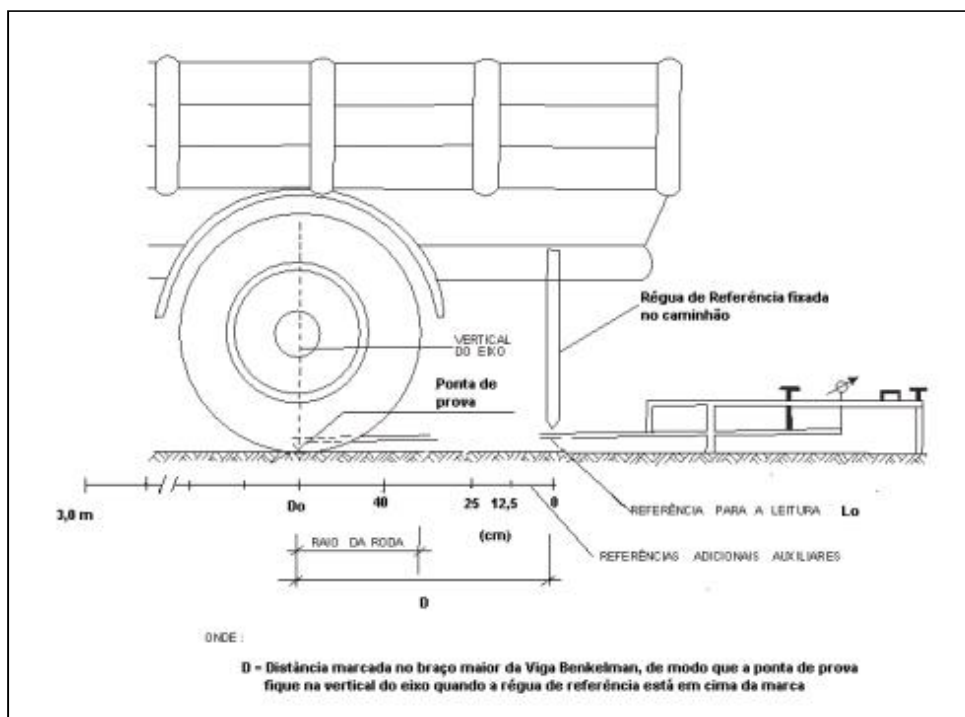
A Viga Benkelman é um equipamento muito simples, que necessita de um caminhão com eixo traseiro simples e com rodas duplas para aplicar a carga de 80 kN sob a qual será medida a deformação elástica (DNER, 1996). Coloca-se a ponta de prova entre os pneus de uma das rodas do eixo traseiro do caminhão, exatamente sob o seu eixo. Faz-se uma leitura inicial no extensômetro e, em seguida, à medida que o caminhão se afasta, são feitas outras leituras, geralmente a cada 30 cm, até que não haja mais variações na leitura do extensômetro, isto é, a leitura final corresponde ao descarregamento do pavimento e todo o deslocamento recuperado é associado à deformação elástica (deflexão). As Figuras 3 e 4 mostram o esquema operacional do levantamento defletométrico com a Viga Benkelman.

Figura 1 – Esquema da Viga Benkelman



Fonte: DNIT

Figura 2 – Esquema do Sistema de Referência na Viga Benkelman



Fonte: DNIT

Figura 3 – Esquema Operacional da Viga Benkelman
(Posicionamento do caminhão e da Viga)



Fonte: Livro Pavimentação Asfáltica (2007)

Figura 4 – Esquema Operacional da Viga Benkelman (Leitura final)



Fonte: Livro Pavimentação Asfáltica (2007)

2.2 Falling Weight Deflectometer (FWD)

Os equipamentos mais atuais de medida de deslocamentos elásticos de um pavimento são os impulsos gerado pelo impacto de um peso suspenso a certa altura (FWD), sobre amortecedores que comunicam o choque a uma placa metálica apoiada sobre o pavimento, no ponto de leitura da deflexão máxima. A intensidade da força aplicada simula o efeito da passagem de um veículo entre 60 e 80 km/h sobre a superfície do pavimento. O FWD é

totalmente automatizado, sendo rebocado por um veículo utilitário leve que carrega parte do sistema de aquisição de dados e um computador conectado aos sensores instalados na parte rebocada, que é o defletômetro propriamente dito (DNER – PRO 273 – 1996).

Posiciona-se o equipamento na estação desejada, fazendo-se a seleção da configuração da massa (conjunto de pesos). As operações de abaixamento da placa de carga, da barra de geofones (sensores que captam vibrações) e o posicionamento dos pesos para queda de uma altura pré-determinada são controlados por um programa computacional. À medida que são realizados os ensaios, a tela exibe a altura de queda, o pico de pressão na placa e a força correspondente e picos de deflexões registradas em cada sensor.

As Figuras 5 e 6 trazem exemplos de equipamentos FWD e seu esquema de funcionamento, respectivamente.

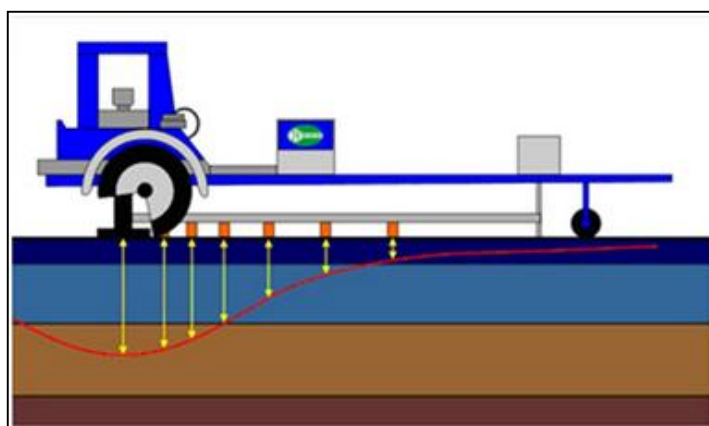
Figura 5 – Dynatest FWD



Fonte: Dynatest FWD (<http://dynatest.com.br/Produto.asp?ProdutoAtivo=21>)

Acesso em 08/07/15

Figura 6 – Esquema do FWD



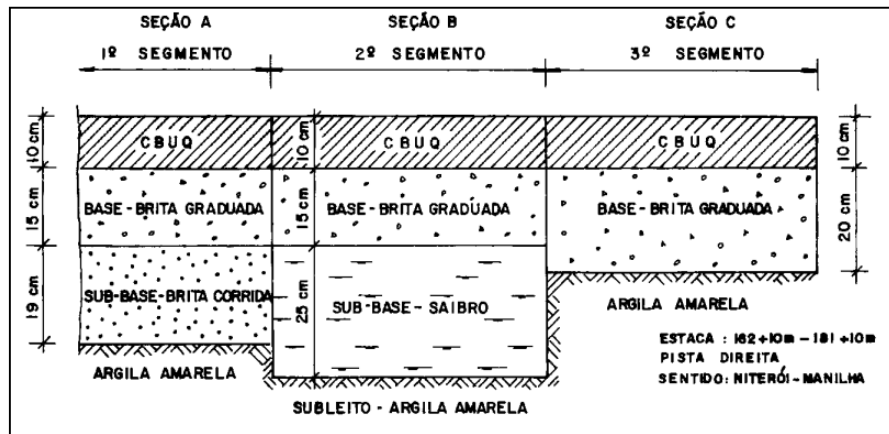
Fonte: CPREngenharia (<http://www.cpreengenharia.com.br/equipamentos.php>)

Acesso em 08/07/15

2.3 Correlação Viga Benkelman X FWD

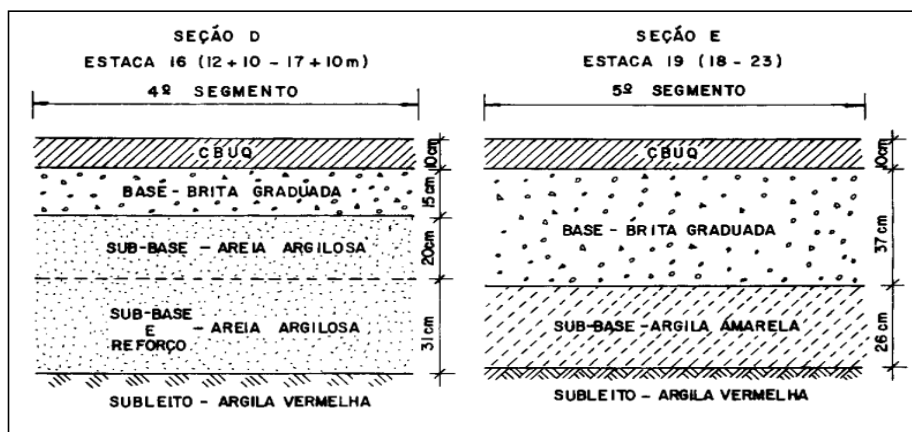
Em janeiro de 1990, Salomão Pinto realizou uma campanha de observações para fins comparativos entre um deflectômetro de impacto, “Falling Weight Deflectometer” (FWD) com a Viga Benkelman. Para tal, foram analisados trechos da BR – 040 / RJ (Areal – Moura Brasil) e BR – 101 / RJ (Niterói – Manilha). Os resultados obtidos foram utilizados como fonte de informação para caracterização estrutural dos pavimentos dos trechos. As Figuras 7 e 8 trazem os perfis dos trechos experimentais citados acima.

Figura 7 – Perfil do trecho experimental - BR 101/RJ, Niterói-Manilha



Fonte: PINTO(1991)

Figura 8 – Perfil do trecho experimental – BR 040/RJ, Areal – Moura-Brasil



Fonte: PINTO (1991)

Foram realizados levantamentos deflectométricos com a Viga Benkelman com a carga de eixo padrão de 8,2 tf e com o FWD para três níveis de carga.

- **26,7 kN**: corresponde ao valor aproximado da carga de roda simples e é equivalente, em termos de deflexão na superfície, ao eixo padrão de 8,2 tf (80 kN), para uma área circular com raio de 10,8 cm.
- **40,0 kN**: soma das cargas por roda do semi-eixo de rodas simples.
- **63,7 kN**: corresponde ao máximo valor obtido com o conjunto de massa de 200 kg para uma altura de queda de 40 cm.

Ficou decidido estabelecer três níveis de carregamento com o objetivo de correlacionar as medidas de deflexão da Viga Benkelman com o FWD, isto é, a partir dos ensaios com o FWD prever a deflexão com a viga.

Coletaram-se as deflexões médias de cada subtrecho determinadas com o FWD e Viga Benkelman, além das temperaturas do ar e da superfície do revestimento. Em seguida, foram relacionadas sob a seguinte forma:

$$D_{VB} = \alpha \cdot D_{FWD} \quad (1)$$

D_{vb} = Deflexão Viga Benkelman

D_{fwd} = Deflexão FWD

A partir dos valores médios das deflexões, para a carga média do FWD de 38,4 kN, definiu-se a seguinte correlação:

$$\begin{aligned} D_{VB} &= -5,73 + 1,396 \cdot D_{FWD} \\ R^2 &= 0,94 \end{aligned} \quad (2)$$

Eliminando-se o intercepto, têm-se a seguinte equação:

$$D_{VB} = 1,32 \cdot D_{FWD} \quad (3)$$

Essa foi a correlação encontrada por Pinto (1991), para as deflexões entre o FWD e a Viga Benkelman para os trechos observados.

Himeno et al (1989) realizaram, no Japão, um estudo comparativo dos resultados obtidos para as deflexões com o Nagaoka KUAB FWD e a Viga Benkelman. A carga no eixo duplo do caminhão foi de 90 kN e a pressão dos pneus de 0,60 MPa, enquanto a carga de pico no FWD foi de 49 kN. Concluíram que apesar das medidas com a Viga Benkelman apresentarem variações maiores que as medidas com o FWD, as deflexões têm um certo grau de correlação. Afirmaram que pode ser resultado do fato do tempo de carregamento ser maior no ensaio com a Viga Benkelman e o eixo tandem afetar na resposta deflectométrica.

Definiram a seguinte correlação:

$$D_{FWD} = 0,309 \cdot D_{VB} + 0,280 \quad (4)$$

$$R^2 = 0,57$$

D_{fwd} = Deflexão obtida em um levantamento com FWD.

D_{vb} = Deflexão obtida em um levantamento com Viga Benkelman

Medina et al (1994) apresentaram exemplos que ilustram a dificuldade de correlação entre o FWD e a Viga Benkelman e concluem que, em geral, não existe singularidade nas correlações entre deflexões obtidas por diferentes aparelhos e que estas somente devem ser usadas com a devida compreensão das condições nas quais foram desenvolvidas e com consciência dos erros envolvidos, que são totalmente dependentes das estruturas ensaiadas, das condições climáticas, do modo de carregamento e da metodologia de ensaio empregada.

Romero et al (1994) publicaram os resultados de comparações entre diversos equipamentos de medição de deflexão a partir dos resultados obtidos na pista experimental do Centro de Estudios y Experimentacion de Obras Públicas (CEDEX), na Espanha. Foram utilizados o equipamento FWD de fabricação KUAB, com carga de 6,5t referente ao semi-eixo padrão de 13 tf, e a Viga Benkelman, com carga no eixo duplo do caminhão de 13 tf.

Os valores de deflexão foram analisados após o pavimento ser solicitado por 50.000 passagens do eixo padrão e após 600.000 passagens. Chegaram a conclusão que a relação entre a Viga Benkelman e o FWD se torna menor com o aumento do tempo de serviço e que é dependente das espessuras das camadas da estrutura e da temperatura do pavimento.

As correlações obtidas foram as seguintes:

• **Pavimento Flexível** (20 cm de CAUQ e 25 cm de base granular)

$$D_{VB} = 1,51 \cdot D_{FWD} \quad (5)$$

(para temperatura do pavimento entre 14 e 15 °C e 50.000 aplicações de carga)

$$D_{VB} = 1,44. D_{FWD} \quad (6)$$

(para temperatura do pavimento entre 9 e 10 °C e 600.000 aplicações de cargas)

• **Pavimento Semi-Rígido** (12 cm de CAUQ, 20 cm de brita com cimento e 15 cm de solo cimento).

$$D_{VB} = 1,03. D_{FWD} \quad (7)$$

(para temperatura do pavimento entre 14 e 15 °C e 50.000 aplicações de cargas)

$$D_{VB} = 0,93. D_{FWD} \quad (8)$$

(para temperatura do pavimento entre 9 e 10 °C e 600.000 aplicações de cargas)

D_{fwd} = Deflexão obtida em um levantamento com FWD.

D_{vb} = Deflexão obtida em um levantamento com Viga Benkelman

Fabrizio et al (1996) obtiveram 2 modelos de correlação entre deflexões recuperáveis características (soma das média aritmética de todas as deflexões medidas no segmento homogêneo e o desvio-padrão) de segmentos homogêneos de pavimentos flexíveis. Nos estudos foram utilizados dados provenientes de projetos desenvolvidos na DEP-DNER, do Sistema de Gerência do Pavimento do IPR/DNER, de determinações obtidas na BR-101 / RS trecho Torres-Osório e da tese de Pinto (1991). Foram obtidos os seguintes modelos:

- Para $D_{cfwd} < 85 \times 10^{-2} \text{ mm}$

$$D_{CVB} = 20,645. (D_{CFWD} - 19)^{0,351} \quad (9)$$

$$R^2 = 0,95$$

- Para $D_{cfwd} > 85 \times 10^{-2} \text{ mm}$

$$D_{CVB} = 8,964. (D_{CFWD} - 60)^{0,715} \quad (10)$$

$$R^2 = 0,93$$

D_{cvb} = Deflexão característica obtida em um levantamento com Viga Benkelman.

D_{fwd} = Deflexão característica obtida em um levantamento com FWD.

Sestini et al (1998) determinaram, através de estudos estatísticos, uma correlação entre os resultados do FWD com os da Viga Benkelman. O estudo foi realizado tendo como amostra 32 trechos homogêneos de rodovias na região central do estado de São Paulo. Os pavimentos amostrados apresentaram revestimentos do tipo tratamento superficial ou concreto betuminoso e a base do tipo granular ou cimentada. Chegaram a conclusão que a relação entre a deflexão medida com a Viga Benkelman e o FWD não depende do tipo de pavimento. Vale ressaltar que o significado da análise foi restringido devido a falta de informações dos parâmetros internos do FWD, tais como: carregamento utilizado, calibração do equipamento, programa de retroanálise utilizado. Obtiveram a seguinte equação:

$$\begin{aligned} D_{VB} &= 0,64 \cdot D_{FWD} \\ R^2 &= 0,87 \end{aligned} \quad (11)$$

D_{vb} = Deflexão medida com Viga Benkelman

D_{fwd} = Deflexão medida com o FWD

Marcon (1996) faz uma referência ao trabalho publicado por Cardoso em 1992, onde o autor apresenta uma relação entre as deflexões obtidas pela Viga Benkelman e o FWD da Dynatest, em levantamentos realizados no aeroporto de São José dos Campos – SP, chegando na seguinte correlação:

$$\begin{aligned} D_{FWD} &= 2,8281 + 0,7502 \cdot D_{VB} \\ R^2 &= 0,64 \end{aligned} \quad (12)$$

Rocha Filho (1996) sugere uma correlação entre as deflexões máximas medidas com a viga e o FWD, em função da espessura da camada de revestimento asfáltico. Analisando os seguimentos deflectométricos, chegaram a conclusão que a deflexão máxima é afetada pelo efeito da temperatura no pavimento flexível e, devido as propriedades elevadas de absorção das radiações solares, má condutividade térmica e comportamento reológico, o revestimento é a camada mais afetada. O modelo sugerido é do tipo $\frac{D_{fwd}}{D_{vb}} = \alpha$, em que $\alpha = f(h1)$. A partir dos dados utilizados na pesquisa, foi encontrada a seguinte correlação:

$$\alpha = \frac{1,0}{(6,136 \times 10^{-3} \cdot h_1) + 1} \quad (13)$$

$$R^2 = 0,94$$

Para, $h_1 = 5,0\text{cm} \rightarrow \alpha = 0,91$

$h_1 = 7,5\text{cm} \rightarrow \alpha = 0,84$

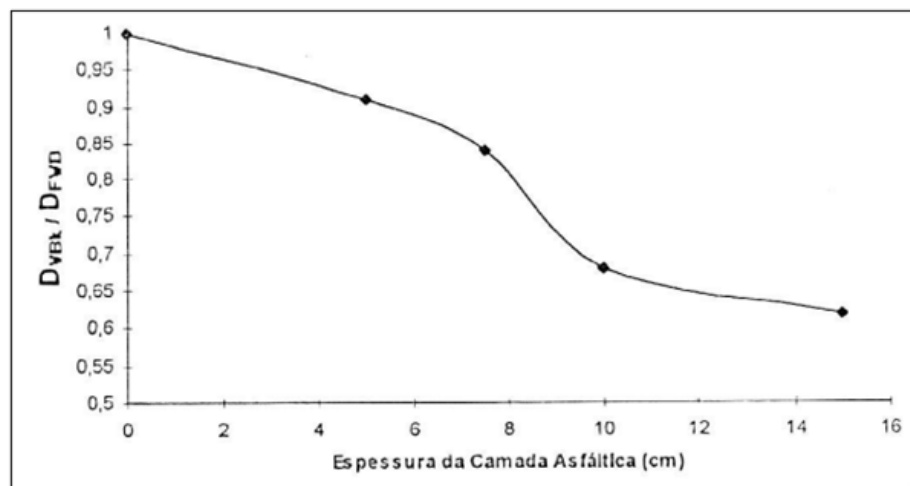
$h_1 = 10,0\text{cm} \rightarrow \alpha = 0,68$

$h_1 = 15,0\text{cm} \rightarrow \alpha = 0,62$

Onde h_1 = espessura da camada de revestimento asfáltico.

A Figura 9 apresenta a curva obtida por Rocha Filho (1996).

Figura 9– Correlação entre VB e FWD



Fonte: Rocha Filho (1996)

Ao efetuar os levantamentos das bacias deflectométricas em estruturas de pavimento flexível rodoviário e aeroportuário, concluíram que é impraticável a derivação de uma correlação completa entre as deflexões medidas com os dois aparelhos devido à elevada dispersão de valores encontrados notadamente quanto mais distante for a leitura do ponto de aplicação da carga.

Pinto e Domingues (2001) realizaram um trabalho de avaliação do pavimento da Avenida das Américas, na cidade do Rio de Janeiro, em um trecho com 7,5 km. Verificaram

que para deflexões baixas, isto é, inferiores a 60×10^{-2} mm, a correlação entre a Viga Benkelman e o FWD é praticamente 1:1, enquanto para valores de deflexão superiores a 80×10^{-2} mm, esta relação aumenta significativamente. Ressaltam ainda que o modelo de correlação obtido é indicado apenas para o trecho analisado, servindo de estimativa para trechos com características semelhantes. Foi encontrada a seguinte correlação:

$$\begin{aligned} D_{VB} &= 1,2062 \cdot D_{FWD} - 5,3016 \\ R^2 &= 0,81 \end{aligned} \quad (14)$$

D_{vb} = Deflexão medida com Viga Benkelman

D_{fwd} = Deflexão medida com o FWD

Grande parte das correlações referenciadas seguem o modelo linear de regressão, sendo que algumas foram obtidas com a eliminação do intercepto. Os valores de R^2 (coeficiente de determinação) variam de 0,57-0,95. Algumas foram obtidas a partir de valores médios de deflexões características de segmentos homogêneos, enquanto outras foram obtidas a partir de deflexões características dos segmentos, ou ainda com valores obtidos em cada estação avaliada. Nas regressões citadas, parte segue o modelo: $D_{FWD} = f(D_{VB})$ e parte $D_{VB} = f(D_{FWD})$.

2.4 Estatística Descritiva

Entende-se por estatística o conjunto de técnicas que permite, de forma sistemática, organizar, descrever, analisar e interpretar dados provenientes de estudos ou experimentos, realizados em qualquer área do conhecimento.

A estatística descritiva é a etapa inicial utilizada para descrever e resumir dados. A disponibilidade de uma grande quantidade de dados e de métodos computacionais bastante eficientes fortificou esta área da estatística.

Na estatística descritiva estudam-se as medidas de posição ou tendência central, que são assim denominadas por indicarem um ponto em torno do qual se concentram os dados. São elas: moda, média, mediana, percentis e quartis. E as medidas de dispersão, que auxiliam as medidas de tendência central a descrever o conjunto central de dados adequadamente, indicando se os dados estão, ou não, próximos uns dos outros. São elas: amplitude total, variância, desvio padrão, coeficiente de variância.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo

A BR-104 tem seu ponto inicial no Rio Grande do Norte, na cidade de Macau, e se estende até Maceió, em Alagoas. Sua extensão total é de 672,3 km, incluindo dois trechos não construídos no Estado do Rio Grande do Norte. A rodovia passa pelos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas. A Figura 10 mostra a localização da BR 104.

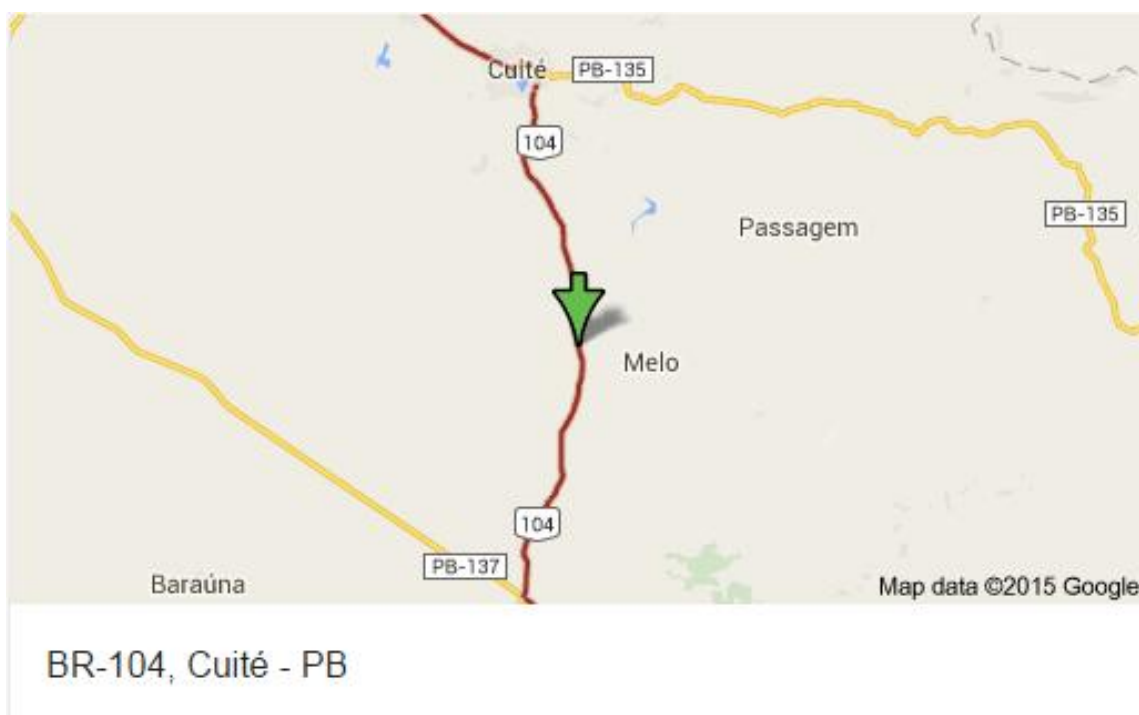
Neste estudo foi analisado o trecho com início em Cuité-PB e final em Campina Grande-PB, com extensão total de aproximadamente 110 km. A Figura 11 mostra a localização do trecho experimental.

Figura 10 – Localização da BR 104



Fonte: Google (2015)

Figura 11 – Localização do trecho estudado



Fonte: Google (2015)

3.2 Seleção dos Segmentos Homogêneos

Para realização deste trabalho, o trecho em estudo foi dividido em subtrechos homogêneos, que são segmentos dentro dos quais se espera um desempenho uniforme para o pavimento existente como para o pavimento após uma restauração que venha a ser realizada. Essa definição tem como base os parâmetros que mais fundamentalmente se relacionam com o desempenho futuro do pavimento existente e ao desempenho futuro de eventuais medidas de restauração.

No meio técnico, tem-se quase como norma, promover a definição de segmentos homogêneos através da análise da poligonal gráfica da variação das deflexões máximas reversíveis. Por falta de métodos nacionais, utiliza-se o “Método das Diferenças Acumuladas” (AASHTO/1993), que permite a divisão do trecho em segmentos homogêneos de uma forma racional.

Para o presente trabalho, será considerado que cada subtrecho pode ter uma extensão de, no máximo, 7 km e uma extensão mínima de 280 m. Esses valores são baseados no DNER PRO 269/94.

Abaixo segue o roteiro de cálculo pelo Método das Diferenças Acumuladas:

1. Calcula-se o valor médio da deflexão para todo o trecho;
2. Calcula-se a diferença entre cada valor individual;
3. Calculam-se os valores acumulados das diferenças;
4. Plota-se em um gráfico, nas abscissas as distâncias e nas ordenadas os valores acumulados das diferenças.

Cada variação de coeficiente angular da curva obtida indica uma mudança de comportamento médio de um determinado segmento para outro, delimitando as extremidades dos segmentos homogêneos.

$$\text{Deflexão média: } \bar{D}_i = \frac{D_{(i-1)} + D_i}{2} \quad (15)$$

$$\text{Área entre estações e curva: } A_i = \bar{D}_i \cdot \Delta l_i \quad (16)$$

$$\text{Área acumulada: } A_c = \Sigma A_i \quad (17)$$

$$\text{Distância acumulada: } L_c = \Sigma \Delta l_i \quad (18)$$

$$\text{Diferenças acumulada: } Z_i = \Sigma A_i - tg\alpha \cdot \Sigma \Delta l_i \quad (19)$$

$$\text{onde } tg\alpha = \frac{A_c}{L_c} \quad (20)$$

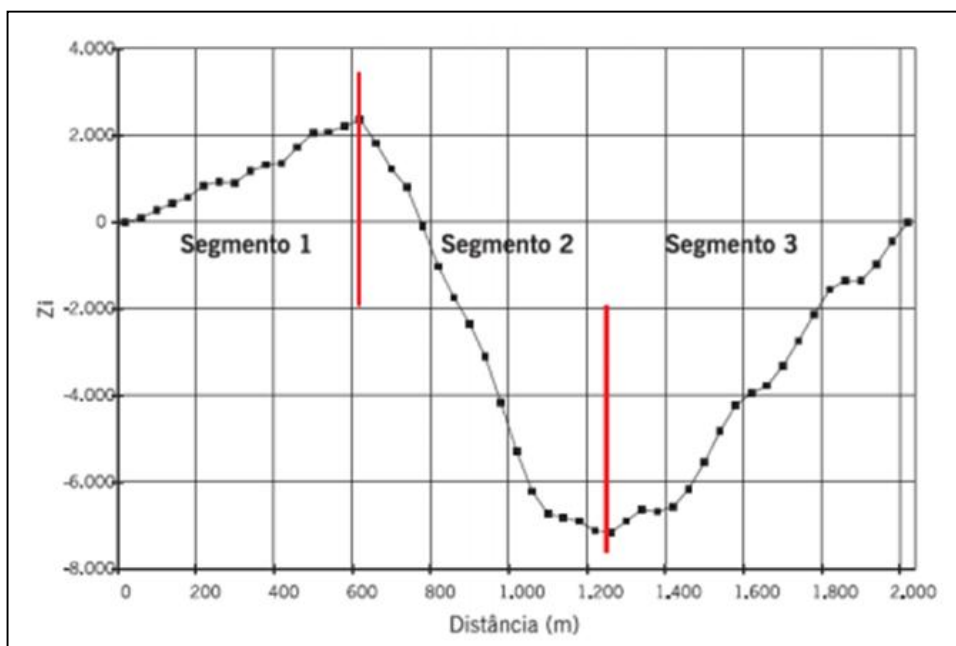
Onde: $D_{(i-1)}$ é a deflexão do ponto (i-1)

D_i é a deflexão do ponto i.

Δl_i é a distância entre os pontos (i) e (i-1).

Na Figura 12 é apresentado um exemplo de delimitação de segmentos homogêneos pelo Método das Diferenças Acumuladas.

Figura 12 – Exemplo de delimitação dos segmentos homogêneos



Fonte: AASHTO (1993)

Além da divisão pelo método acima, serão considerados os tipos de estrutura das camadas do pavimento para que os trechos também tenham estrutura homogênea.

3.3 Análise da Regressão FWDxViga

O estudo da correlação entre as deflexões obtidas pela Viga Benkelman e o FWD será por meio de uma regressão com auxílio do Excel 2007.

Modelos de regressão são modelos matemáticos que relacionam o comportamento de uma variável Y com outra X.

Neste trabalho, serão utilizados modelos de regressão simples, isto é, com uma variável dependente. Temos os seguintes modelos:

$$\text{Linear: } Y = a.X + b \quad (21)$$

$$\text{Logarítmica: } Y = a.\ln(X) + b \quad (22)$$

$$\text{Potencial: } Y = a.X^b \quad (23)$$

$$\text{Exponencial: } Y = a.e^{b.X} \quad (24)$$

Dos modelos acima, será escolhido o que apresentar o melhor coeficiente de determinação (R^2).

A presença ou ausência de relação linear pode ser investigada sob dois pontos de vista:

1) Quantificando a força dessa relação: correlação.

2) Explicitando a forma dessa relação: regressão.

A determinação da relação entre as variáveis tem como objetivos:

- Realizar previsões sobre o comportamento futuro de algum fenômeno da realidade. Neste caso extrapola-se para o futuro as relações causa-efeito, já observadas anteriormente, entre as variáveis.
- Possibilitar a simulação dos efeitos sobre uma variável Y em decorrência de alterações introduzidas nos valores de uma variável X.

3.4 Coeficiente de Determinação e Coeficiente de Correlação

O coeficiente de determinação é dado por:

$$R^2 = \frac{a \cdot \sum y + b \cdot \sum x \cdot y - n \cdot (\bar{y})^2}{\sum y^2 - n \cdot (\bar{y})^2} \quad (25)$$

Onde: a e b são os coeficientes da regressão.

y é a variável dependente.

x é a variável independente.

$\bar{y}$ é a média dos valores de y.

n é o número de elementos observados.

O coeficiente de determinação é igual ao quadrado do coeficiente de correlação. Com isso, a partir do coeficiente de determinação, pode-se determinar o coeficiente de correlação.

Uma forma alternativa para o coeficiente de correlação de uma amostra é dada a seguir:

$$R = \frac{\Sigma x \cdot y - \frac{\Sigma x \cdot \Sigma y}{n}}{\sqrt{\Sigma(x^2) - \frac{(\Sigma x)^2}{n}} \cdot \sqrt{\Sigma(y^2) - \frac{(\Sigma y)^2}{n}}} \quad (26)$$

que não requer o conhecimento dos coeficientes $\underline{a}$ e $\underline{b}$ da regressão.

O coeficiente de determinação é sempre positivo, enquanto o coeficiente de correlação pode admitir valores negativos e positivos. Para valores de R igual ou próximo de -1 ou +1 indica que existe uma forte relação entre as variáveis. Essa relação é chamada direta, para valores próximos de 1 e inversa para valores próximos de -1. Caso o valor seja próximo de zero, significa que existe pouco relacionamento entre as variáveis.

Logo, podemos afirmar que o coeficiente de determinação indica o quanto à reta de regressão explica o ajuste da reta, enquanto o coeficiente de correlação indica uma medida da força de relação entre as variáveis.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Segmentos Homogêneos

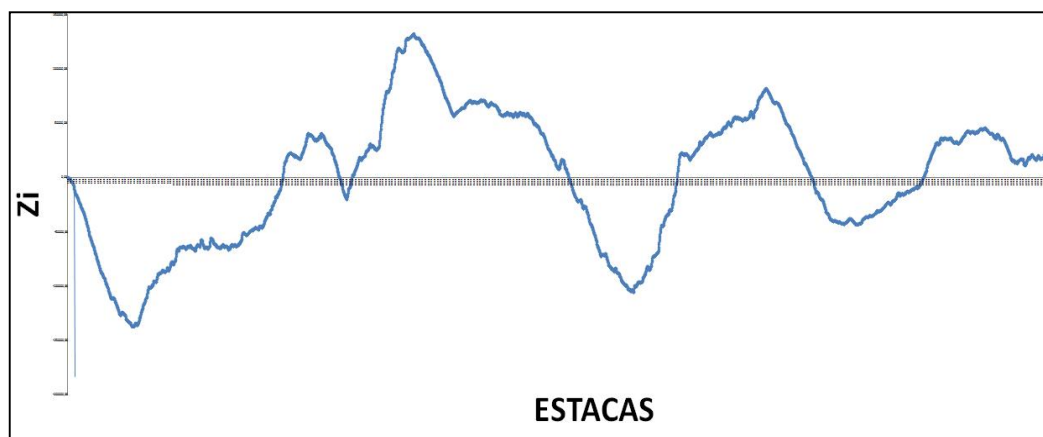
O procedimento de divisão dos segmentos homogêneos foi realizado tanto para os valores de deflexão do FWD quanto para os da Viga Benkelman. Procurou-se dividir os trechos homogêneos o mais igual possível entre os dois equipamentos. O Quadro 1 e as Figuras 13, 14 trazem os resultados do Método das Diferenças Acumuladas para o FWD, enquanto o Quadro 2 e as Figuras 15, 16 trazem os resultados referentes à VB.

Quadro 1 – Exemplo do Método das Diferenças Acumuladas para o FWD

Procedimento para Delimitação em Segmentos Homogêneos (para FWD)								
Estaca	Ponto	Dfwd ($\times 10^{-2}$ mm)	D	Δl_i	$\Sigma(\Delta l_i)$	A_i	$\Sigma(A_i)$	Z_i
405	0	53,21	0,00	0	0	0	0	0,00
406	20	63,04	58,13	20	20	1162,50	1162,50	-40,99
407	40	41,53	52,29	20	40	1045,70	2208,20	-198,78
408	60	49,69	45,61	20	60	912,20	3120,40	-490,06
409	80	60,45	55,07	20	80	1101,40	4221,80	-592,15
410	100	44,89	52,67	20	100	1053,40	5275,20	-742,24
411	120	80,82	62,86	20	120	1257,10	6532,30	-688,63
412	140	66,60	73,71	20	140	1474,20	8006,50	-417,91
413	160	44,01	55,31	20	160	1106,10	9112,60	-515,30
414	180	66,64	55,33	20	180	1106,50	10219,10	-612,29
415	200	47,15	56,90	20	200	1137,90	11357,00	-677,88
416	220	59,76	53,45	20	220	1069,10	12426,10	-812,27
417	240	52,29	56,03	20	240	1120,50	13546,60	-895,25
418	260	30,50	41,40	20	260	827,90	14374,50	-1270,84
419	280	54,59	42,55	20	280	850,90	15225,40	-1623,43
420	300	45,21	49,90	20	300	998,00	16223,40	-1828,92
421	320	41,78	43,49	20	320	869,90	17093,30	-2162,50
422	340	31,98	36,88	20	340	737,60	17830,90	-2628,39
423	360	53,61	42,79	20	360	855,90	18686,80	-2975,98
424	380	26,07	39,84	20	380	796,80	19483,60	-3382,67
425	400	40,15	33,11	20	400	662,20	20145,80	-3923,95
426	420	57,19	48,67	20	420	973,40	21119,20	-4154,04
427	440	39,70	48,45	20	440	968,90	22088,10	-4388,63

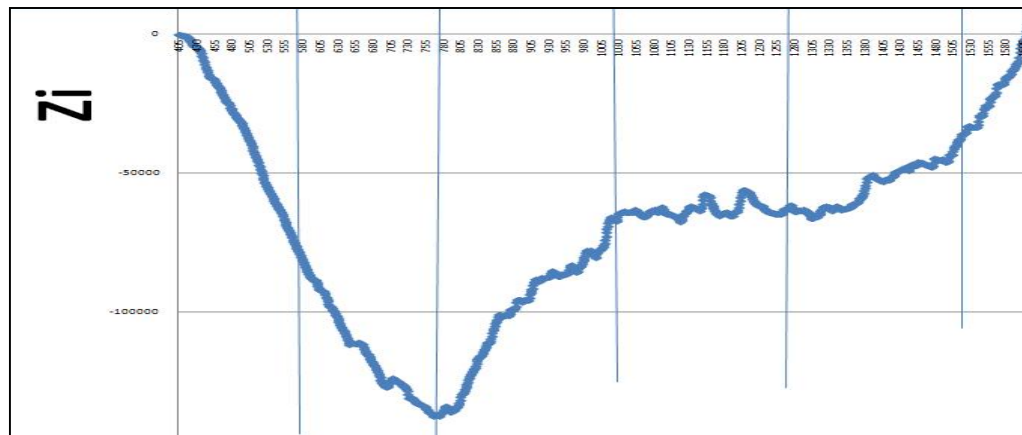
Fonte: o autor(2015)

Figura 13 – Gráfico obtido pelo Método das Diferenças Acumuladas para o FWD



Fonte: o autor(2015)

Figura 14 – Esquema da seleção dos segmentos homogêneos para o FWD



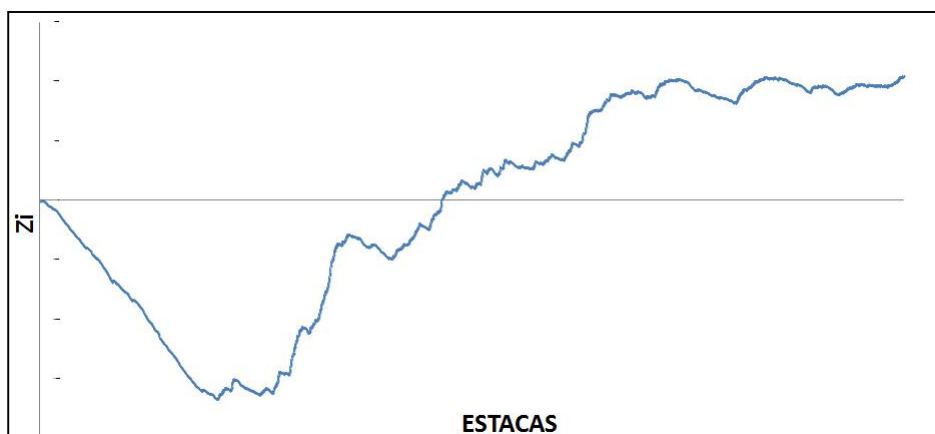
Fonte: o autor(2015)

Quadro 2 – Exemplo do Método das Diferenças Acumuladas para a VB

Procedimento para Delimitação em Segmentos Homogêneos (para VB)								
Estaca	Ponto	Dvb ($\times 10^{-2}$ mm)	D	Δli	$\Sigma(\Delta li)$	Ai	$\Sigma(Ai)$	Zi
405	0	44	0	0	0	0	0	0
406	20	52	48	20	20	960,00	960,00	42,47904
407	40	48	50	20	40	1000,00	1960,00	124,9581
408	60	60	54	20	60	1080,00	3040,00	287,4371
409	80	40	50	20	80	1000,00	4040,00	369,9162
410	100	48	44	20	100	880,00	4920,00	332,3952
411	120	52	50	20	120	1000,00	5920,00	414,8742
412	140	40	46	20	140	920,00	6840,00	417,3533
413	160	48	44	20	160	880,00	7720,00	379,8323
414	180	36	42	20	180	840,00	8560,00	302,3114
415	200	52	44	20	200	880,00	9440,00	264,7904
416	220	44	48	20	220	960,00	10400,00	307,2695
417	240	56	50	20	240	1000,00	11400,00	389,7485
418	260	48	52	20	260	1040,00	12440,00	512,2275
419	280	40	44	20	280	880,00	13320,00	474,7066
420	300	40	40	20	300	800,00	14120,00	357,1856
421	320	44	42	20	320	840,00	14960,00	279,6647
422	340	40	42	20	340	840,00	15800,00	202,1437
423	360	48	44	20	360	880,00	16680,00	164,6227
424	380	32	40	20	380	800,00	17480,00	47,10178
425	400	48	40	20	400	800,00	18280,00	-70,4192
426	420	36	42	20	420	840,00	19120,00	-147,94
427	440	52	44	20	440	880,00	20000,00	-185,461

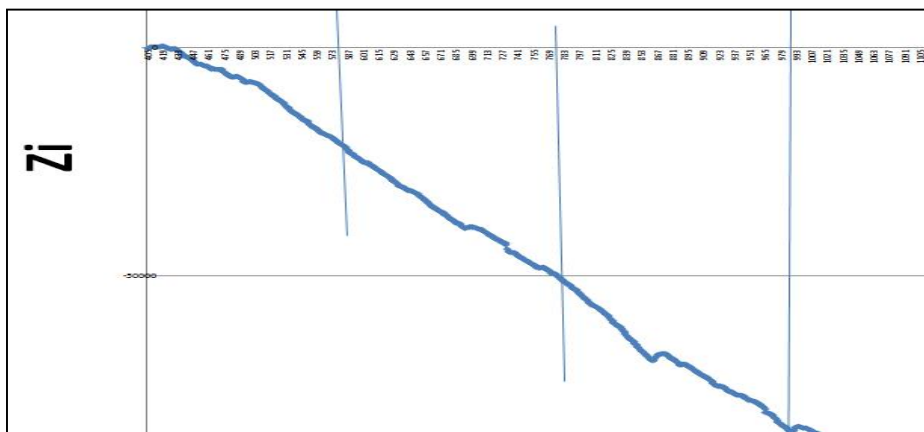
Fonte: o autor(2015)

Figura 15 - Gráfico obtido pelo Método das Diferenças Acumuladas para a VB



Fonte: o autor(2015)

Figura 16 – Esquema da seleção dos segmentos homogêneos para a VB



Fonte: o autor(2015)

Foram selecionados 23 segmentos homogêneos de acordo com o comportamento da curva obtida para cada equipamento. As características estão dispostas no Quadro 3 abaixo.

Quadro 3 – Divisão dos Segmentos Homogêneos do trecho em estudo

Subtrecho	Estaca inicial	Estaca final	L(m)
1	405	560	3100
2	560	780	4400
3	780	1024	4880
4	1024	1267	4860
5	1267	1511	4880
6	1511	1755	4880
7	1755	1970	4300
8	1970	2150	3600
9	2150	2355	4100
10	2355	2560	4100
11	2560	2850	5800
12	2850	3155	6100
13	3155	3380	4500
14	3380	3555	3500
15	3555	3806	5020
16	3806	4056	5000
17	4056	4306	5000
18	4306	4567	5220
19	4567	4830	5260
20	4830	5056	4520
21	5056	5390	6680
22	5390	5690	6000
23	5690	5904	4280
Total			109980

4.2 Análise Estatística

Em cada um dos 23 segmentos homogêneos, foram definidos os valores da deflexão característica obtida tanto com a viga Benkelman quanto com o FWD. Os resultados da análise estatística encontram-se nos Quadro 4 e 5, respectivamente.

Quadro 4 – Análise estatística dos segmentos para VB

Seg.	Análise Estatística (VB)					
	Média	Desvio	Dc	Máx	Mín	C.V.(%)
1	40,08	7,22	47,3	60	24	18,01
2	38,44	7,68	46,11	56	24	19,97
3	38,57	8,7	47,28	72	24	22,56
4	36,4	7,6	44	56	24	20,88
5	39,26	7	46,26	72	24	17,83
6	46,9	12,44	59,34	104	28	26,51
7	49,45	13,27	62,72	120	28	26,83
8	57,51	19,65	77,16	120	32	34,17
9	63,59	21,66	85,25	200	32	34,07
10	43,49	8,9	52,4	80	24	20,47
11	49,08	11,99	61,06	80	28	24,42
12	51,33	15,69	67,02	112	24	30,56
13	50,4	18,79	69,19	120	24	37,28
14	45,92	11,03	56,95	100	28	24,03
15	49,02	12,02	61,04	88	28	24,51
16	54,05	16,05	70,09	100	32	29,69
17	45,81	10,38	56,19	80	16	22,67
18	46,73	10,6	57,32	80	28	22,68

Quadro 4 – Análise estatística dos segmentos para VB (Continuação)

Seg.	Análise Estatística (VB)					
	Média	Desvio	Dc	Máx	Mín	C.V.(%)
19	43,83	6,48	50,32	60	32	14,79
20	50,44	8,97	59,41	80	32	17,78
21	44,93	9,05	53,99	72	28	20,15
22	45,96	8,42	54,38	76	28	18,32
23	47,76	8,46	56,21	80	28	17,71

Quadro 5 – Análise estatística dos segmentos para FWD

Seg.	Análise Estatística (FWD)					
	Média	Desvio	Dc	Máx	Mín	C.V.(%)
1	37,64	12,84	50,49	80,82	15,14	18,01
2	45,22	18,51	63,73	108,65	19,05	40,92
3	74,39	28,5	102,89	160,34	18,74	38,31
4	60,94	24,66	85,59	155,92	16,45	40,46
5	65,05	25,21	90,26	171,92	19,4	38,76
6	76,38	29,44	105,82	182,49	26,32	38,54
7	46,5	24,63	71,13	184,94	11,11	52,96
8	73,6	27,75	101,34	143,43	24,63	37,7
9	84,44	34,48	118,92	177,79	20,06	40,84
10	43,03	14,49	57,52	86,46	13,98	33,67

Quadro 5 – Análise estatística dos segmentos para FWD (Continuação)

Seg.	Análise Estatística (FWD)					
	Média	Desvio	Dc	Máx	Mín	C.V.(%)
11	60,1	17,6	77,7	100,8	17,19	29,29
12	52,01	21,89	73,9	122,19	16,26	42,09
13	43,67	26,37	70,04	159,51	13,29	60,38
14	49,47	20,99	70,46	105,01	15,42	42,43
15	77,57	30,97	108,54	195,51	21,8	39,92
16	71,53	27,54	99,07	170,94	12,43	38,5
17	67,79	23,62	91,41	175,53	18,59	34,85
18	45,52	16,37	61,89	163,48	8,71	35,95
19	51,58	16,12	67,7	117,81	11,98	31,26
20	66,44	10,62	77,05	96,6	24,5	15,98
21	67,13	18,43	85,56	185,32	11,79	27,46
22	57,95	17,58	75,52	181,76	13,74	30,33
23	61,62	20,9	82,52	133,87	10,06	33,92

No apêndice constam as figuras com os valores de deflexão de cada segmento e o gráfico de dispersão, para os dois equipamentos.

4.3 Estruturas do Pavimento

O pavimento da BR 104, no trecho estudado, apresenta as seguintes estruturas:

- Revestimento: revestimento asfáltico com espessuras variando entre 4, 5 e 6cm.

- Base: pedregulho silto-arenoso amarelo claro / pedregulho silto-arenoso cinza escuro. Essa camada apresentou uma espessura média de 42cm.
- Sub-base: pedregulho silto-arenoso amarelo claro / silte arenoso com pedregulho. Essa camada apresentou espessura média de 53cm.
- Sub-leito: silte arenoso com pedregulho / argila siltosa com pedregulho / rocha.

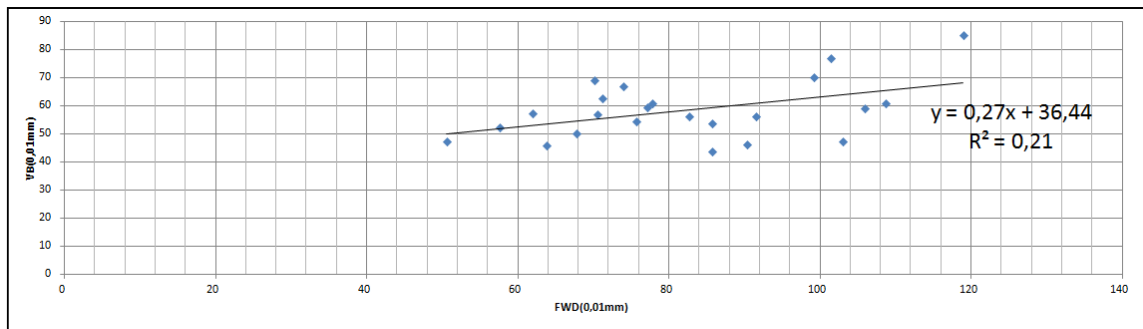
4.4 Correlação Obtida

Nesta análise, procedeu-se a obtenção da correlação entre as deflexões características de cada um dos 23 segmentos homogêneos. Foi utilizada a equação do tipo linear para obtenção da regressão, por ser a que apresentou o melhor coeficiente de determinação (R^2). No Quadro 6 estão apresentados os valores de deflexão característica para os dois equipamentos. Na Figura 17 é apresentada a reta de regressão para as deflexões características.

Quadro 6 – Deflexões Características

Seg.	D _{CVB} (0,01mm)	D _{CFWD} (0,01mm)
1	47,3	50,5
2	46,11	63,7
3	47,28	103
4	44	85,6
5	46,26	90,3
6	59,34	106
7	62,72	71,1
8	77,16	101
9	85,25	119
10	52,4	57,5
11	61,06	77,7
12	67,02	73,9
13	69,19	70
14	56,95	70,5
15	61,04	109
16	70,09	99,1
17	56,19	91,4
18	57,32	61,9
19	50,32	67,7
20	59,41	77,1
21	53,99	85,6
22	54,38	75,5
23	56,21	82,5

Figura 17 – Gráfico de Dispersão das Deflexões Características



Fonte: o autor(2015)

Ficou decidido usar apenas as deflexões características dos segmentos homogêneos, pois a regressão para a deflexão de cada segmento apresentou valores do coeficiente de determinação próximos de zero, o que significa uma correlação fraca entre as variáveis.

Foi definida a seguinte correlação:

$$D_{CVB} = D_{CFWD} \cdot 0,27 + 36,44 \quad (30)$$

$$R^2 = 0,21$$

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo poderá contribuir para futuras pesquisas que venham a ser realizadas na região na qual foram coletados os dados. Como também pode servir de comparativo com correlações obtidas através da mesma metodologia para outras estruturas de pavimento em outras regiões do país.

A seguir são apresentadas as principais conclusões do trabalho:

Verifica-se que, em média, os coeficientes de variação das medidas com a viga Benkelman estão em torno de 24%, enquanto que com o FWD cerca de 37%, caracterizando, discretamente, uma melhor homogeneidade nas medidas realizadas com a viga Benkelman.

Os limites superiores e inferiores das deflexões para os dois equipamentos. As deflexões na viga Benkelman variam de 16×10^{-2} mm até 200×10^{-2} mm, enquanto no FWD variam de $8,71 \times 10^{-2}$ mm até $195,5 \times 10^{-2}$ mm.

Quanto aos valores de deflexão média, verifica-se que 80% das deflexões características com FWD são superiores as obtidas pela Viga Benkelman. Os valores da deflexão estão ligados ao comportamento do subleito e variam de acordo com a época do ano.

O Coeficiente de Determinação (R^2), basicamente, indica quanto o modelo foi capaz de explicar os dados analisados. Para $R^2=0,21$, significa que o modelo explica 21% das variáveis ou que 79% das deflexões da VB não podem ser explicadas (ou descritas) pela deflexão do FWD e vice-versa. Quanto ao Coeficiente de Correlação (R), cujo valor encontrado foi $R=0,46$, mostra que as variáveis apresentam uma correlação moderada. Esses valores encontrados podem ser atribuídos ao fato de que os levantamentos foram realizados em épocas do ano diferentes. Sendo os levantamentos com a FWD realizados primeiro que os com o VB.

6 RECOMENDAÇÃO

Recomenda-se que para futuras sejam realizados os levantamentos com os dois equipamentos na mesma época, pois assim as condições, temperatura, umidade, compactação, a que as camadas do pavimento está submetido será a mesma tanto para o FWD quanto para a viga Benkelman.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNUCCI, L. L. B. ; MOTTA, Laura Maria Goretti da ; CERATTI, Jorge Augusto Pereira ; SOARES, Jorge Barbosa . **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2007. v. 1. 520 p

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 024/94 – **Determinação das deflexões no pavimento pela viga Benkelman**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO 273/96: determinação de deflexões com defletômetro de impacto tipo falling weight deflectometer (FWD)**. Rio de Janeiro, 1996.

FABRÍCIO, J.M., DUARTE, J.C., SILVA, P.D.E.A, **Correlação entre Deflexões Características em Pavimentos Flexíveis com a Viga Benkelman e com o Falling Weight Deflectometer**. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, BA, nov. 1996.

HIMENO, K., MARUYAMA, T., KASAHARA, A. **Development of Pavement Evaluation System Using the Falling Weight Deflectometer**. 2º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projeto de Reforço - SINAPRE, Rio de Janeiro, RJ, 1989.

MARCON, A.F., **Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema de Gerência de Pavimentos para a Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina**. Tese de Doutorado, ITA, São José dos Campos, 1996.

MEDINA, J., MACÊDO, J.A.G., MOTTA, L.M.G., ALBERNAZ, C.A.V. **Utilização de Ensaio Deflectométrico e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos**. 28ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, MG, set. 1994.

PINTO, I. E., DOMINGUES, DOMINGUES, F.A.A. **Uma Contribuição ao Estudo de Correlação entre Equipamentos Medidores de Deflexões: Viga Benkelman e Falling Weight Deflectometer - FWD**. Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Auburn, Alabama, USA, aug. 2001.

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

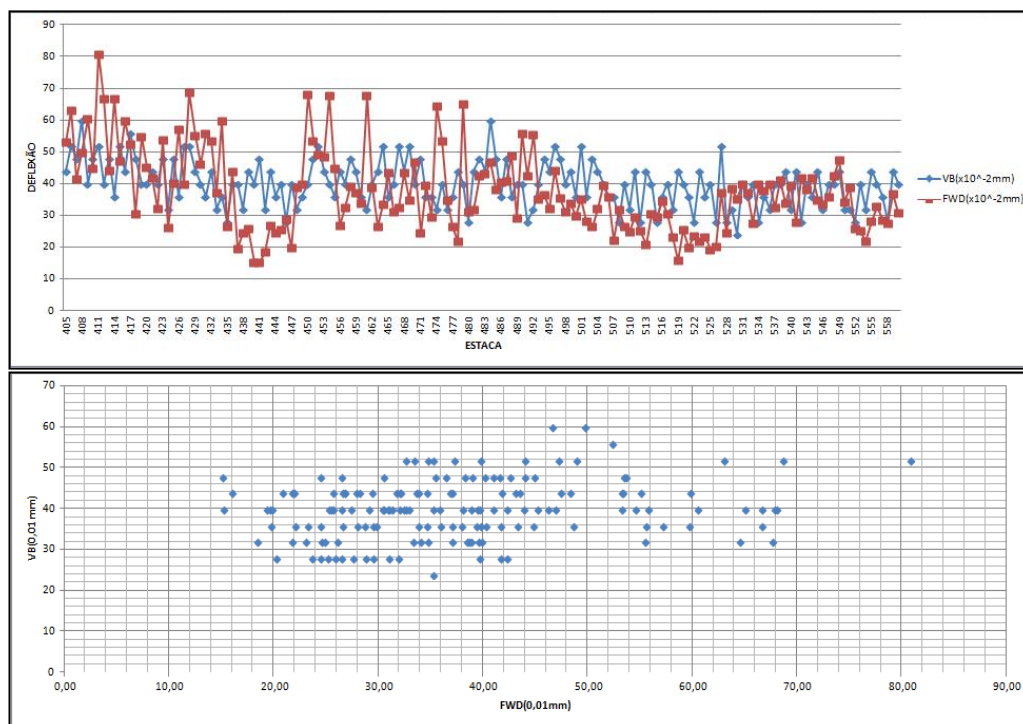
ROCHA FILHO, N. R. **Estudo de Técnicas para Avaliação Estrutural de Pavimentos por Meio de Levantamentos Deflectométricos**. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, SP, 1996.

ROMERO, R., RUIZ, A., RODIL, R., LECHUGA, M.A. **Variation of Deflection with Measuring Equipment and Load Speed on Test Track**. Transportation Research Board 1448, Washington, DC, 1994.

SESTINI, V.M., SÓRIA, M.H.A., QUEIROZ, C., PRIETO, V. **Correlação dos Resultados de Equipamentos Tipo FWD com os da Viga Benkelman**. 31ª Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo, SP, out. 1998.

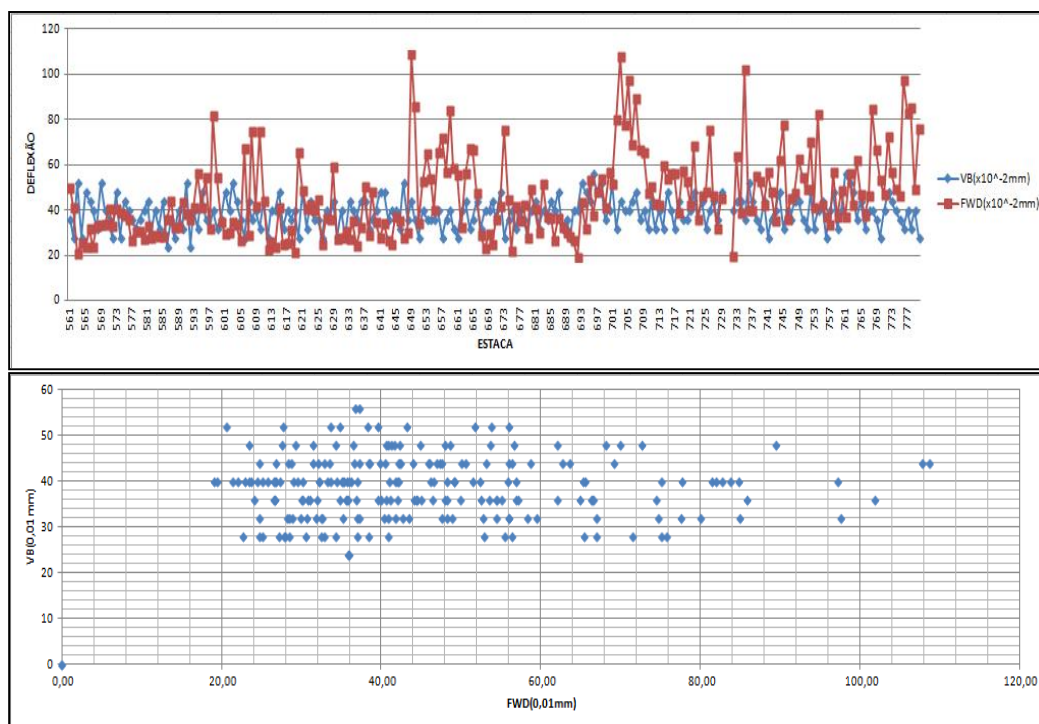
APÊNDICE A – Deflexões e Gráfico de Dispersão dos Segmentos Homogêneos

Figura A.1 – Segmento homogêneo 1



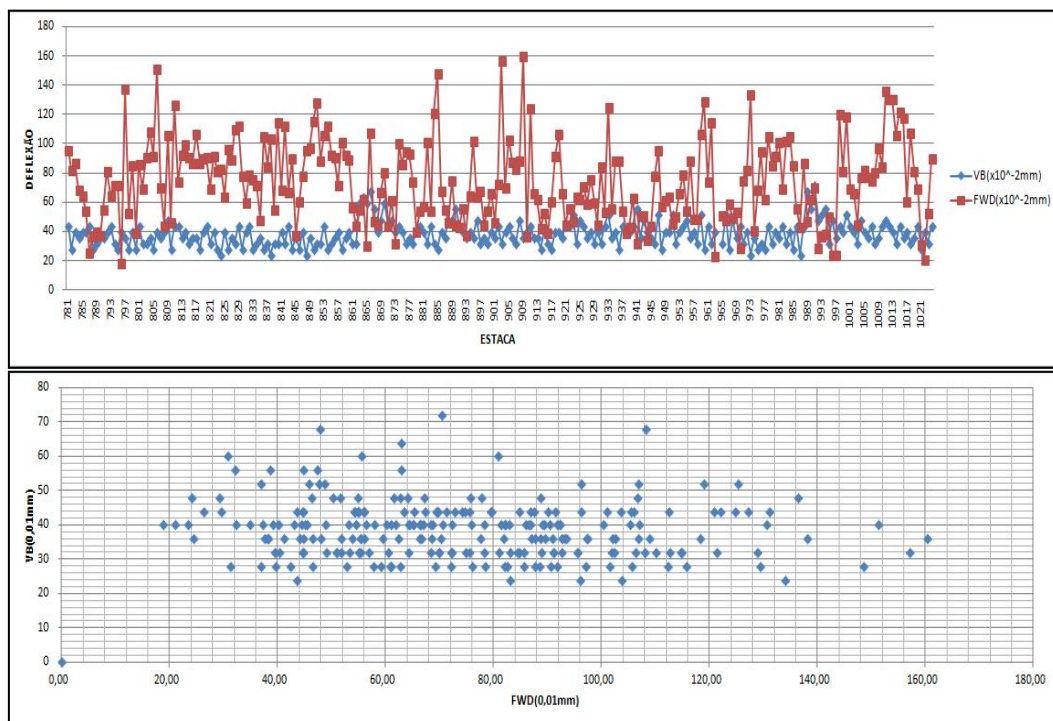
Fonte: o autor(2015)

Figura A.2 – Segmento homogêneo 2



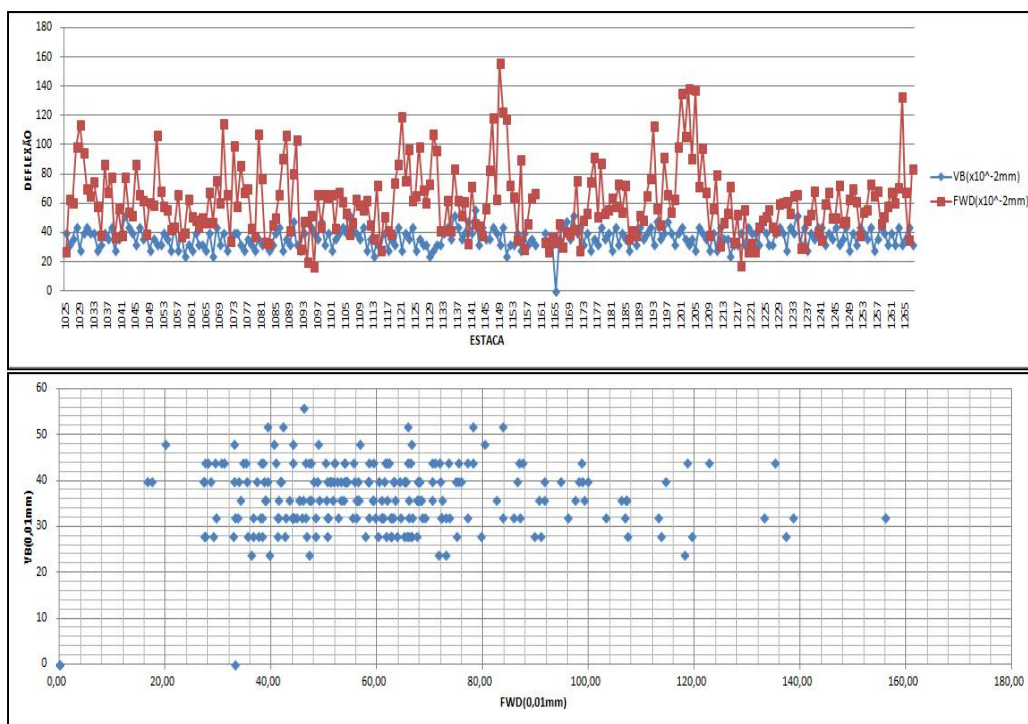
Fonte: o autor(2015)

Figura A.3 – Segmento homogêneo 3



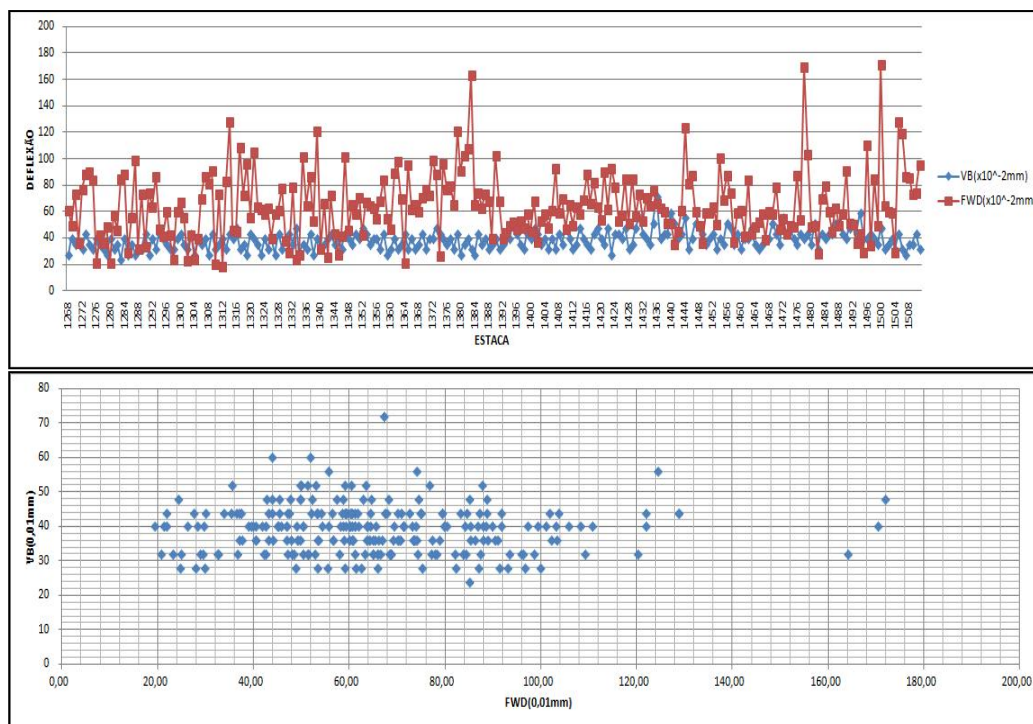
Fonte: o autor(2015)

Figura A.4 – Segmento homogêneo 4



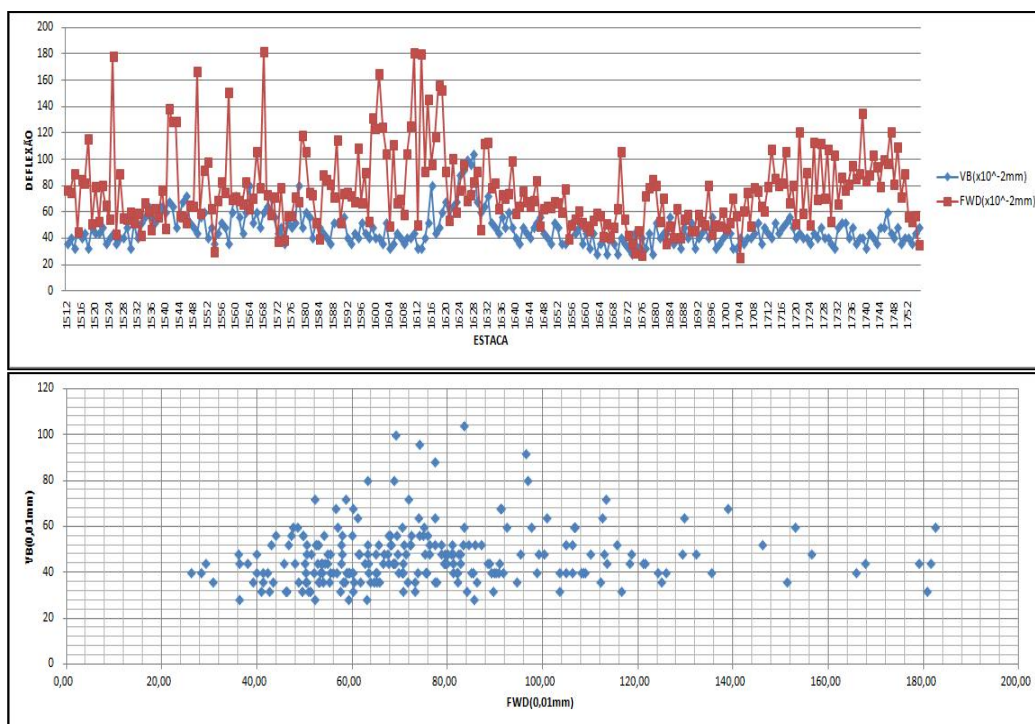
Fonte: o autor(2015)

Figura A.5 – Segmento homogêneo 5



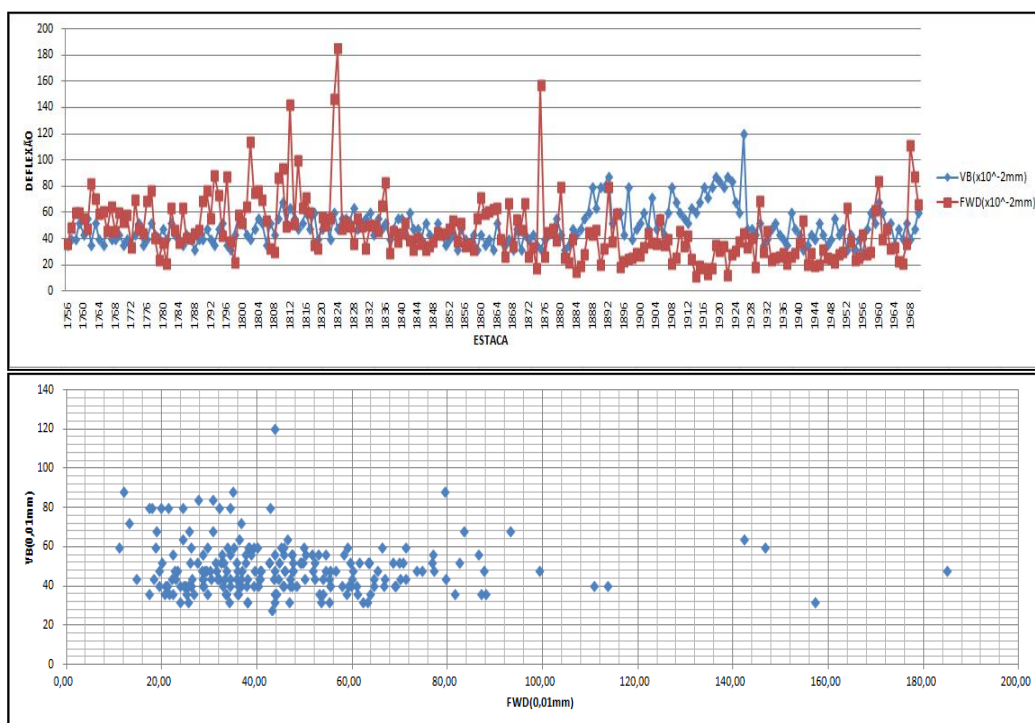
Fonte: o autor(2015)

Figura A.6 – Segmento homogêneo 6



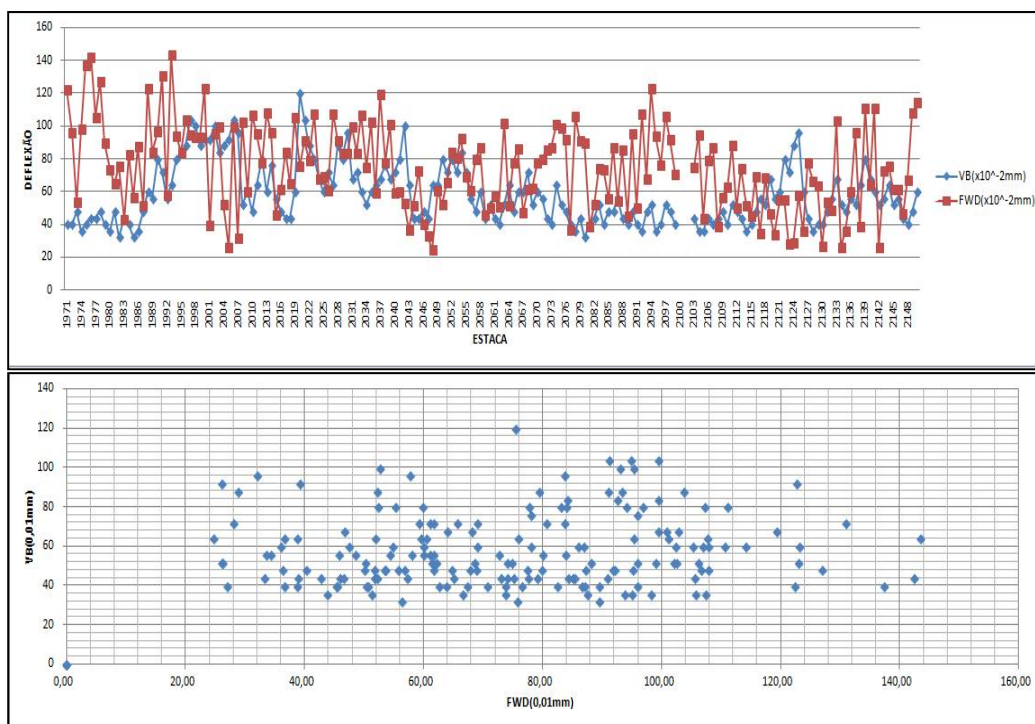
Fonte: o autor(2015)

Figura A.7 – Segmento homogêneo 7



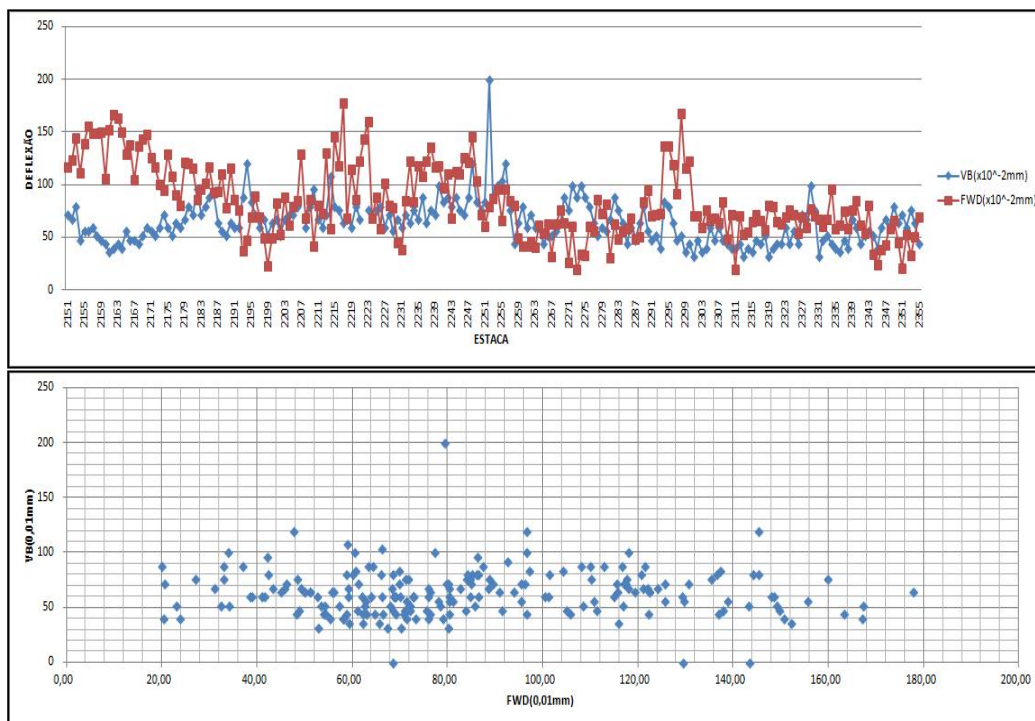
Fonte: o autor(2015)

Figura A.8 – Segmento homogêneo 8



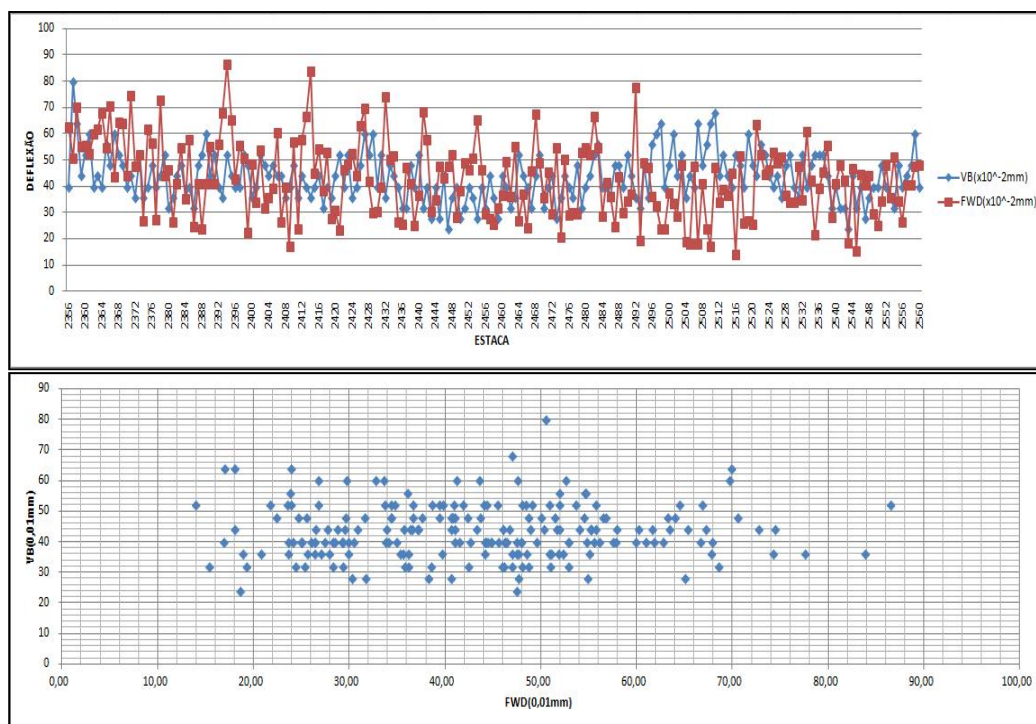
Fonte: o autor(2015)

Figura A.9 – Segmento homogêneo 9



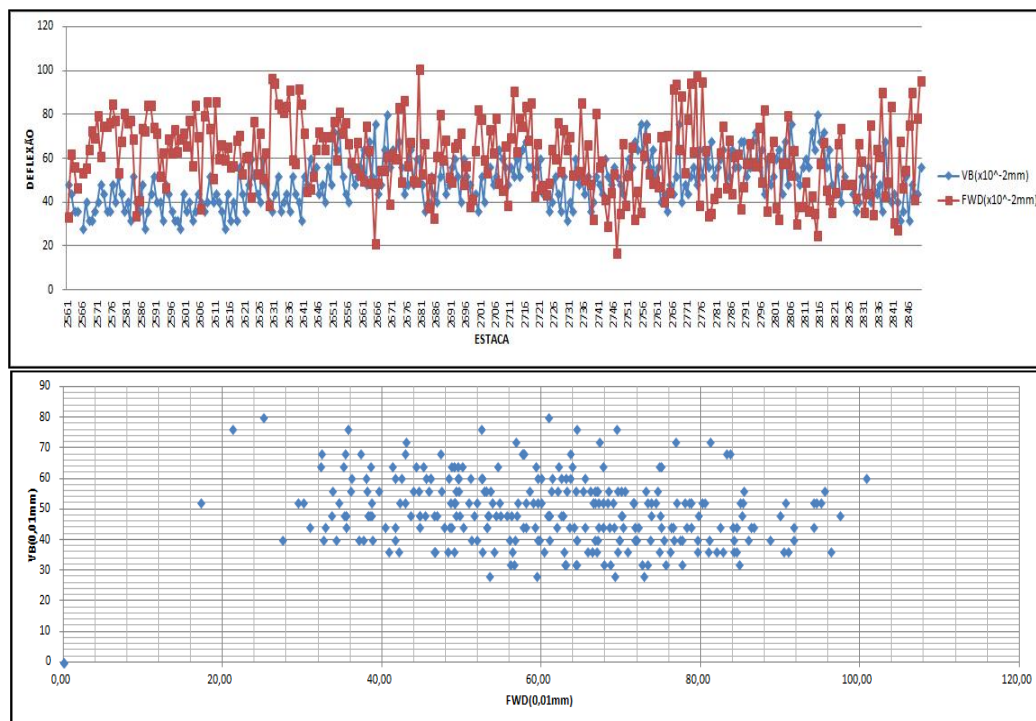
Fonte: o autor(2015)

Figura A.10 – Segmento homogêneo 10



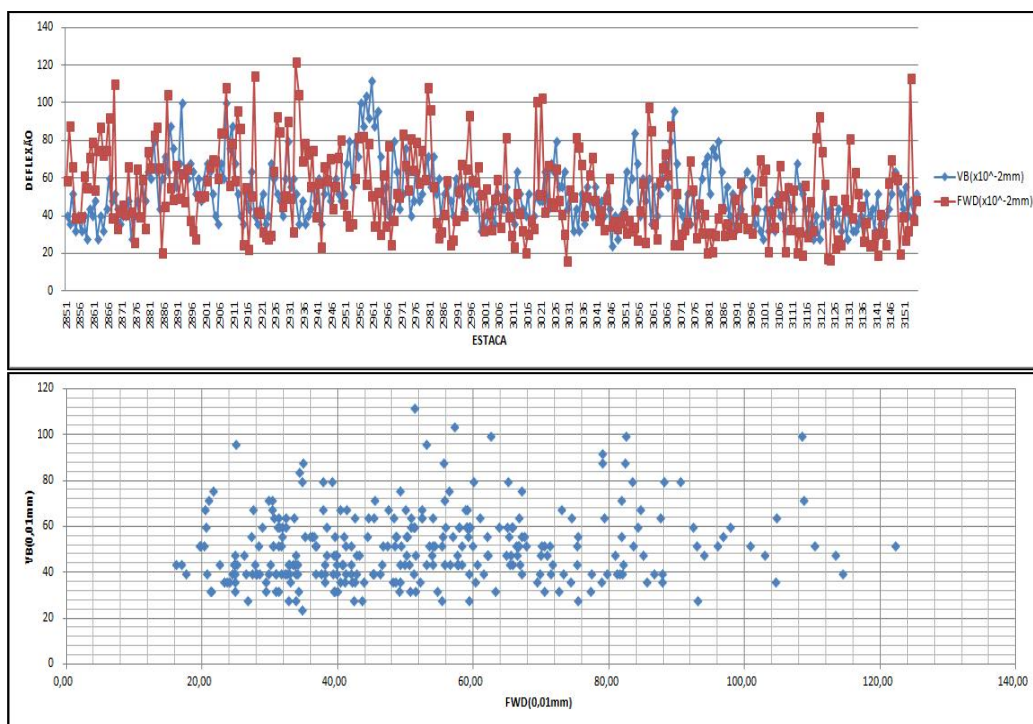
Fonte: o autor(2015)

Figura A.11 – Segmento homogêneo 11



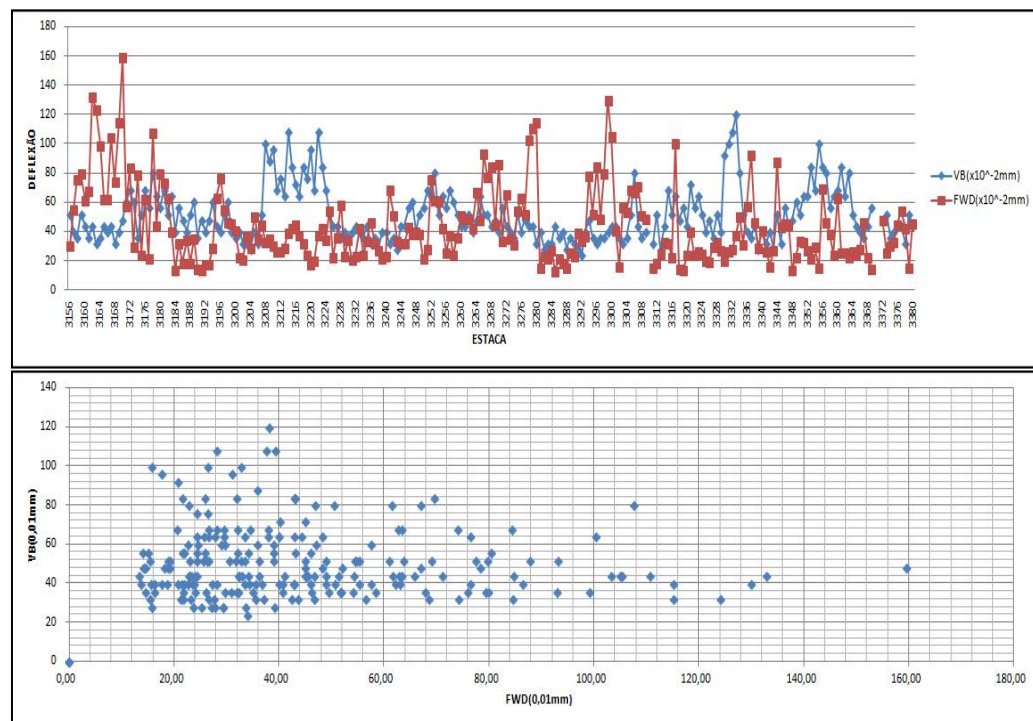
Fonte: o autor(2015)

Figura A.12 – Segmento homogêneo 12



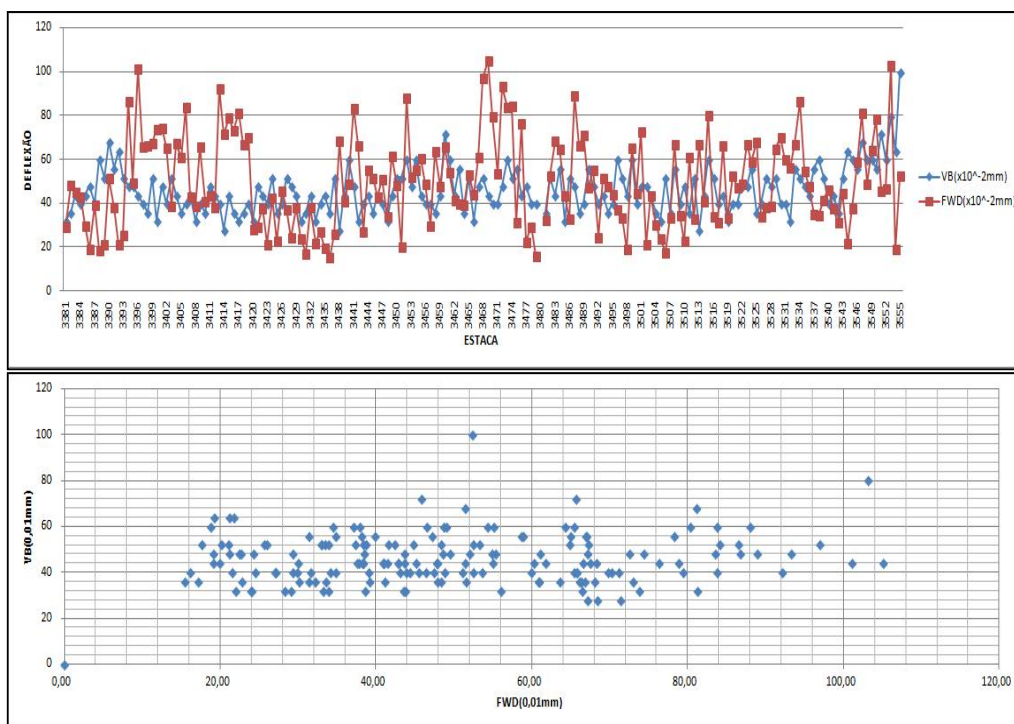
Fonte: o autor(2015)

Figura A.13 – Segmento homogêneo 13



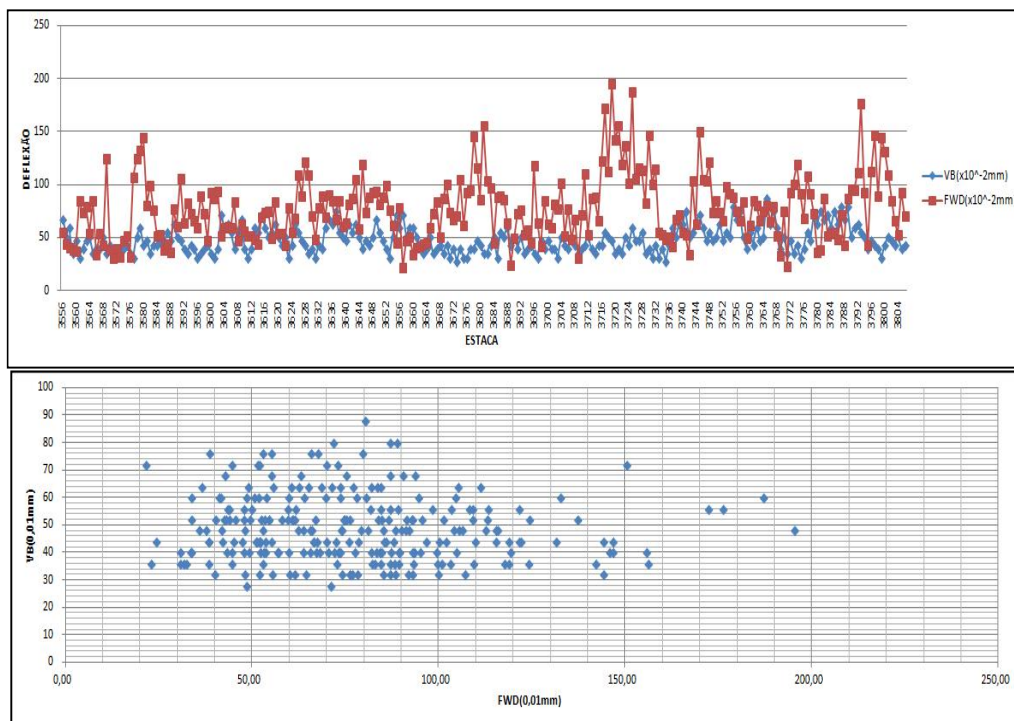
Fonte: o autor(2015)

Figura A.14 – Segmento homogêneo 14



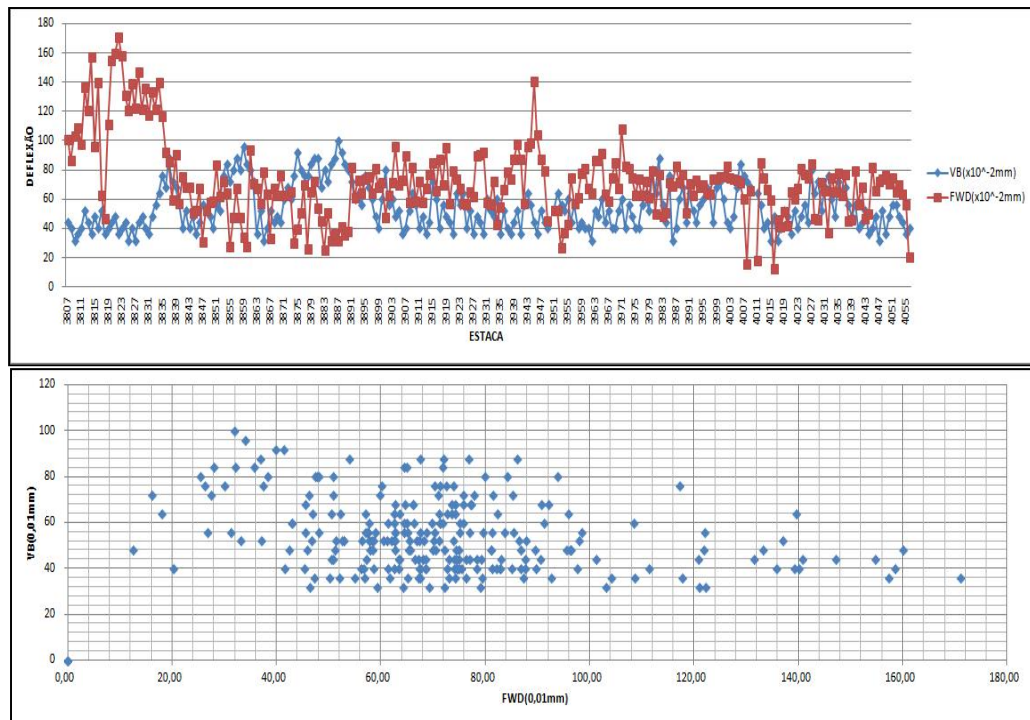
Fonte: o autor(2015)

Figura A.15 – Segmento homogêneo 15



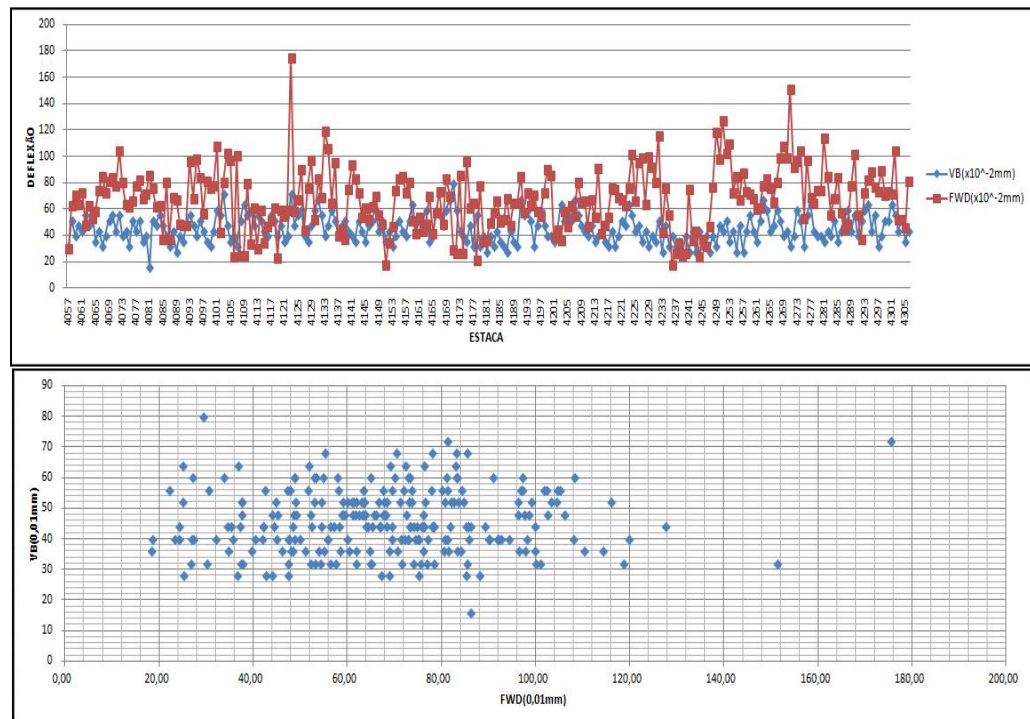
Fonte: o autor(2015)

Figura A.16 – Segmento homogêneo 16



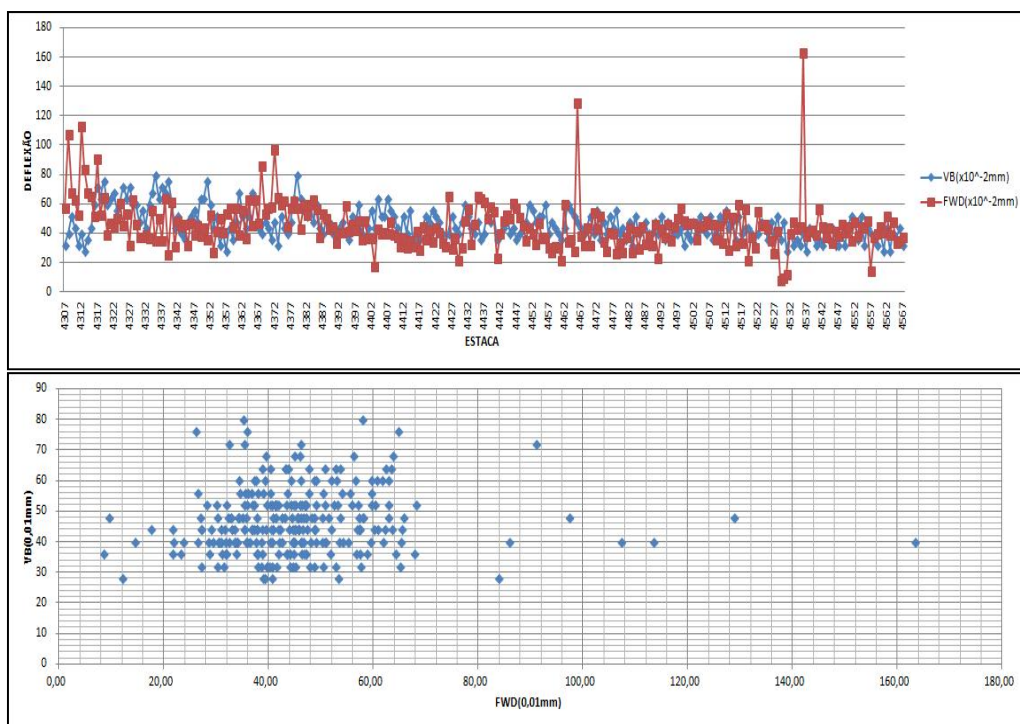
Fonte: o autor(2015)

Figura A.17 – Segmento homogêneo 17



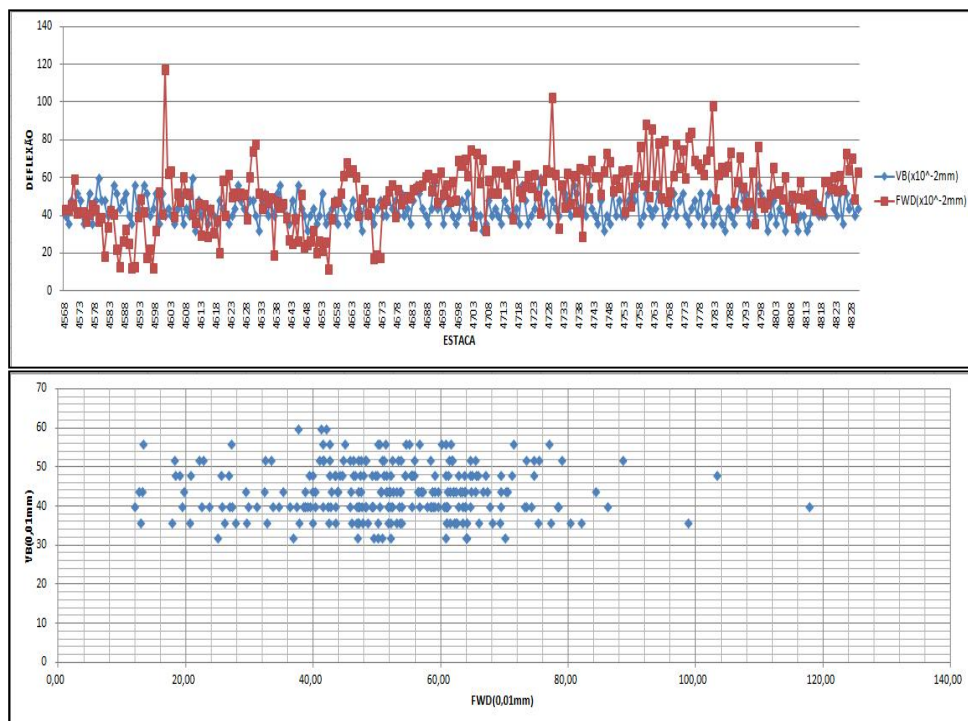
Fonte: o autor(2015)

Figura A.18 – Segmento homogêneo 18



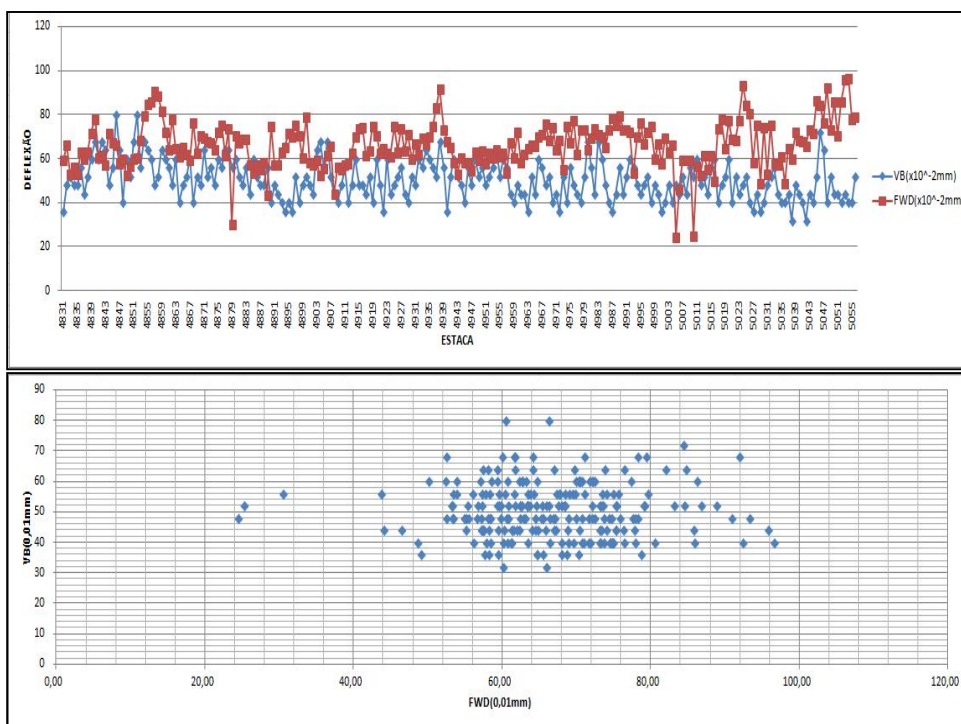
Fonte: o autor(2015)

Figura A.19 – Segmento homogêneo 19



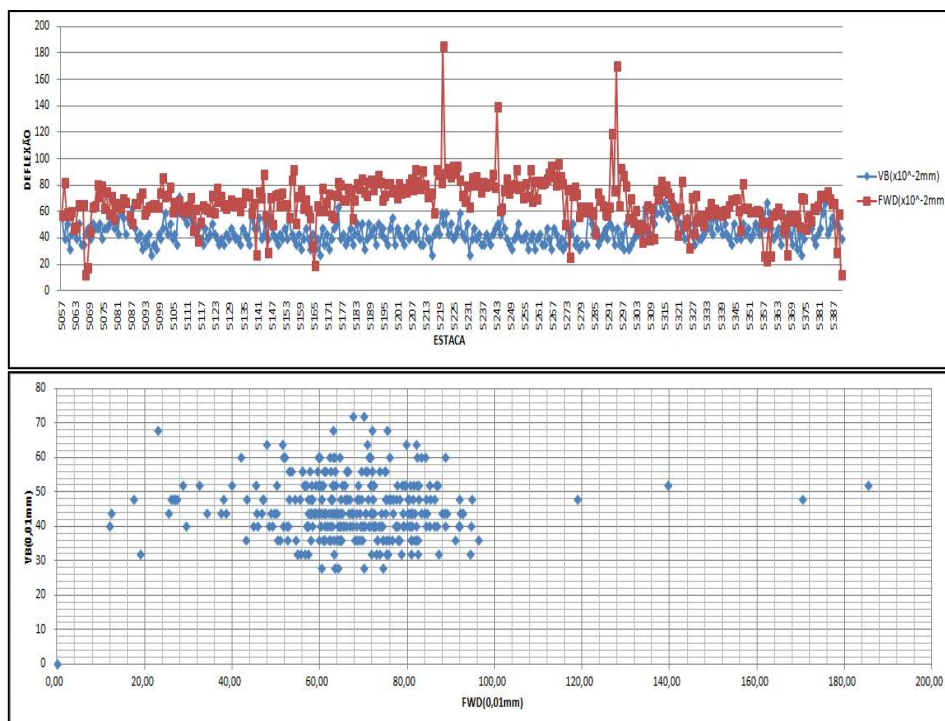
Fonte: o autor(2015)

Figura A.20 – Segmento homogêneo 20



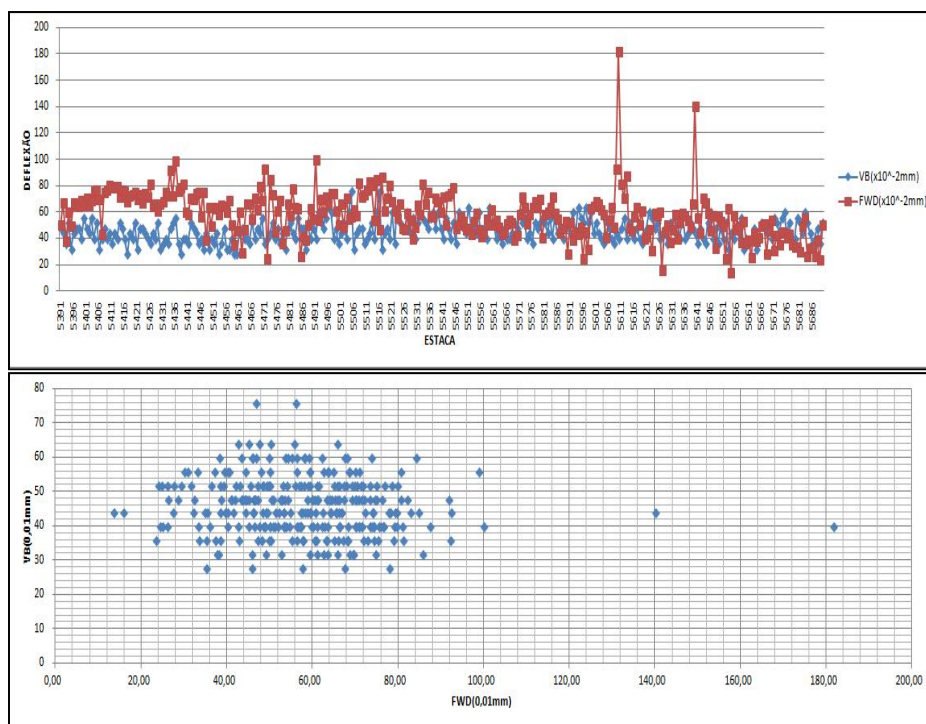
Fonte: o autor(2015)

Figura A.21 – Segmento homogêneo 21



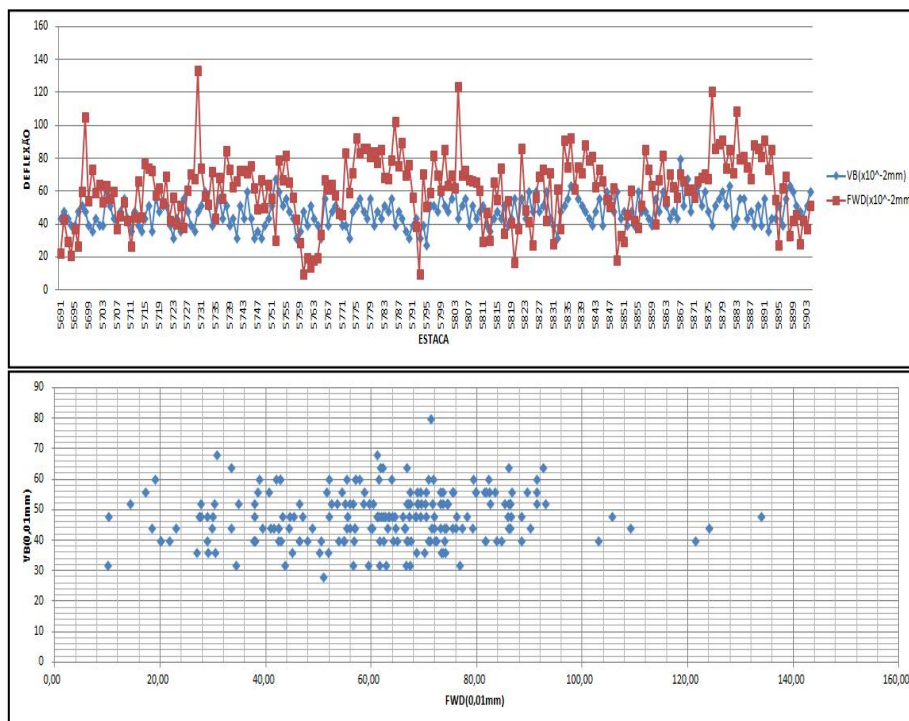
Fonte: o autor(2015)

Figura A.22 – Segmento homogêneo 22



Fonte: o autor(2015)

Figura A.23 – Segmento homogêneo 23



Fonte: o autor(2015)