



Investigação Geotécnica de Pavimentos Urbanos com o Deflectômetro de Peso Leve

Paulo Roberto Rodrigues

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Joinville, Brasil, pauloxlt@gmail.com

Edgar Odebrecht

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Joinville, Brasil, edgar@geoforma.com.br

Adriana Goulart dos Santos

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Joinville, Brasil, adriana.santos@udesc.br

RESUMO: O presente trabalho busca obter correlações entre medidas de deflexões obtidas com a Viga Benkelman (VB) e ensaio de carga com placa, com o Light Falling Weight Deflectometer (LFWD). Sabe-se que os ensaios da VB e da placa são mais lentos e onerosos, 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 dupla camada asfáltica (ligação mais rolamento) e a segunda, a execução de pavimento asfáltico com camada única, 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 pavimentos asfálticos de camada dupla.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação Estrutural, Deflectômetro de Impacto Leve, Pavimentos urbanos.

1 INTRODUÇÃO

A capacidade de carga é largamente utilizada pelos órgãos gestores das redes rodoviárias federais e estaduais nos seus sistemas de conservação 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. Estes tipos de ensaio apresentam a vantagem de induzir nos pavimentos ações semelhantes às do tráfego em termos da grandeza das cargas aplicadas (Francisco, 2012).

São vários os instrumentos que podem ser utilizados na avaliação estrutural não destrutiva de pavimentos. Nas últimas décadas houve uma relevante evolução tanto nos dispositivos de leitura das deflexões quanto no modo como o carregamento é aplicado ao pavimento (ALBERNAZ, 1997).

Como um dos primeiros equipamentos de avaliação não destrutiva tem-se o ensaio de carga com placa, que apesar de originalmente ser aplicado à caracterização de solos (BORGES,

2001), foi utilizado na pavimentação asfáltica em 1948, com o objetivo de verificar o desempenho das pistas dos aeroportos de Sarnia e Ottawa, no Canadá.

Outro equipamento de avaliação não destrutiva é a Viga Benkelman (VB), que seguramente 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, 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).

Devido à logística e o tempo requerido na execução do ensaio de viga, técnicos e pesquisadores da área de pavimentação apresentaram 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).

O presente 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 o ensaio de carga com placa, 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 betuminosa existente.

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.

Assim, foram efetuados levantamentos deflectométricos com o ensaio de carga com placa, VB e com o LFWD em duas vias urbanas da cidade de Joinville-SC com composições estruturais distintas.

A metodologia aplicada contemplou, a execução de 18 estações de ensaios, usando o ensaio de

carga com placa, a VB e o LFWD. As medidas de deflexão em cada estação, a partir desses equipamentos foram utilizadas para verificar a correlação entre as leituras de deformação. Adicionalmente, outras 10 estações de ensaios foram também executadas em uma das vias, em bordo oposto, 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 dez estações de ensaios e distanciadas entre si de 50 metros.

Nestes trechos, realizaram-se, entre março e junho de 2018, levantamentos deflectométricos com o ensaio de carga com placa, 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 e 2 mostram 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.



Figura 1 - Trecho 1: Av. Santos Dumont (via principal)



Figura 2 - Trecho 2: Rua São Borja (via local)

A via urbana designada como trecho 1 possui projeto e foi executada sob controle tecnológico semelhante a pistas rodoviárias interurbanas. Apresenta camada de reforço em pedra pulmão ($h_{ref}=0,30m$), com fechamento em brita. Camada de sub-base em macadame seco (rachão) ($h_{SB}=0,20m$), base em brita estabilizada granulometricamente ($h_B=0,15m$), e revestimento de concreto asfáltico constituído de duas camadas (ligação e revestimento) de 5cm cada. Este segmento foi dividido em dois subtrechos para que a investigação cobrisse duas diferentes condições de subleito. É destinada ao trânsito que alimenta as vias principais e apresenta 6 meses de liberação ao tráfego.

O perfil típico desse pavimento é apresentado na figura 3

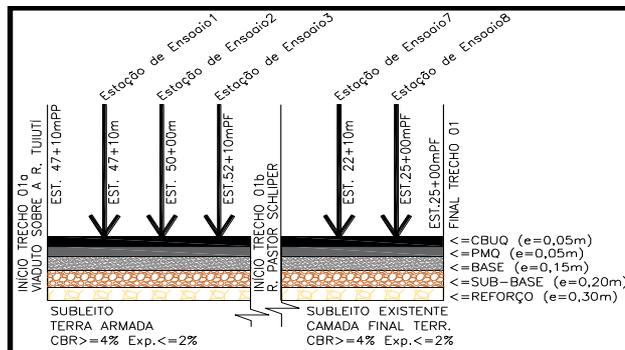


Figura 3. Perfil típico do pavimentos no trecho 1

No trecho designado como 2, a via cumpre dar vazão à trânsito local. Não possui semáforos e as edificações ocupam a sua área de abrangência. O pavimento é constituído por camada de sub-base em saibro bruto ($h_{SB}=0,38m$), base em brita graduada ($h_B=0,15m$) e revestimento asfáltico em CAUQ ($H_R =0,05m$). A pista encontra-se livre ao trânsito a mais de 20 anos. O perfil desse trecho é demonstrado na figura 4.

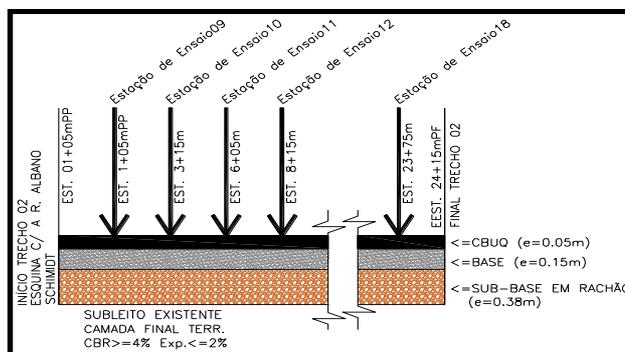


Figura 4. Perfil típico do pavimentos no trecho 2

2.2 Ensaio de Carga com Placa

Neste ensaio, as medidas de deflexão são obtidas mediante a aplicação de cargas sucessivas sobre uma placa circular como mostra a figura 5, de raio conhecido, e na consequente medição das respectivas deformações recuperáveis ou elásticas do pavimento. O procedimento segue a norma alemã DIN 18134 (2001) que estabelece aplicação de dois ciclos de carregamento sucessivos (princípio de carga-descarga).



Figura 5. Execução do ensaio de carga com placa.

A leitura da deformação do pavimento é registrada no relógio comparador de uma Viga Benkelman, acoplada à base da placa, como ilustrado na figura 6.



Figura 6. Placa com Viga Benkelman acoplada.

A força aplicada à placa exerce sobre a plataforma uma pressão média de $4,2 \text{ kg/cm}^2$ ao final do segundo ciclo de carregamento. Pressão essa um pouco inferior à exercida pelo pneu do caminhão no ensaio de viga, ou seja, $5,6 \text{ kg/cm}^2$. Todavia, este valor é considerado como correspondente e próximo a uma situação real de carregamento, visto que o ponto de aplicação é único.

Após a aplicação do último estágio de carregamento determina-se, a deformação total da placa $Z_{m\acute{a}x}$

2.3 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 4a), 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. A figura 7 mostra a execução do ensaio com a VB.



Figura 7. 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. Já a especificação do AASHTO Guide (1993), indica 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 desvantagem a baixa repetibilidade dos testes, ou seja, dispersão elevada das leituras. Outra inconveniência, é a 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).

2.4 Deflectômetro de Impacto Leve – LFWD

O 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 8 demonstra 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 $17ms \pm 1,5ms$ (milissegundos). 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 8. 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.

ENSAIO	Deflexão (x 10 ⁻² mm) - TRECHO 1		
	PLACA	VB	LFWD
E-01	97,43	10,50	38,80
E-02	105,81	24,00	54,00
E-03	68,10	20,00	38,80
E-04	67,05	9,00	56,10
E-05	33,53	12,00	57,60
E-06	36,67	12,00	63,30
E-07	36,67	10,50	63,30
E-08	55,53	12,00	80,90
\bar{x}	62,60	13,75	56,60
σ	27,70	5,30	13,74
De	90,30	19,05	70,34
Máx	105,81	24,00	80,90
Mín	33,53	9,00	38,80
CV%	44%	39%	24%
N	8,00	8,00	8,00

ENSAIO	Deflexão (x 10 ⁻² mm) - TRECHO 2		
	PLACA	VB	LFWD
E-09	81,72	31,50	18,60
E-10	88,00	32,00	23,80
E-11	95,34	46,00	31,00
E-12	86,96	32,50	25,10
E-13	49,24	25,50	22,30
E-14	60,76	28,50	23,10
E-15	64,95	31,50	23,90
E-16	94,29	41,50	28,90
E-17	104,77	54,00	41,20
E-18	113,15	45,50	38,20
\bar{x}	83,92	36,85	27,61
σ	20,15	9,26	7,26
De	104,07	46,11	34,87
Máx	113,15	54,00	41,20
Mín	49,24	25,50	18,60
CV%	24%	25%	26%
N	10,00	10,00	10,00

Da Tabela 1 verifica-se que o maior e o menor valor de deflexão obtidos com o ensaio de placa e a VB foram de $113,15 \cdot 10^{-2} \text{mm}$ a $33,53 \cdot 10^{-2} \text{mm}$ e $54 \cdot 10^{-2} \text{mm}$ e a $9 \cdot 10^{-2} \text{mm}$ respectivamente. Já os mesmos valores obtidos com LFWD foram de $80,90 \cdot 10^{-2} \text{mm}$ e $18,60 \cdot 10^{-2} \text{mm}$ respectivamente.

Os valores de deflexão médios (\bar{x}) obtidos nos dois segmentos de pista variaram de 62,60 a 83,92 10^{-2}mm , de 13,75 a 36,85 10^{-2}mm e 27,61 a 56,60 10^{-2}mm , com o emprego da placa, VB e LFWD, respectivamente. Nota-se que o limite superior das medidas, com exceção do ensaio de placa, é praticamente o dobro do limite inferior. Verifica-se que os valores de deflexão obtidos com o LFWD para os trechos experimentais, são menores que as medidas obtidas com o ensaio de carga com placa. A exceção ocorreu nas estações de ensaio E-01, E-02, E-03, onde o subleito era em terra armada.

Na comparação com a VB, o LFWD apresenta valores de deflexão sempre superiores no trecho experimental 1 e para o trecho experimental 2, há a inversão desse resultado, como também pode ser verificado no gráfico da Figura 9.

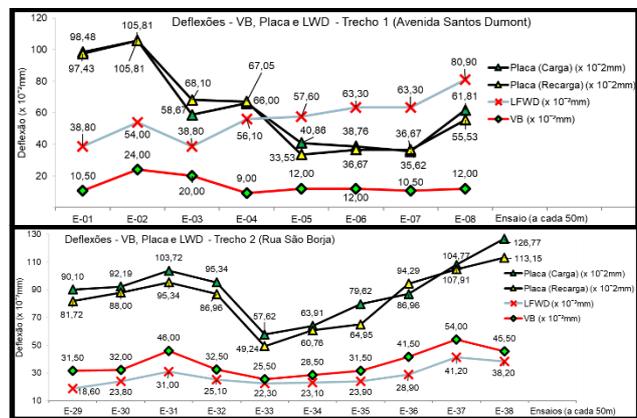


Figura 9. Valores de deflexão para os trechos 1 e 2

Para a interpretação dos resultados do ensaio de VB, deve-se levar em consideração que as deflexões são medidas em fase de descarregamento, enquanto nos ensaios de placa e de 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 solicitação 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) trata-se de um pavimento de concreto asfáltico com espessura de 10 cm, aplicado sobre fundação constituída de material granular, totalizando 75 cm. Esta solução, geralmente executada com controle tecnológico, é prática corrente na melhoria dos pavimentos urbanos no município de Joinville, onde haja justificativa de



tráfego (Via principal) e tempo de operação. Provavelmente, é esse o efeito que conduz a valores mais significativos dos deslocamentos verificados com a placa e com o LFWD no trecho 1, nos pontos de aplicação da carga máxima ($D_{m\acute{a}x}$), se comparados a deflexão medida com a viga Benkelman.

Inversamente, no trecho 2, que trata de pavimento (Figura 3) constituído por camada de concreto asfáltico delgado, com espessura de 5 cm assente sobre base granular de 2 camadas totalizando 50cm de espessura total, as deflexões foram maiores para o LFWD. Nesse aspecto, enquanto na viga Benkelman 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 LFWD do que na Viga Benkelman.

3.1 Relação entre valores de deflexão da VB, placa e LFWD, e análise

Para a verificação das correlações entre medidas de deflexão da VB e LFWD e da placa e LFWD, foi utilizada a regressão linear, sendo plotado no eixo das abcissas, os valores de deflexão do LFWD, e no eixo das ordenadas, os valores de deflexão da VB e da placa. O melhor relacionamento das variáveis foi determinado a partir do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (ρ).

Na prática, o coeficiente (ρ) é interpretado como um indicador que descreve a interdependência entre as variáveis X e Y na forma: $y = a \cdot (x) + b$, onde a e b são constantes (LIRA, 2004).

Os valores de correlação de Pearson (ρ), são apresentados na Tabela 2, e foram obtidos a partir da aplicação da correlação linear. Pôde-se verificar que as melhores correspondências

ocorreram entre os valores de deflexão medidos no trecho 2 (via com um pacote convencional – concreto asfáltico sobre base granular), para viga Benkelman e o LFWD.

Ainda, de maneira a qualificar os resultados, CALLEGARI e JACQUES (2003) sugerem que o coeficiente de correlação pode ser avaliado como “Fraco” se $0,00 < \rho < 0,30$; “Moderado”; se $0,30 < \rho < 0,60$; “Forte” se $0,60 < \rho < 0,90$; e “Muito forte” se $0,90 < \rho < 1,00$.

Tabela 2. Correlações válidas para este estudo

Trecho	Equip.	Correlação x Espessura do revestimento	Força da correlação
(1) - Av. Stos. Dumont	VB	$D_{VB} = 0,5757 \cdot D_{LFWD} + 7,0855$ (para $h_r = 10\text{cm}$)	$\rho = 0,73$ (Forte)
(1) - Av. Stos. Dumont	Placa	$D_{PL} = 2,9775 \cdot D_{LFWD} + 16,936$ (para $h_r = 10\text{cm}$)	$\rho = 0,67$ (Forte)
(2) - Rua São Borja	VB	$D_{VB} = 1,1745 \cdot D_{LFWD} + 4,4213$ (para $h_r = 5\text{cm}$)	$\rho = 0,92$ (Muito forte)
(2) - Rua São Borja	Placa	$D_{PL} = 2,1095 \cdot D_{LFWD} + 25,675$ (para $h_r = 5\text{cm}$)	$\rho = 0,76$ (Forte)

Apesar de que há forte correlação do LFWD tanto para valores de VB como de placa para o trecho 01 ($h_{rev} = 10\text{ cm}$), esta composição retrata somente o trecho que contém o subleito em terra armada. A partir do ensaio E-04 (figura 8) há uma inversão dos valores de deflexão entre a placa e o LFWD. Essa irregularidade, denota a influência do subleito nos resultados de carregamento dinâmico (LFWD).

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 10 ensaios auxiliares realizados no trecho 2 (Rua São Borja). 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 auxiliar no trecho 2	Levant. de Campo (x 0,01mm)		correlação deste estudo (x 0,01mm)	
	VB	LFWD	$D_{VB} = a \cdot D_{LFWD} + b$	$D_{VB} = a D_{LFWD}$
E-09a	28	48	61	63
E-10a	30	27	36	36
E-11a	28	16	23	21
E-12a	28	20	28	26
E-13a	27	25	34	33
E-14a	34	20	28	26
E-15a	32	21	29	27
E-16a	33	24	32	32
E-17a	36	19	27	26
E-18a	31	15	23	20
\bar{x}	30,45	23,48	32,00	31,12
σ	3,11	9,28	10,90	12,30
De	33,56	32,76	42,90	43,42
Máx	35,50	47,80	60,56	63,35
Mín	26,50	15,40	22,51	20,41
CV%	10,22%	39,54%	34,07%	39,54%
N	10,00	10,00	10,00	10,00

Conforme pode se observar Tabela 3 e Figura 9 resulta que com exceção do ensaio auxiliar “E-09a”, os valores obtidos por correlação a partir das deflexões do LFWD medidos, em campo, são bastante próximos aos aferidos com a VB, para os mesmos locais de ensaio. A interpretação desses valores, induz a um resultado conservador, com deflexões calculadas na maioria das vezes abaixo da linha de valores medidos em campo com a VB.

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 9. Foi considerado o intervalo do desvio padrão de $[-\sigma, +\sigma]$, obtido estatisticamente, para comprovação do exposto. Pela figura 10 observa-se que somente o ponto de ensaio “E-09a” ficou fora do intervalo.

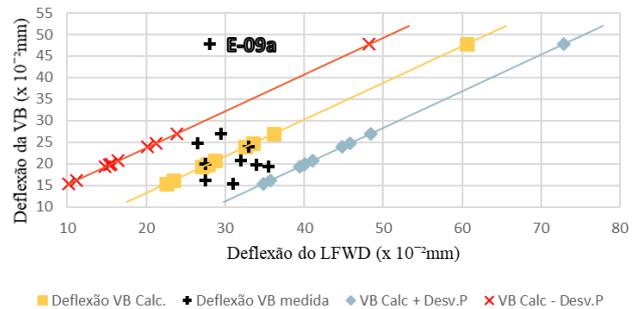


Figura 10. Plotagem dos valores medidos em campo e obtidos por correlação

Para este estudo, a relação entre as deflexões medidas nos ensaios de VB e LFWD, 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 pavimento asfáltico com $h_{rev}=10\text{cm}$ (trecho 1) assente sobre base granular, a leitura de deformações com o LFWD 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: o deflectômetro de impacto leve (LFWD) apesar de recente, apresenta vantagens em relação aos métodos tradicionais, pela rapidez e simplicidade das medições. Esse equipamento fornece de maneira direta a medida da deflexão e permite a avaliação de pista sem grande perturbação do tráfego. No entanto, não apresentou boa correlação em estruturas com camadas de revestimento em CAUQ de 10 cm. Nesta situação, a pesquisa não obteve correlações bem definidas.

Há boa correlação da deflexão obtida com LFWD e os procedimentos tradicionais (VB e placa) para estruturas de pavimentos compostas por revestimento em CAUQ, espessura de 5cm sobre base granular. Para essa composição, as



leituras com a viga e LFWD apresentam dispersões semelhantes.

Salienta-se, que os modelos obtidos neste estudo são para estruturas compostas de revestimento asfáltico sobre bases granulares, com espessuras de 15,0 a 45,0cm;

Em decorrência dos resultados obtidos, notadamente a correlação entre a medida de deformação pelos métodos de carregamento estudados, o presente estudo sugere a adoção de ilhas de investigação em pontos distintos de uma via em avaliação estrutural. Nessas regiões, a partir dos resultados obtidos com métodos tradicionais (Placa e VB) e LFWD poderá ser obtida correlação para 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.

Deve-se dar preferência ao uso de equipamentos automatizados como o LFWD pois, de certa forma, este tipo de equipamentos elimina a possibilidade de ocorrência de uma série de erros usualmente associados à manipulação inadequada dos equipamentos manuais, bem como de erros grosseiros de leitura e registro.

REFERÊNCIAS

- ALBERNAZ, C. A. V. Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão. Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ, 1997.
- AASHTO (1993). Guide for Design of Pavement Structures. Washington.
- BENEDETTO, Andrea; TOSTI, Fabio; DI DOMENICO, Luca. Elliptic model for prediction of deflections induced by a Light Falling Weight Deflectometer. Journal of Terramechanics, v. 49, n. 1, p. 1-12, 2012.
- BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Ed. Gráfica Imprinta, 2008. 504 p.
- BORGES, Clarissa Beatriz Sandoval. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MEDIDAS DE DEFLEXÃO COM VIGA BENKELMAN E FWD EM PAVIMENTOS DA MALHA RODOVIÁRIA ESTADUAL DE SANTA CATARINA. 2001. 197 f. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)-Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/79447/188421.pdf>.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. Bioestatística: princípios e aplicações. Porto Alegre: Editora Artmed, 2003.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero - ES 385. Rio de Janeiro, 1999a.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Pavimentação – pré-misturado a frio com emulsão modificada com polímero - ES 390. Rio de Janeiro, 1999b.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA 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, Amr F.; ELBAZ, Khaled; AMER, Mohamed I. The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction. HBRC Journal, v. 10, n. 3, p. 298-307, 2014.
- FRANCISCO, Ana. Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis. 2012. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão.
- GONTIJO, P. R. A.; GUIMARÃES, F. H. R.; NOGUEIRA, C. de L. Metodologias brasileiras para avaliações das características funcionais e estruturais de pavimentos rodoviários-o estado da arte. REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, v. 28, 1994.
- GROS, Christophe. Use of a Portable Falling Weight Deflectometer;" Loadman". Oulun yliopisto, 1994.
- LIRA, S. A. Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, 2004.
- LOPES, J. Contributo para o estudo da utilização do deflectómetro de impacto ligeiro. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil pelo Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- MACHADO, Ana Beatriz Alves dos Santos et al. Contribuição para a avaliação estrutural de infraestruturas rodoviárias por métodos não destrutivos. 2012. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. Mecânica dos pavimentos. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, v. 23, 1997.
- NAZZAL, Munir Darwish. 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, 2007.

STANDARD, A. S. T. M. E2835-11.(2011).“. Standard test method for measuring deflections using a portable impulse plate load test device.

PESSOA, Francisco Hélio Caitano. Avaliações funcional e estrutural de trechos de rodovias no Distrito Federal construídos com diferentes materiais. 2012.

ROCHA, N. R.; RODRIGUES, R. M. 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, 1998.

SEYMAN, Ekrem. Laboratory evaluation of in-situ tests as potential quality control/quality assurance tools. 2003.