

# ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MEDIDAS DE DEFLEXÃO COM VIGA BENKELMAN E DEFLECTÔMETRO DE PESO LEVE EM PAVIMENTOS URBANOS DA CIDADE DE JOINVILLE/SC

**Paulo Roberto Rodrigues**

**Edgar Odebrecht**

**Adriana Goulart dos Santos**

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC

## RESUMO

O presente trabalho busca obter correlações entre medidas de deflexões obtidas com a Viga Benkelman (VB) e com o *Light Falling Weight Deflectometer* (LFWD). Sabe-se que o ensaio da VB é mais lento e oneroso, enquanto o LFWD é muito mais rápido e barato. Assim, o objetivo principal desta pesquisa é obter uma correlação entre os dois métodos de ensaio, permitindo aos gestores públicos a elaboração de projetos de recuperação de pavimentos, fundamentados em dados estruturais do pavimento, como critério para a melhor aplicação de recursos financeiros. Para o presente trabalho foram eleitas duas vias urbanas do município de Joinville contemplando duas práticas locais correntes: a primeira, a execução de capa asfáltica sobre paralelepípedo e a segunda, a execução de capa asfáltica sobre um pacote convencional de camadas granulares. A pesquisa demonstrou que há uma boa correlação para a segunda situação, o que não é confirmado para capas asfálticas sobre paralelepípedos.

## ABSTRACT

The present work seeks to obtain correlations between measurements of deflections obtained with the Benkelman Beam (VB) and with the Light Falling Weight Deflectometer (LFWD). It is known that VB testing is slower and costly, while LFWD is much faster and cheaper. Thus, the main objective of this research is to obtain a correlation between the two test methods, allowing public managers to elaborate pavement recovery projects, based on structural data of the pavement, as a criterion for the best application of financial resources. For the present work, two urban roads of the city of Joinville were chosen, contemplating two current local practices: the first, the execution of asphalt layer on parallelepiped and the second, the execution of asphalt pavement on a conventional package of granular layers. The research showed that there is a good correlation for the second situation, which is not confirmed for asphaltic pavements on parallelepiped.

## 1. INTRODUÇÃO

A capacidade de carga é largamente utilizada pelos órgãos gestores das redes rodoviárias federais e estaduais nos seus sistemas de conserva e reabilitação, para aferir a qualidade estrutural de um pavimento rodoviário.

Bernucci *et al* (2008) afirmam que a avaliação estrutural está associada ao conceito de capacidade de carga. Os defeitos estruturais dos pavimentos resultam, especialmente, da repetição das cargas veiculares e vinculam-se às deformações elásticas ou recuperáveis e plásticas ou permanentes. As deformações elásticas são mensuradas por equipamentos chamados, genericamente, de deflectômetros. Estes equipamentos medem os deslocamentos verticais, denominados “deflexão” do pavimento. As deflexões são responsáveis pelo surgimento da maioria dos trincamentos ao longo da vida do pavimento cuja persistência pode levar à fadiga do revestimento.

O projeto e execução de pavimentos objetivam que o mesmo suporte as ações das cargas dos veículos, que provocam tensões verticais em toda a estrutura. A magnitude dessas tensões depende da espessura das camadas e do módulo de elasticidade dos materiais que compõem a estrutura. Embora a estrutura do pavimento seja projetada para resistir às solicitações de cargas dentro do período de projeto, esta estrutura sofre ruptura ou deformação excessiva

quando as tensões excedem a capacidade dos materiais a resistirem tais esforços.

As medidas de deflexões podem ser efetuadas por métodos não destrutivos, conhecidos na literatura internacional como *Nondestructive deflection Testing* – NDT. Os ensaios não destrutivos causam menos interferências no trânsito local que os métodos destrutivos, possibilitando assim maior facilidade para a avaliação estrutural do pavimento em qualquer período de sua vida de serviço, além de permitir que área avaliada seja analisada por mais de um método (Bernucci *et al.*, 2008).

Os ensaios não destrutivos permitem, através de equipamentos adequados, obter bacias de deflexão para um determinado ponto de ensaio do pavimento, quando sobre o mesmo incide uma carga pontual ou rolante. Os equipamentos que utilizam a carga pontual para a leitura das deformações, como o ensaio de placa, são registrados por deflectômetros que medem a deflexão resultante ao carregamento de uma carga estática sobre um determinado ponto da superfície do pavimento. Por outro lado, os ensaios realizados por carregamentos de carga rolante utilizam equipamentos que, através de uma carga aplicada pela passagem de um eixo padrão, permite o traçado da deformada do pavimento, relativo a um ponto fixo. Este tipo de ensaio apresenta a vantagem de induzir nos pavimentos ações semelhantes às do tráfego em termos da grandeza das cargas aplicadas (Francisco, 2012).

Dentre os equipamentos de avaliação não destrutiva pode-se citar a Viga Benkelman (VB), que é o teste de campo para avaliação de deformações em pavimentos mais familiar entre os engenheiros. Na década de 60 substituiu a prova de carga com placa circular, por ser um procedimento simples e mais ágil, cujo carregamento é feito com os próprios pneus de um caminhão carregado, ao invés da placa circular (Albernaz, 1997).

Entretanto, devido à logística e o tempo requerido na sua execução levaram os técnicos e pesquisadores da área de pavimentação à procura de soluções mais versáteis. Assim surgiu o equipamento Deflectômetro de Impacto Leve, ou como é conhecido na literatura anglo-saxônica, *Light Falling Weight Deflectometer* (LFWD). O LFWD é um equipamento portátil, desenvolvido na Alemanha no início dos anos 80, que avalia materiais pela sua deformação, quando submetidos a uma carga dinâmica (Elhakim *et al.*, 2014).

De acordo com Benedetto *et al.*, 2012, este equipamento surgiu como alternativa ao equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD) convencional, especialmente em situações onde se possam encontrar dificuldades de acesso aos pontos de ensaio, como em estradas ainda em construção. O LFWD é pouco difundido no Brasil, mas internacionalmente existem diferentes tipos e modelos portáteis para ensaios dinâmicos *in situ*, podendo-se citar como exemplos: Na Alemanha, o deflectômetro portátil de peso decrescente (PFWD), também amplamente utilizados no Oriente Médio, Japão, Europa e Estados Unidos (Nazzal, 2003). Cita-se ainda, a Placa Dinâmica Alemã (GDP), o TRRL Foundation Tester (TFT), o Prima 100 LFWD, e os PFWDs mais eficientes, como os dispositivos, Loadman, Inspector-2, e Zorn ZFG 2000 (Gros, 1993).

O LFWD tem sido utilizado especificamente para controle de qualidade das camadas do pavimento (subleito, sub-base e base), em pavimentos novos ou em obras já existentes. O equipamento não necessita de nenhuma medida de referência e fornece uma alternativa simples em comparação com os demais equipamentos até então utilizados, em especial o FWD (Nazaal, 2003).

Este trabalho mostra a viabilidade em se utilizar o LFWD em pavimentos urbanos de baixo volume de tráfego como método de diagnóstico da sua condição estrutural. Para isso, foram realizados um conjunto de ensaios não destrutivos com a Viga Benkelman e o LFWD em duas vias urbanas da cidade de Joinville-SC a fim de apresentar correlações entre as medidas de deflexão oriundas dos tipos de ensaios. As duas vias foram cuidadosamente escolhidas por melhor caracterizar a prática de construção do município de Joinville, que consta da execução de pavimentos constituídos de um pacote de camadas (subleito, sub-base, base e capa asfáltica) ou de uma capa asfáltica aplicada sobre uma camada de paralelepípedo.

## **2. MÉTODO**

O procedimento para investigação de campo proposto neste estudo, objetiva analisar a eficiência e operacionalidade do Deflectômetro de Impacto Leve (LFWD) para medição de deformações elásticas em pavimentos urbanos, como medida de avaliação estrutural de pavimentos.

Por esse motivo, foram efetuados levantamentos deflectométricos com a VB e com o LFWD em duas vias urbanas da cidade de Joinville-SC com composições estruturais distintas.

A metodologia aplicada contemplou para cada via, a execução de 5 pares de ensaios, usando a VB e o LFWD. As medidas de deflexão de ambos os equipamentos foram utilizadas para verificar a correlação entre as leituras de deformação. Outros 5 pares de ensaios foram também executados nas mesmas vias com vistas a testar a correlação obtida entre as medidas de deflexão.

### **2.1. Caracterização do Trecho Experimental**

O conjunto de vias urbanas da cidade de Joinville-SC, supervisionado pela Secretaria de Infraestrutura Urbana – SEINFRA, é constituído de ruas pavimentadas e não pavimentadas. Para a pesquisa, avaliaram-se, em campo, dois trechos de vias pavimentadas, em operação. Cada trecho de via, com 500 metros de extensão, foi subdividido em cinco estações de ensaios e distanciadas entre si de 50 metros.

Nestes trechos, realizaram-se, entre março e junho de 2018, levantamentos deflectométricos com a Viga Benkelman e com Deflectômetro de Impacto Leve. As medidas de deflexão foram realizadas na trilha de roda externa (bordo externo) das vias urbanas, sempre em alinhamento afastado de 90 cm da guia do passeio (meio-fio). Os resultados deste levantamento serviram para alimentar o Sistema de Gerência de Pavimentos do órgão.

A figura 1 mostra as duas vias urbanas onde foram realizados os levantamentos deflectométricos. Em comum, os pavimentos apresentam o mesmo tipo de material de camada final de rolamento, em concreto asfáltico usinado a quente (C.A.U.Q), e o subleito.



Trecho 1: "Recape"



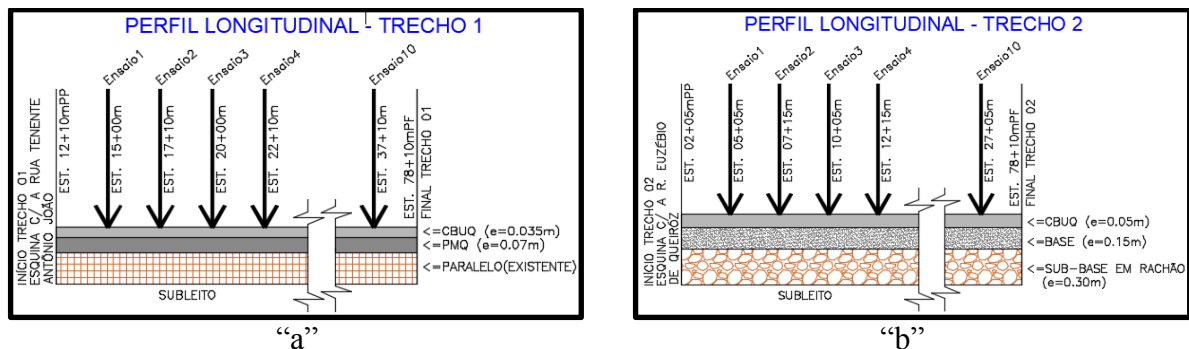
Trecho 2: "Pavimento Convencional"

**Figura 1:** Trechos experimentais avaliados

A via urbana designada como trecho 1 foi executada a partir de um recape sobre paralelepípedos, composto de duas camadas betuminosas, com misturas dosadas nas faixas granulométricas B e C, conforme as especificações ES 385 (DNER, 1999b) e ES 390 (DNER, 1999a). A primeira, de regularização, com espessura de 7cm de pré-misturado a quente (Faixa B), e a segunda de 3,5cm em concreto asfáltico usinado a quente (Faixa C), como mostra o perfil de projeto na figura 2a, perfazendo um total de 10,5cm de revestimento asfáltico e 13,5 cm de paralelepípedo.

Já a via urbana designada como trecho 2, foi executada com 5cm de concreto asfáltico usinado a quente, de faixa granulométrica C, sobre 15cm de base granular de brita estabilizada, e 30cm de sub-base de macadame seco (rachão). A figura 2b mostra o perfil longitudinal do trecho 2.

As estruturas de pavimento dos trechos avaliados estão esquematicamente apresentadas na figura 2a e 2b, assim como o estaqueamento das posições de leituras de deflexão.

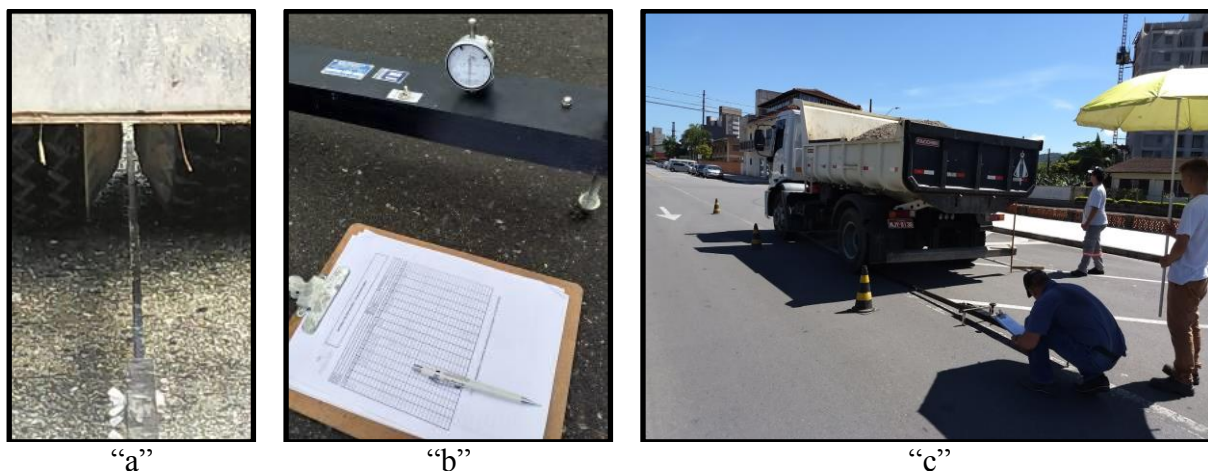


**Figura 2:** Representação esquemática dos pontos de ensaio

## 2.2 Ensaio com Viga Benkelman - VB

No Brasil, o levantamento deflectométrico com a Viga Benkelman deve seguir os procedimentos descritos no método DNIT 133/2010 – ME. Nessa padronização, é utilizado o pneu de um caminhão como carregamento, sendo ajustado o peso de 8,2 toneladas sobre o eixo traseiro, simples e de rodado duplo. Sob esse eixo, entre as rodas (figura 3a), apoia-se uma barra de alumínio, móvel, que toca a superfície, interligando-se a uma régua fixa, por

articulação. Na parte fixa é possível ler, através de um extensômetro, o deslocamento da barra de alumínio, quando o eixo (do caminhão) se afasta do ponto de início das leituras. Ocorre que a leitura observada no piso é o deslocamento vertical do mesmo durante o descarregamento. A viga Benkelman possui ainda um vibrador capaz de retirar da inércia a régua de alumínio evitando eventuais inibições do ponteiro do extensômetro. As figuras 3a, 3b e 3c mostram a execução de um levantamento com a VB.



**Figura 3:** Ensaio com a Viga Benkelman

Os métodos do DNIT (2010) determinam que as leituras sejam feitas com o caminhão parado sobre o ponto onde devem ser realizadas as leituras (*Creep Speed Rebound Deflection*) procedimento este, utilizado no presente estudo, enquanto que o AASHTO *Guide* (1993) indica que pode ser utilizado o modo de leitura em que o veículo passa com velocidade baixa sobre os pontos de análise (*Creep Speed Normal Deflection*).

O ensaio de Viga Benkelman é pontual e apresenta como desvantagens a baixa repetibilidade dos testes, ou seja, dispersão elevada das leituras; impossibilidade de assegurar que as bases de apoio da viga estejam fora da deformada; o sensor mede a deflexão estacionária, não infere sensibilidade do veículo em movimento e, morosidade do teste, já não compatível com a produtividade com as velocidades e exigências de tráfego atual (Borges, 2001).

Como vantagens da utilização da Viga Benkelman citam-se: facilidade de operação e necessidade de mão de obra pouco qualificada (Borges, 2001).

### **2.3 Deflectômetro de Impacto Leve – LFWD**

Trata-se de um ensaio dinâmico de carga com placa, e o princípio que procura imitar é o carregamento exercido por pneu sobre o pavimento, onde a força de impacto é gerada pela queda de uma massa sobre um sistema de amortecedores, transmitindo um impulso ao pavimento através de uma célula de carga (Lopes, 2010).

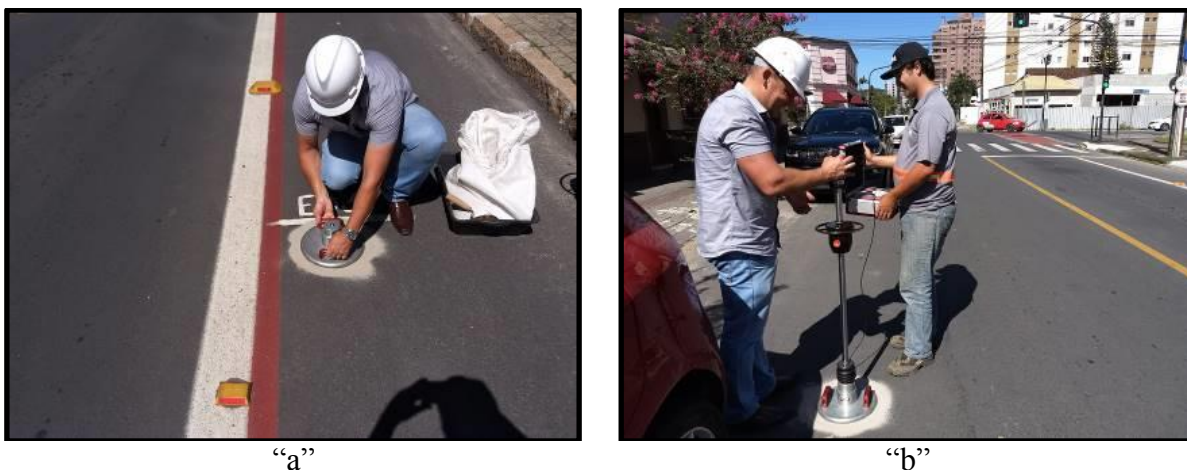
Esse impulso origina uma deflexão, medida por um geofone localizado no interior do cilindro do equipamento, o qual atua através de um furo no centro da placa de carga. A célula de carga e o geofone estão ligados a um dispositivo eletrônico (computador portátil), que registra automaticamente a deformação em milímetros (Machado, 2012).

Este ensaio pode ser utilizado na avaliação da capacidade de carga em pavimentos, e também

na determinação do módulo de deformabilidade de solos granulares com módulos entre os 15 e 70/80 MPa (Lopes, 2010).

A figura 4a e 4b demonstram a montagem e aplicação do LFWD no trecho experimental 2, onde posicionou-se a placa conforme prescrição normatizada. Por ensaio, realizaram-se seis quedas da massa, onde as três primeiras serviram de pré-compactação (assentamento da placa) e as outras três para registro da deformação. Estes três últimos registros são arquivados, sendo que o resultado do ensaio é obtido pelo valor médio das deformações. Todo o procedimento é padronização conforme a norma E2835-11 da ASTM (ASTM, 2011).

As especificações técnicas do LFWD utilizado na pesquisa, pertencem ao modelo HMP-LFG4, ano de fabricação 2014, com massa de queda de 10kg. A força de impacto informada pelo fabricante é de  $7070N \pm 70N$  e duração do mesmo igual a  $17ms \pm 1,5ms$  (milisegundos). A altura de queda da massa é de 720mm. O diâmetro da placa é de 300mm, com espessura de 20mm. O Peso da placa é de 15kg. Descreve ainda em seu manual que o intervalo de temperatura ambiente para a utilização do aparelho é de 0 - 40°C.



**Figura 4:** Ensaio de Deflectômetro de Impacto Leve (LFWD)

Tal como a viga Benkelman, os ensaios com o LFWD foram realizados em dois trechos de pistas, sendo medidos os mesmos pontos (distanciados de 50 metros) e a mesma temperatura ambiente.

### 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os valores de deflexões obtidos com os equipamentos VB e LFWD em cada um dos 2 trechos experimentais (trecho 1 e 2) estão apresentados na tabela 1. O intervalo de temperatura ambiente, registrados por ocasião dos ensaios de campo, foram de 21 a 25 °C para o trecho “1” e 21 a 27 °C para o trecho “2”.

**Tabela 1: Deflexões medidas e análises estatística das amostras**

VB - Trecho I		VB - Trecho II		LFWD - Trecho I		LFWD - Trecho II	
Ensaio	(x 10 <sup>-2</sup> mm)	Ensaio	(x 10 <sup>-2</sup> mm)	Ensaio	(x 10 <sup>-2</sup> mm)	Ensaio	(x 10 <sup>-2</sup> mm)
E01	65,12	E01	18,75	E01	28,10	E01	73,80
E02	56,77	E02	29,50	E02	18,60	E02	109,50
E03	39,26	E03	27,50	E03	21,90	E03	98,80
E04	52,57	E04	12,50	E04	19,20	E04	56,90
E05	78,29	E05	26,50	E05	26,50	E05	98,80

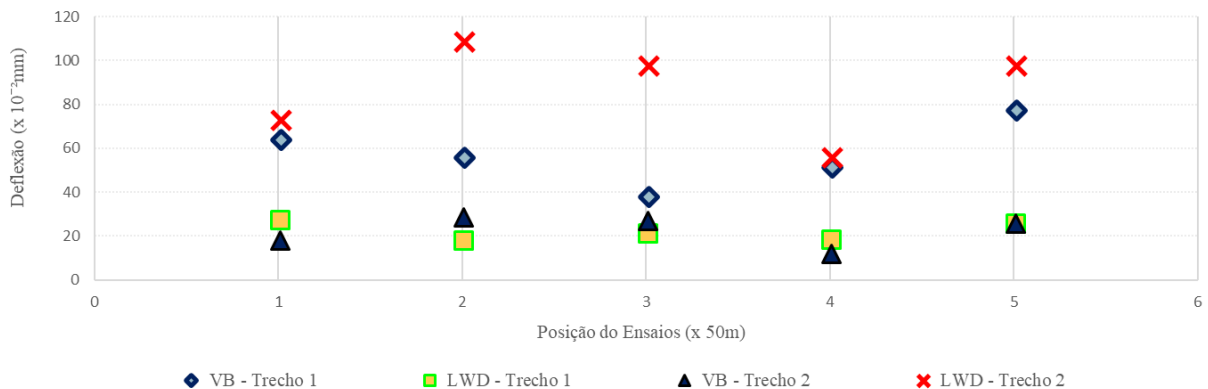
Deflexão da Viga Benkelman (x 10 <sup>-2</sup> mm)								Deflexão do LFWD (x 10 <sup>-2</sup> mm)							
Trecho	$\bar{x}$	$\sigma$	Dc	Máx	Mín	CV%	N	Trecho	$\bar{x}$	$\sigma$	Dc	Máx	Mín	CV%	N
I	58,40	14,52	72,93	78,29	39,26	24,9%	5	I	22,86	4,03	26,89	28,10	18,60	17,6%	5
II	22,95	6,72	29,67	29,50	12,50	29,3%	5	II	87,56	21,58	109,14	109,50	56,90	24,7%	5

Observando-se o coeficiente de variação (CV) ou desvio padrão relativo, verifica-se pequeno decréscimo dos valores medidos com LFWD, comparado com aqueles medidos com a VB, de 25% para 18% (trecho 1) e de 29% para 25% (trecho 2), o que caracteriza maior homogeneidade nas medidas efetuadas com o LFWD.

Da tabela 1 verifica-se que o maior e o menor valores de deflexão obtidos com a VB foram de  $12,50 \cdot 10^{-2}$ mm e  $78,29 \cdot 10^{-2}$ mm, respectivamente. Já os mesmos valores obtidos com LFWD foram de  $18,60 \cdot 10^{-2}$ mm e  $109 \cdot 10^{-2}$ mm, respectivamente.

Os valores de deflexão médios ( $\bar{x}$ ) obtidos nos dois segmentos de pista variaram de 26,50 a  $56,77 \cdot 10^{-2}$ mm e de 21,90 a  $98,80 \cdot 10^{-2}$ mm, com o emprego da VB e LFWD, respectivamente. Nota-se que o limite inferior das medidas é parecido para os dois equipamentos, porém, considerando-se o limite superior, as deflexões obtidas com o emprego do LFWD apresentaram valores maiores que as deflexões obtidas com a VB, no trecho 2, e menores no trecho 1.

Verifica-se que os valores de deflexão obtidos com o LFWD para o trecho 1 são menores que as medidas obtidas com a viga Benkelman, em todas as leituras. Ocorre que para o trecho experimental 2, há a inversão desse resultado como pode ser verificado no gráfico da figura 5.



**Figura 5: Valores das deflexões nos trechos experimentais 1 e 2**

A deflexão média obtida com o levantamento realizado com a viga é cerca de 260% maior que a deflexão média obtida com o LFWD para o trecho experimental 1, e cerca de 370%

menor para o trecho 2.

Para a interpretação dos resultados do ensaio de VB, devem-se levar em consideração que as deflexões são medidas em fase de descarregamento, enquanto no LFWD as medidas são tomadas em fase de carregamento. PESSOA (2012) verificou em seu estudo que, em fase de descarregamento, as deflexões são maiores com a VB do que as verificadas em fase de carga, quando usado o equipamento FWD (Falling Weight Deflectometer).

O resultado de qualquer tipo de ensaio é uma resposta direta do tipo de solitação aplicado e da condição ou estrutura do pavimento ensaiado. RODRIGUES (1995) ressalva que a baixa velocidade de aplicação do carregamento tem influência acentuada na resposta visco-elástica da camada asfáltica, especialmente no tocante a deformações residuais. O Trecho 1 – (Figura 2 “a”) trata-se de um pavimento de concreto asfáltico aplicado sobre pavimento antigo constituído de paralelepípedos com espessura total de, aproximadamente, 25cm. Esta solução, geralmente executada sem projeto estrutural, é prática corrente na melhoria dos pavimentos urbanos no município de Joinville, onde o paralelepípedo é assente sobre um subleito pobre, adensado pelo tráfego de veículos ao longo de anos. Provavelmente, é esse o efeito que conduz a valores mais significativos dos deslocamentos verificados com a VB no trecho 1, nos pontos de aplicação da carga máxima ( $D_0$ ).

Inversamente, no trecho 2, que trata de um pavimento devidamente projetado (Figura 2 “b”), constituído por 3 camadas, totalizando 50cm de espessura total, as deflexões foram maiores para o LFWD. Nesse aspecto, enquanto com a VB a carga é aplicada através de duas rodas do eixo padrão de 8,2t, onde as leituras das deflexões são realizadas em um eixo imaginário que passa entre as duas rodas, no LFWD a carga é aplicada por uma placa circular de diâmetro maior que o das rodas do eixo padrão, sendo as leituras realizadas em um eixo imaginário que passa pelo ponto de aplicação da carga. Isto conduz a deflexões maiores no ensaio de LFWD do que no da VB.

### 3.1. Análise de Regressão entre valores de deflexão da VB e LFWD

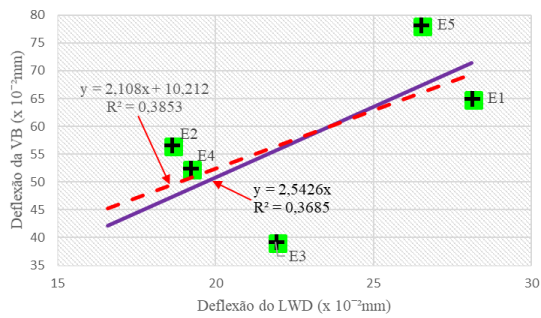
Para a determinação das correlações entre medidas de deflexão entre LFWD e VB, foi utilizada uma regressão linear, sendo considerado no eixo das abcissas, os valores de deflexão do LFWD, e no eixo das ordenadas, os valores de deflexão da VB. Com o objetivo de descrever a melhor relação entre os valores de deflexão foram consideradas as equações de regressão linear com e sem o coeficiente linear (intercepto). Analisando os valores de  $R^2$ , apresentados na tabela 2, obtidos a partir da aplicação das duas equações, pode-se verificar que a melhor correlação foi entre os valores de deflexão medidos no trecho 2.

**Tabela 2:** Tipos de regressão utilizados e coeficiente de determinação

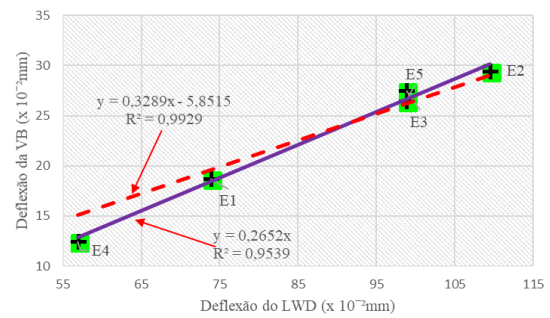
Estrutura	LINEAR ( $D_{VB} = a \cdot D_{LWD} + b$ )			LINEAR ( $D_{VB} = \alpha \cdot D_{LWD}$ )	
	a	b	$R^2$	$\alpha$	$R^2$
Trecho “1”	2,108	10,212	0,3853	2,5426	0,3685
Trecho “2”	- 5,8515	0,3289	0,9929	0,2652	0,9539

Na figura 6 estão representados, na forma gráfica, os valores de deflexão obtidos para cada um dos cinco pontos medidos nas duas estruturas de pavimentos analisadas e, ainda, a reta obtida pela regressão linear, tipo  $D_{VB} = \alpha D_{FLWD}$ .





Trecho "1"



Trecho "2"

**Figura 6: Correlação LFWD x VIGA**

Pode-se observar que há uma boa correlação entre os valores de VB e LFWD para o trecho 02, o que já não ocorre para o trecho 01. Este fato ocorreu devido a falta de homogeneidade das camadas abaixo da capa asfáltica (trecho 01), onde encontramos, o estrato de regularização em PMQ, e a antiga pavimentação em blocos de pedra. Essa composição, induz a um elevado grau de dispersão nos resultados de deflexão. A camada de PMQ, e o fendilhamento (fuga) entre os prismas (paralelepípedos) pode ser claramente observada na figura 7.



"a"



"b"

**Figura 7: Janela de investigação no trecho 1**

### 3.2 Validação das correlações entre medidas de deflexão de VB e LFWD

Considerando-se os dados obtidos da tabela 2, no que diz respeito às correlações para cada tipo de estrutura com o emprego da VB e do LFWD, estimaram-se os valores de deflexão da VB a partir daqueles valores medidos com o LFWD, para 5 ensaios auxiliares realizados no trecho 2. Na tabela 3 estão apresentados os dados deflectométricos levantados em campo e aqueles estimados pela correlação obtida para o trecho "2".

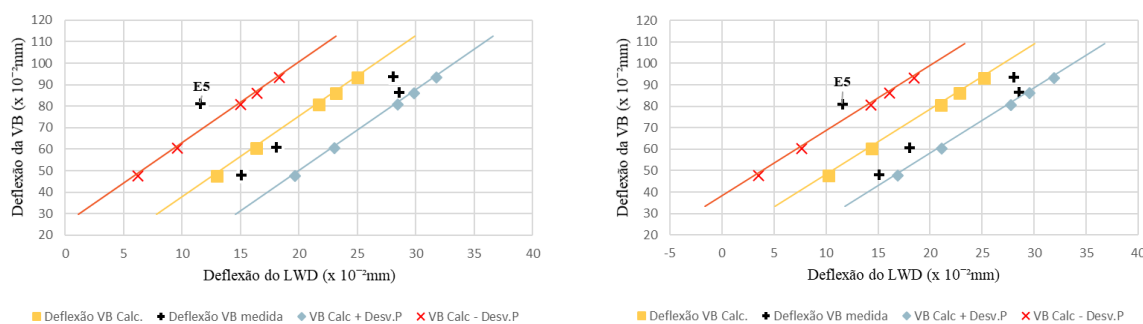
**Tabela 3: Valores deflectométricos obtidos em campo e por correlação para o trecho 2**

Ensaio auxiliares Trecho 2	Deflexão (x0,01mm) Levantamento de Campo		Deflexão (x0,01mm) obtida pelo modelo de correlação deste estudo, considerando os dados de LFWD, para o trecho 2	
	VB	LFWD	$D_{VB} = a \cdot D_{LFWD} + b$	$D_{VB} = \alpha \cdot D_{LFWD}$
1a	18,00	61,1	14,24	16,20
2a	15,00	48,4	10,07	12,84
3a	28,00	93,9	25,03	24,90

4a	28,50	86,8	22,70	23,02
5a	11,50	81,4	20,92	21,59

Resulta que com exceção do ensaio auxiliar “5a”, os valores obtidos por correlação a partir das deflexões do LFDW medidos, em campo, são bastante próximos aos auferidos com a VB, para os mesmos locais de ensaio. A interpretação desses valores, induz a um resultado conservador, com deflexões calculadas sempre abaixo da linha de valores medidos em campo com a VB. Essa menor proporção deve ser objeto de estudo com outros dispositivos de teste não-destrutivos para o projeto e conservação de pavimentos.

A plotagem dos valores de deflexão para a VB, medidos em campo, bem como os valores de deflexão calculados a partir das equações de regressão estão apresentados na figura 8. Foi considerado o intervalo do desvio padrão de  $[-\sigma, +\sigma]$ , obtido estatisticamente, para comprovação do exposto. Pela figura 8 observa-se que somente o ponto de ensaio 5a ficou fora do intervalo.



$$D_{VB} = \alpha \cdot D_{LFDW}$$

$$D_{VB} = a \cdot D_{LFDW} + b$$

**Figura 8:** Plotagem dos valores medidos em campo e obtidos por correlação

Até o momento para este estudo, a relação entre as deflexões medidas nos ensaios de VB e LFDW, é função dos materiais que compõem a estrutura do pavimento, não levando em termos, as condições de sua conservação. Assim, a disparidade dos valores de deflexão colhidos nos trechos 1 e 2, ratifica que as correlações obtidas não podem ser extrapoladas para a utilização em pavimentos que não se enquadrem dentro do universo do banco de dados gerado.

Para a composição de capa asfáltica assente sobre paralelepípedos, a leitura de deformações com o LFDW mostrou-se desaconselhável, exigindo por ora, ampliação da pesquisa em um número maior de dados.

#### 4. CONCLUSÕES

A partir das análises efetuadas, pode-se concluir que:

Para os ensaios realizados sobre o trecho 2 experimental de pista, verifica-se que há correlação para a deformação elástica do pavimento obtido com Viga Benkelman e com o LFDW, mesmo ocorrendo variação no registro dessas deformações ao longo das estações de ensaio, com perfis de características semelhantes.

Essa correlação é forte ( $R^2 = 0,95$ ), para trecho pavimentado com estrutura convencional

(trecho 2), composta de sub-base, base e capa betuminosa, quando realizada a associação linear das deformações, observados pelas duas equações de regressão. Porém, não é única e depende da estrutura do pavimento. Para estrutura de pavimento constituído de camada asfáltica assente sobre paralelepípedo (Trecho “1”) a correlação é fraca ( $R^2 = 0,37$ ) resultado da disparidade de medidas de deformação (Tabela 2 e figura 6).

Em decorrência dos resultados obtidos, notadamente a correlação entre a medida de deformação pelos métodos de carregamento estudados, é possível recomendar a adoção de ilhas de investigação em alguns pontos distintos de uma via em avaliação estrutural. Nessas regiões, a partir dos resultados obtidos com VB e LFWD obter-se-á correlação que valida o emprego do LFWD como dispositivo para análise de deformações. Esta proposta metodológica irá permitir a avaliação estrutural de pavimentos urbanos com custo e prazo reduzido.

Projetos de reabilitação de pavimentos urbanos podem assim serem executados de forma mais criteriosa, fundamentados em medidas de deformação, permitindo além da execução de projetos mais econômicos a justificativa técnica do investimento por parte dos órgãos públicos.

Esse estudo contribui para o aprimoramento de projetos de reforço e conservação de pavimentos estabelecendo metodologia que possa comparar perfis de pavimento, com reduzido tempo de laboratório. Práticas de manutenção e construção viárias inovadoras podem significar benefício econômico em termos de maior vida útil do pavimento.

Indica-se o modelo de correlação obtido neste trabalho para emprego em situações em que não se tenha disponibilidade de um modelo próprio. O modelo foi obtido para estrutura de pavimento flexível, com revestimento de C.A.U.Q. com espessura de 5,0 cm e camadas granulares, com espessuras de 15,0 e 30cm.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERNAZ, C. A. V. (1997) Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão. Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ.
- AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington.
- BENEDETTO, A; TOSTI, F.; DI DOMENICO, L. (2012) Elliptic model for prediction of deflections induced by a Light Falling Weight Deflectometer. *Journal of Terramechanics*, v. 49, n. 1, p. 1-12.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* (2008) Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Ed. Gráfica Imprinta, 504 p.
- BORGES, C. B. S. (2001) Estudo comparativo entre medidas de deflexão com Viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina, Dissertação (Mestrado), 197 f, Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/79447/188421.pdf>. >
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. *Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero* - ES 385. Rio de Janeiro, 1999.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. *Pavimentação – Pré-misturado a frio com emulsão modificada com polímero* - ES 390. Rio de Janeiro, 1999.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e de Transporte. *Pavimentação Asfáltica - Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman 133/2010 – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro, 2010.
- ELHAKIM, A. F.; ELBAZ, K; AMER, M. I. (2014) The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction. *HBRC Journal*, v. 10, n. 3, p. 298-307.
- FRANCISCO, A. (2012) Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão.

- GONTIJO, P. R. A.; GUIMARÃES, F. H. R.; NOGUEIRA, C. L. (1994) Metodologias brasileiras para avaliações das características funcionais e estruturais de pavimentos rodoviários - Estado da arte. Reunião Anual de Pavimentação, v. 28.
- GROS, C. (1994). Use of a Portable Falling Weight Deflectometer;" Loadman". University of Oulu, Publication of Road and Transport Laboratory 20,Oulu, Finland.
- LOPES, J. (2010) Contributo para o estudo da utilização do deflectómetro de impacto ligeiro. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil pelo Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- MACHADO, A. B. A. *et al.* (2012) Contribuição para a avaliação estrutural de infraestruturas rodoviárias por métodos não destrutivos. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (1997) Mecânica dos pavimentos. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, v. 23.
- NAZZAL, M. D. (2007) Field evaluation of in-situ test technology for Q (C)/Q (A) during construction of pavement layers and embankments. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College. Disponível: [https://digitalcommons.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2001&context=gradschool\\_theses](https://digitalcommons.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2001&context=gradschool_theses)
- STANDARD, A. S. T. M. E2835-11.(2011).“. *Standard test method for measuring deflections using a portable impulse plate load test device*, USA.
- PESSOA, F. H. C. (2012) Avaliações funcional e estrutural de trechos de rodovias no Distrito Federal construídos com diferentes materiais.
- ROCHA, N. R.; RODRIGUES, R. M. (1998) Estudo de Correlação entre as Medidas com a Viga Benkelman e com o Falling Weight Deflectometer. 31º Reunião Anual de Pavimentação. São Paulo/SP, v. 2, p. 741-750.

---

Paulo Roberto Rodrigues (paulo.rodrigues@joinville.gov.br)

Edgar Odebrecht (edgar@geoforma.com.br)

Adriana Goulart dos Santos (adriana.santos@udesc.br)

Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina - Rua Paulo Malschitzki, 200 - Campus Univ. Prof. Avelino Marcante - Zona Ind. Norte – Joinville/SC – Brasil.