

CORRELAÇÕES ENTRE BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS DETERMINADAS A PARTIR DA VIGA BENKELMAN E FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER: ESTUDO DE CASO EM DOIS TRECHOS MONITORADOS EM SANTA MARIA/RS

CORRELATIONS BETWEEN DEFLECTION BASINS OBTAINED THROUGH BENKELMAN BEAM AND FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER: CASE STUDY IN TWO MONITORED SITES IN SANTA MARIA/RS

Lucas Dotto Bueno¹; Deividi da Silva Pereira¹; Ana Helena Back³; Fernando Dekeper Boeira⁴; Mauricio Silveira do Santos⁵; Elemar Taffe Junior⁶, Luciano Pivoto Specht¹

¹ Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, E:mails: lucas.bueno@ufsm.br; dsp@ufsm.br; luspecht@ufsm.br

³ Doutoranda do PPGE/Universidade Federal de Santa Maria, Brasil, anahback@hotmail.com

⁴ CCR Engenharia, Brasil, fernando.d.boeira@gmail.com

⁵ Universidade Federal do Pampa, Rio Grande do Sul, Brasil, mauriciosilveira@unipampa.edu.br

⁶ Pavesys Engenharia, Brasil, taffe@pavesys.com.br

RESUMO

Em pavimentos existentes, uma alternativa para obtenção da resposta estrutural do conjunto de camadas, visando complementar as coletas de amostras em pista, é a realização de ensaios deflectométricos efetuados com equipamentos tais como a viga *Benkelman* (VB) e o *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Em vista disso, buscou-se estudar, através de avaliação estrutural não destrutiva, o comportamento das estruturas dos pavimentos de dois trechos monitorados, na cidade de Santa Maria/RS. Para isso, foram realizados ensaios com o equipamento FWD em cada estaca que compõe a extensão dos dois trechos. Sequencialmente aos pulsos de carga, foram determinadas também as deflexões com a viga *Benkelman*, objetivando encontrar uma correlação local entre os resultados obtidos a partir dos diferentes equipamentos e em idêntica condição climática. As bacias deflectométricas indicaram valores de deflexão superiores, medidos com a VB, em relação àqueles determinados pelo FWD. No que tange a deflexão máxima, a relação encontrada estabeleceu que os resultados determinados com a viga *Benkelman* são em média 1,355 vezes superiores àqueles obtidos com o FWD. A referida relação foi obtida no intervalo de valores de deflexões máximas medidas entre 25×10^{-2} mm e 99×10^{-2} mm, com temperaturas de superfície do pavimento revestido por concreto asfáltico entre 19°C e 51°C.

Palavras-chave: *Viga Benkelman; Falling Weight Deflectometer; Avaliação Estrutural*

ABSTRACT

An alternative to obtain the structural response of the road pavement layers, to complement the information obtained through samples extracted on track, is the performance of deflection tests carried out with equipment such as the Benkelman Beam (BB) and the Falling Weight Deflectometer (FWD). Through a non-destructive structural evaluation, aiming to assess the behavior of the pavement structures of two monitored sections, located in Santa Maria/RS city. Thus, tests were performed with the FWD Equipment in each stake that makes up the extension of the two sections. Sequentially to the load pulses, deflections were also measured with the BB, aiming to find a local correlation between the results obtained from different equipment and in identical weather conditions. The deflection basins indicated higher deflection values, measured with the BB, in relation to those determined by the FWD. Regarding the maximum deflection, the results found by using the BB are, on average, 1.355 times higher than those obtained with the FWD. This correlation was obtained in the range of maximum deflection values measured between 25×10^{-2} mm and 99×10^{-2} mm, with asphalt concrete pavement surface temperatures between 19°C and 51°C.

Keywords: Benkelman beam; Falling Weight Deflectometer; Structural Evaluation.

1. INTRODUÇÃO

Ensaaios deflectométricos realizados com a viga *Benkelman* (VB) e o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) avaliam a condição estrutural dos pavimentos a partir de distintas condições e geometria de carregamento, induzindo estados de tensões diferentes nas camadas da estrutura investigada. Sendo assim, é inevitável que as medidas de deflexão obtidas com os dois equipamentos sejam diferentes.

Inúmeras discussões envolvem os dois equipamentos citados acima. Dentre as principais, questiona-se a confiabilidade dos resultados medidos com a VB e a aplicabilidade das bacias deflectométricas, determinadas com esse equipamento, em procedimentos de retroanálise. Variadas versões automatizadas da leitura das vigas, impulsionadas pela viga eletrônica do LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*), buscaram tornar a operação mais eficaz e a análise dos dados mais precisa e rápida. Todavia, foram os equipamentos que medem as deflexões a partir de pulsos de carga (FWD) que trouxeram setor rodoviário a avaliação deflectométrica em larga escala e com elevada produtividade.

No estudo realizado pelo Departamento de Transportes do Estado de Illinois em 1981, em parceria com a Universidade de Illinois, apresentado por Hoffman e Thompson (1982), buscou-se analisar e correlacionar os resultados de ensaios deflectométricos realizados por diferentes equipamentos. As principais conclusões do estudo foram que, em termos de resposta dos pavimentos às cargas, o resultado produzido pelo FWD é o que mais se aproxima dos deslocamentos na superfície produzidos por um caminhão em movimento. Já as deflexões medidas com a VB, que ocorrem sob carga quase estática, tendem a superestimar àquelas que ocorrem sob cargas de roda em movimento.

Balbo (2007) explica as constatações dos autores pela possibilidade do pavimento ensaiado (quando este possuir revestimento asfáltico) sofrer importantes deformações viscoelásticas dependentes do tempo de aplicação da carga, devido à velocidade significativamente baixa do caminhão de prova durante a execução do ensaio com a VB. Segundo o autor, as aplicações instantâneas (FWD) implicam na não mobilização de deformações dependentes do tempo. Sendo assim, as deflexões obtidas com o FWD recrutam pouca mobilização da parcela viscoelástica da deformação, ou seja, o equipamento mede apenas as deformações elásticas.

Macêdo (1996) salienta que as leituras com a viga são influenciadas pelo operador e pela resposta viscoelástica, que depende da temperatura verificada durante a realização do ensaio, principalmente quando se trata de camadas espessas. Além disso, a superposição dos bulbos decorrentes dos dois rodados do caminhão, que transfere a carga ao pavimento no ensaio com a VB, pode acarretar em medidas de deflexão mais altas.

Segundo Lytton e Smith (1985), correlações entre medidas de deflexão obtidas com diferentes equipamentos que realizam ensaios não destrutivos devem ser utilizadas apenas em casos de entendimento completo das condições em que são aplicadas e do erro envolvido. Os autores afirmam que a correlação entre os equipamentos varia com a frequência de carga aplicada durante o ensaio e recomendam a aplicação de uma correlação específica para cada tipo de pavimento, com suas respectivas espessuras e materiais utilizados, já que nenhuma correlação é única.

Borges (2001) discute a existência de variadas correlações entre as medidas obtidas com a VB e com o FWD, propostas por diferentes autores como Himeno et al (1989), Pinto (1991), Cardoso (1995), Fabricio et al (1994), Rocha Filho (1996), Sestini et al (1998), Pinto e Domingues (2001). Essas correlações, referentes à deflexão máxima (D_0), representada pela deflexão característica de trechos e sub-trechos homogêneos, mostram resultados significativamente distintos, com variabilidade nos modelos elaborados pelos autores, confirmando a ideia discutida por Medina et al (1994), que afirmam existir variabilidade relevante nas correlações entre deflexões medidas com diferentes equipamentos. Os autores concluem que esses tipos de correlações são dependentes das estruturas analisadas, das condições climáticas, do modo de carregamento e do procedimento aplicado durante o ensaio.

No cenário nacional, os métodos vigentes existentes para projeto reforço de pavimentos (DNER PRO 011/1979 e DNER PRO 269/1994) são bastante claros quanto à aplicação das deflexões provenientes apenas de ensaios com a VB, uma vez que este equipamento era aquele empregado em larga escala no Brasil à época do desenvolvimento dos referidos procedimentos. Todavia, a produtividade e confiabilidade dos resultados com FWD são comprovadamente maiores. Assim, visando viabilizar o emprego dos métodos vigentes de dimensionamento de reforço à produtividade de ensaios com o FWD, até que os métodos de dimensionamento de reforços sejam definitivamente alterados para procedimentos empírico-mecanicistas, muitas pesquisas têm buscado o desenvolvimento de correlações empregáveis para certas condições estruturais e climáticas. Dentro deste contexto, o presente trabalho busca analisar os resultados de deflexão obtidos com os distintos equipamentos (viga *Benkelman* e FWD), medidos sequencialmente em dois segmentos experimentais, com idênticas condições climáticas.

2. MÉTODOS E TÉCNICAS

2.1. Descrição dos Trechos Monitorados

Para determinação das correlações entre as medidas deflectométricas determinadas com os diferentes equipamentos, foram avaliados dois trechos monitorados na cidade de Santa Maria/RS.

O acompanhamento de implantação dos trechos, nas diferentes etapas de pré-execução, execução e pós-execução (após a liberação ao tráfego), foram realizadas periodicamente e estão expostas em detalhes nos trabalhos de Santos (2015), Bueno (2016) e Bueno et al (2020). A caracterização completa do tráfego, materiais e métodos construtivos empregados nos dois trechos, discriminados nos itens que seguem, está descrita detalhadamente no trabalho de Santos (2015).

A Tabela 1 exhibe, de forma resumida, a composição estrutural e o tráfego atuante nos dois trechos monitorados durante o desenvolvimento da pesquisa. Ambos os trechos têm extensão total de 280 metros, fragmentos em 14 estacas, separadas 20 metros entre si.

Tabela 1 – Resumo das características dos trechos monitorados em Santa Maria/RS

		Trecho 1	Trecho 2
Localização		Av. Hélios Basso	BR-158 (Trevo dos Quartéis)
Tráfego Anual		$N_{USACE} = 1,06 \times 10^6$	$N_{USACE} = 1,20 \times 10^6$
Estrutura	Concreto Asfáltico	60 mm	75 mm
	Brita Graduada Simples	200 mm	150 mm
	Macadame Seco	400 mm	150 mm
	Reforço do Subleito	- -	400 mm ¹
	Subleito	A-6 (TRB)	A-6 (TRB)

2.2. Avaliação Deflectométrica

Com periodicidade semestral, foram realizados os ensaios deflectométricos de VB e FWD em todas as estacas que compõem as extensões dos dois trechos monitorados. Totalizaram-se assim, três campanhas de levantamentos com os dois equipamentos deflectométricos ao longo do período de quinze meses.

¹ O reforço empregado no Trecho 2 é composto por “Pedra Detonada”, termo regional que representa uma solução corriqueiramente adotada para reforços de subleitos com baixa capacidade estrutural no Rio Grande do Sul. As rochas que compõem este tipo de camada não passam por nenhum processo de britagem, apenas são coletadas após a detonação na pedreira.

Os ensaios de VB e FWD foram realizados de maneira sequencial, ou seja, os trechos foram avaliados simultaneamente com ambos os equipamentos deflectométricos. Este processo foi realizado nas três campanhas de levantamentos; desta forma, a capacidade estrutural do pavimento foi avaliada na mesma condição climática com os dois equipamentos, eliminando a influência da temperatura nas medidas de deflexão obtidas com os diferentes métodos de avaliação estrutural não destrutiva.

É importante salientar que o ensaio com a VB foi realizado sempre no sentido contrário ao fluxo de veículos. Este procedimento foi adotado para que os valores de deflexão obtidos com a viga fossem medidos em pontos idênticos aqueles com os quais foram realizadas as leituras com os transdutores LVDTs, do equipamento FWD (vide Figura 1). Tanto os transdutores LVDTs quanto a posição das leituras realizadas com a VB obedeceram às distâncias expostas na Tabela 2, adotadas como padrão para estes ensaios nos dois trechos monitorados. Entende-se que essa forma de posicionamento reflete a contribuição das diversas camadas no deslocamento total do pavimento, definindo completamente a geometria da bacia.

Tabela 2 – Distâncias das leituras para formação das bacias deflectométricas

D₀ (mm)	D₁ (mm)	D₂ (mm)	D₃ (mm)	D₄ (mm)	D₅ (mm)	D₆ (mm)
0	200	300	450	600	900	1200

Os ensaios de determinação das deflexões através da VB foram realizados conforme a normativa DNIT ME 133/2010. Para a execução dos levantamentos, foi utilizado um caminhão com o eixo traseiro simples, de rodado duplo, carregado com 80kN e pneus inflados com a pressão de 0,56MPa. Visando uma maior precisão e minimização dos erros nas medidas obtidas, em todas as campanhas de ensaios, foi realizado o controle da pressão de enchimento dos pneus (inclusive nos rodados internos) e da carga do eixo traseiro do veículo.

No intuito de obter as deflexões do pavimento com um equipamento de aplicação de carga por pulsos, foi utilizado neste estudo o modelo KUAB FWD 50. Fornecido pela *Pavesys Engenharia S/S Ltda - Epp* (parceira ao longo do desenvolvimento desta pesquisa), o KUAB FWD com o qual foram realizados os levantamentos nos trechos monitorados atende a todos os requisitos constantes nas especificações ASTM D4695-03 (2008) e D4694-09 (2009). Esse equipamento permite a determinação da bacia deflectométrica a partir da leitura das deformações recuperáveis em sete pontos.

O KUAB FWD tem acoplado a sua estrutura um medidor de distância (odômetro digital) com resolução de 1,0 m, medidor automático de temperatura do ar e do pavimento com resolução de 0,5°C e acurácia de +/- 1°C (entre -18°C e +70°C), além de GPS de precisão métrica com coordenadas geográficas em cada ensaio.

Conforme citado anteriormente, tomou-se o cuidado para que as campanhas de obtenção das deflexões fossem realizadas sempre nos mesmos pontos, para avaliar o comportamento estrutural do pavimento exatamente nos mesmos locais, quer seja em um mesmo momento, a partir do mesmo equipamento, quer seja ao longo do tempo. Além da coleta das bacias deflectométricas, foram realizadas também as leituras das temperaturas na superfície do pavimento (por termômetro digital infravermelho) em cada uma das estacas ensaiadas. A execução dos ensaios de VB e FWD está ilustrada na Figura 1.



Figura 1 – Realização dos ensaios deflectométricos com a viga benkelman (a) e FWD (b)

Em cada estaca, foram realizadas duas aplicações do carregamento aproximado de 40kN imposto pelo FWD, transmitido à pista por uma placa com raio de aplicação igual a 150 mm. Uma vez que os amortecedores presentes na placa de carga podem acarretar em pequenas alterações no carregamento imposto, as leituras do FWD foram corrigidas para a carga exata de 40kN (através da Equação 1), visando validar a correlação com o carregamento de 80kN do eixo traseiro, de rodado duplo, do caminhão com o qual foram realizados os ensaios com a VB. Nenhuma correção foi realizada em relação à temperatura do pavimento, uma vez que os levantamentos ocorreram, em cada estaca, um na sequência do outro, primeiro FWD e depois VB.

$$d_i = u_i * \frac{FR}{F_i} \quad (1)$$

Onde:

d_i = deflexão corrigida;

u_i = deflexão medida;

FR = carga pré-definida;

F_i = carga aplicada;

É importante salientar que a posição onde o FWD realizou a aplicação da carga (trilha de roda externa da faixa mais carregada dos dois trechos) foi idêntica àquela a qual foi realizada a leitura inicial no ensaio de VB. Assim, pôde-se obter uma correlação local entre as bacias deflectométricas obtidas com os diferentes equipamentos.

3. RESULTADOS

3.1. Correlação entre as deflexões obtidas com viga Benkelman e FWD

Para a avaliação da correlação entre as medidas de deflexões obtidas com os dois diferentes equipamentos, foram analisadas as bacias determinadas em todas as estacas com a VB em comparação às bacias encontradas a partir do FWD, em cada estaca, com a carga de 40kN.

Foram obtidas correlações entre as medidas de deflexão determinadas com os dois equipamentos em cada uma das distâncias do ponto de aplicação de carga, nos quais foram realizados os ensaios deflectométricos (conforme Tabela 2). Posteriormente, foi identificada uma correlação geral para a bacia de deflexão. É importante salientar que as correlações foram determinadas para as bacias deflectométricas de todas as estacas, visando eliminar possíveis erros acumulados, que seriam contabilizados em correlações encontradas com avaliação de bacias médias do trecho.

Sendo assim, a partir de todas as deflexões coletadas nos trechos avaliados, considerando todas as distâncias de leitura, nos três levantamentos, foram obtidos os dados apresentados na Figura 2.

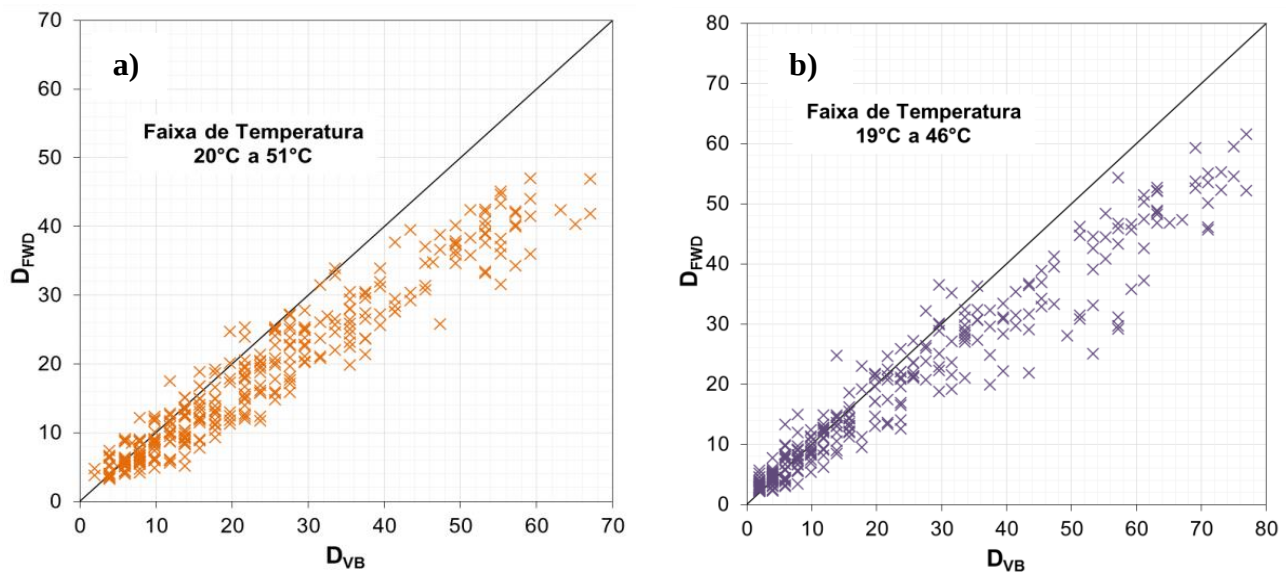


Figura 2 – Correlação geral entre VB e FWD para o Trecho 1 (a) e 2 (b) de Santa Maria/RS

Os pontos dispostos nos gráficos da Figura 2 descrevem com clareza que, de forma majoritária, as deflexões determinadas com VB, em todas as distâncias de leitura, são maiores do que aquelas medidas com o equipamento FWD.

Procedeu-se então, para melhor interpretação dos dados gerados, a obtenção da correlação em cada distância de leitura de cada uma das estacas dos trechos monitorados. Para o estudo das correlações entre os equipamentos, foram aplicados os modelos de regressão linear, logarítmico, potencial e exponencial. Estatisticamente, verificou-se que as equações determinadas a partir dos modelos lineares e de potência propiciaram as melhores correlações entre deflexões medidas com VB e FWD. A Tabela 3 exibe, para cada um dos levantamentos e de maneira geral, as regressões obtidas com o modelo linear e potencial, considerando todas as distâncias de leitura, para os dois trechos avaliados.

Tabela 3 – Modelos de regressão aplicados aos dados de deflexão nos Trechos 1 e 2 de Santa Maria/RS

Modelo de Regressão					
Trecho	Campanha	Linear	R ²	Potencial	R ²
1	1	$D_{VB}=1,359D_{FWD}-2,426$	0,95	$D_{VB}=0,984D_{FWD}^{1,064}$	0,92
	2	$D_{VB}=1,332D_{FWD}-0,296$	0,92	$D_{VB}=0,900D_{FWD}^{1,121}$	0,86
	3	$D_{VB}=1,387D_{FWD}-0,347$	0,91	$D_{VB}=1,352D_{FWD}^{0,997}$	0,91
	GERAL	$D_{VB}=1,353D_{FWD}-0,897$	0,93	$D_{VB}=1,082D_{FWD}^{1,054}$	0,89
2	1	$D_{VB}=1,342D_{FWD}-3,014$	0,96	$D_{VB}=0,523D_{FWD}^{1,242}$	0,95
	2	$D_{VB}=1,206D_{FWD}-1,092$	0,97	$D_{VB}=0,955D_{FWD}^{1,053}$	0,96
	3	$D_{VB}=1,452D_{FWD}-2,030$	0,92	$D_{VB}=0,761D_{FWD}^{1,164}$	0,92
	GERAL	$D_{VB}=1,329D_{FWD}-1,962$	0,94	$D_{VB}=0,745D_{FWD}^{1,144}$	0,93

É importante salientar que, devido à sensibilidade das medidas de deflexão em função da temperatura do pavimento, as correlações expostas na Tabela 3 estão vinculadas às temperaturas da superfície da pista, medidas no momento dos ensaios.

Conforme indicado nos gráficos da Figura 2, a correlação geral pode ser aplicada, no Trecho 1, na faixa de temperatura de superfície entre 20°C e 51°C (temperaturas de superfície mínima e máxima nas quais foram medidas as bacias deflectométricas considerando os três levantamentos avaliados) e no

Trecho 2, na faixa entre 19°C e 46°C. Já as correlações específicas, para cada um dos três levantamentos (Tabela 3), foram determinadas nas temperaturas de superfície (médias entre as temperaturas determinadas na superfície de todas as estacas do trecho) descritas na Tabela 4, respectivamente para os Trechos 1 e 2.

Tabela 4 – Temperaturas na superfície da pista determinadas nos ensaios nos Trechos 1 e 2 de Santa Maria/RS

Trecho	Campanha	T°C média (VB)	T°C média (FWD)
1	1	21	21
	2	48	46
	3	38	40
2	1	20	20
	2	30	30
	3	43	41

Por fim, visando identificar não apenas uma correlação geral para a bacia deflectométrica, mas também uma análise detalhada em cada um de seus pontos (conforme Tabela 2), os modelos das equações lineares e de potência também foram aplicados, em ambos os Trechos, especificamente para cada uma das sete distâncias de leituras em que as deflexões foram coletadas com os dois equipamentos. Os resultados, determinados a partir do agrupamento de dados dos três levantamentos, estão expostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Modelos de regressão aplicados a cada uma das distâncias de leitura.

Modelo de Regressão					
Trecho	Leitura	Linear	R ²	Potencial	R ²
1	D ₀	$D_{VB}=1,224D_{FWD}+4,846$	0,38	$D_{VB}=1,577D_{FWD}^{0,956}$	0,38
	D ₁	$D_{VB}=1,397D_{FWD}-1,743$	0,36	$D_{VB}=1,267D_{FWD}^{1,012}$	0,34
	D ₂	$D_{VB}=0,901D_{FWD}+7,644$	0,23	$D_{VB}=2,943D_{FWD}^{0,718}$	0,23
	D ₃	$D_{VB}=1,093D_{FWD}+2,525$	0,29	$D_{VB}=1,455D_{FWD}^{0,938}$	0,32
	D ₄	$D_{VB}=1,282D_{FWD}+0,119$	0,31	$D_{VB}=1,129D_{FWD}^{1,042}$	0,34
	D ₅	$D_{VB}=1,499D_{FWD}-2,145$	0,37	$D_{VB}=0,770D_{FWD}^{1,203}$	0,38
	D ₆	$D_{VB}=1,292D_{FWD}+0,110$	0,22	$D_{VB}=0,975D_{FWD}^{1,136}$	0,29
2	D ₀	$D_{VB}=1,021D_{FWD}+13,629$	0,43	$D_{VB}=2,694D_{FWD}^{0,812}$	0,44
	D ₁	$D_{VB}=0,702D_{FWD}+18,521$	0,06	$D_{VB}=5,758D_{FWD}^{0,561}$	0,07
	D ₂	$D_{VB}=0,574D_{FWD}+14,041$	0,04	$D_{VB}=6,559D_{FWD}^{0,445}$	0,04
	D ₃	$D_{VB}=0,959D_{FWD}+2,090$	0,14	$D_{VB}=1,496D_{FWD}^{0,873}$	0,12
	D ₄	$D_{VB}=1,252D_{FWD}-1,796$	0,28	$D_{VB}=0,698D_{FWD}^{1,169}$	0,25
	D ₅	$D_{VB}=1,456D_{FWD}-2,429$	0,30	$D_{VB}=0,548D_{FWD}^{1,315}$	0,24
	D ₆	$D_{VB}=0,723D_{FWD}+0,728$	0,08	$D_{VB}=1,336D_{FWD}^{0,620}$	0,08

Em relação aos baixos coeficientes de determinação indicados na Tabela 5, em comparação com aqueles expostos na Tabela 3, pode-se atribuir o fato à difícil representatividade do modelo dentro de uma faixa de resultados tão pequena. As respectivas distâncias de leitura medem valores significativamente próximos, tornando difícil o ajuste dentro de um modelo matemático. Salienta-se que, devido à grande dispersão nos ensaios de VB, é difícil que modelos generalizados, os quais consideram levantamentos distintos, resultem em altas representatividades das variáveis dependentes por meio das variáveis independentes. Em especial para o Trecho 2, percebe-se que, com exceção dos resultados oriundos da correlação obtida para deflexão máxima (D₀), as leituras efetuadas em distâncias

afastadas do ponto de aplicação de carga resultam em coeficientes de determinação destacadamente baixos.

3.2. Comparação com as demais correlações propostas pela literatura

As diversas correlações entre deflexões medidas com VB e FWD, publicadas na literatura, são referentes à deflexão máxima (D_0). Assim, as correlações determinadas para os Trechos 1 e 2, neste trabalho, referentes à deflexão máxima, foram comparadas com as demais relações presentes na literatura.

A Figura 3 exibe o gráfico com as correlações deste trabalho (D_0), confrontadas com relações de diversos autores.

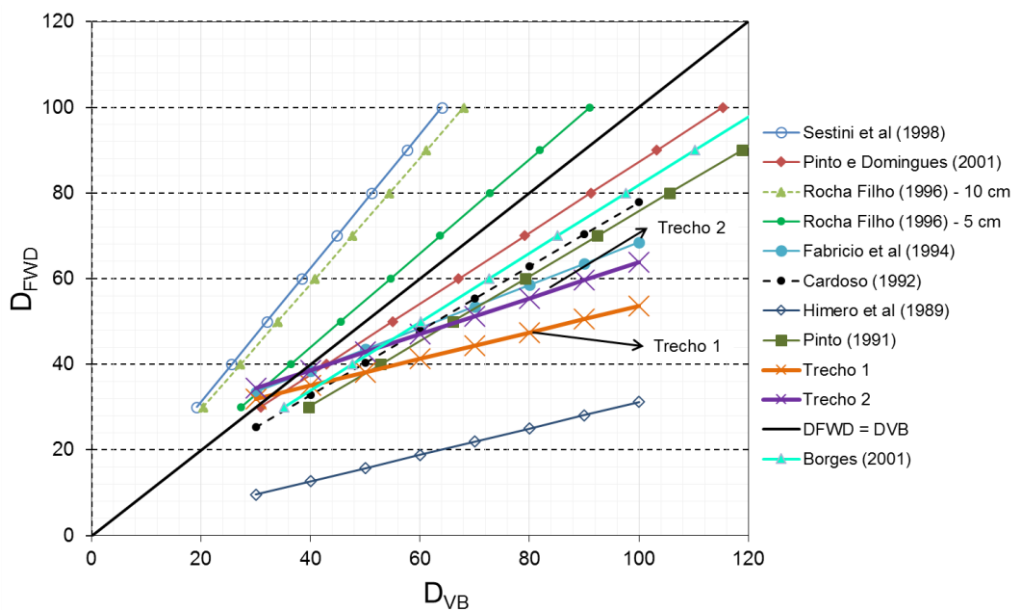


Figura 3 – Comparação entre as correlações referentes as deflexões máximas obtidas com VB e FWD

Pelo gráfico da Figura 3, percebe-se que as correlações dos trechos monitorados por este trabalho são comparáveis aquelas determinadas por Pinto (1991), Cardoso (1995), Fabricio et al (1994), Pinto e Domingues (2001). Todas estas indicam que deflexões obtidas com a VB são maiores do que aquelas medidas a partir do FWD. Destaca-se também a correlação geral obtida por Borges (2001), para todos os segmentos avaliados, contemplada pelo Manual de Restauração do DNIT (2006), que também identifica superioridade nas deflexões máximas determinadas com a VB em relação ao FWD.

Em contraponto, nota-se que as correlações de Rocha Filho (1996) e Sestini et al (1998) descrevem comportamento completamente oposto daquele identificado para os Trechos 1 e 2 deste trabalho, indicando que as medidas coletadas com FWD são maiores do que aquelas determinadas com a VB.

Entende-se que cada sistema estrutural pode originar uma correlação diferente, tornando as relações exclusivamente locais, com uso restrito à estrutura em avaliação. É necessário respeitar resultados de pesquisadores importantes, tais como Macedo (1996), o qual verificou deflexões medidas pelo FWD, em estruturas significativamente menos rígidas do que as abordadas no presente trabalho, maiores do que aquelas determinadas pela VB.

Todavia, os resultados desta pesquisa, obtidos com ensaios sequencias, sem influência da condição climática nas bacias deflectométricas medidas a partir dos dois equipamentos, reforçam que a parcela viscoelástica do deslocamento vertical, medido pela VB, em adição à parcela estritamente elástica, originam deflexões maiores através do ensaio com o equipamento estático do que em relação ao carregamento dinâmico, gerado pelo pulso de carga.

Além disso, a geometria dos aparelhos, com eventual superposição dos bulbos dos rodados dos caminhões durante o carregamento aplicado no ensaio de VB, pode causar valores mais elevados em relação àqueles medidos com o FWD, devido ao caráter viscoelástico da mistura asfáltica, sensível à temperatura e ao tempo de aplicação de carga. Outras justificativas podem ser abordadas, porém, é importante salientar que as composições gerais dos ensaios são distintas (tipo de carregamento, aplicação da carga, método de medição), impossibilitando assim a generalização destas correlações.

Por fim, vislumbrando uma contribuição geral para aplicação em projetos de reforço de pavimentos (principalmente aqueles recomendados pelo DNIT, os quais deixam claro a utilização das deflexões máximas de projeto provenientes da VB), a correlação geral entre as deflexões máximas determinadas com VB e FWD, obtida a partir do modelo linear englobando todos os levantamentos nos quais a correlação foi validada, nos dois trechos monitorados por este trabalho em Santa Maria (RS), com eliminação do intercepto, pode ser expressa através da Equação 2.

$$D_{VB} = 1,355D_{FWD} \rightarrow R^2 = 0,50 \quad (2)$$

Onde:

D_{FWD} = deflexões máximas medidas com o equipamento FWD (10^{-2} mm);

D_{VB} = deflexões máximas medidas com a viga *Benkelman* (10^{-2} mm);

R^2 = coeficiente de determinação.

Vale salientar que a Equação 2 foi obtida no intervalo de valores de deflexões medidas entre 25×10^{-2} mm e 99×10^{-2} mm com temperaturas de superfície do pavimento revestido por concreto asfáltico entre 19°C e 51°C.

Apesar de correlações deste tipo ainda encontrarem espaço na prática de engenharia, entende-se que sua utilização demanda julgamento adequado. Os dados provenientes de ensaios com o FWD permitem a elaboração de projetos mais refinados de reforço de pavimentos, tais como as rotinas empírico-mecanicistas descritas pelo Manual de Restauração do DNIT (2006), por Medina e Motta (2015) e pela plataforma MeDiNa (Franco e Motta, 2020).

Tratando-se da utilização das bacias deflectométricas em procedimentos de retroanálise, julga-se importante o delineamento a partir de equipamentos do tipo FWD, devido à grande dispersão nos resultados de deflexão determinados com a VB nas distâncias de leitura mais afastadas da posição inicial, como apresentado na Tabela 5.

4. CONCLUSÃO

De acordo com o delinear metodológico estabelecido pelo presente trabalho, que buscou identificar correlações entre os resultados deflectométricos determinados com viga Benkelman e FWD, realizados de maneira sequencial, foi possível constatar que:

- Os modelos de regressão, aplicados de diferentes maneiras para as deflexões determinadas a partir de VB e FWD, evidenciaram que os deslocamentos verticais medidos com a viga foram maiores do que aqueles determinados com o FWD. Esta conclusão é válida para os levantamentos realizados nos dois trechos monitorados estudados, com temperaturas da superfície do pavimento variadas;
- Em uma análise detalhada em cada um dos sete pontos delineados pelas bacias deflectométricas obtidas com os dois equipamentos, os modelos de correlação, a partir do seu coeficiente de determinação, identificaram dificuldade na obtenção de relação entre os resultados com os distintos equipamentos, em especial nas distâncias mais afastadas do ponto de aplicação de carga;
- No que tange a deflexão máxima (abaixo do ponto de aplicação de carga), a relação encontrada estabeleceu que os resultados determinados com a viga Benkelman são em média

1,355 vezes superiores àqueles obtidos com o FWD. A referida relação foi obtida no intervalo de valores de deflexões máximas medidas entre 25×10^{-2} mm e 99×10^{-2} mm, com temperaturas de superfície do pavimento revestido por concreto asfáltico entre 19°C e 51°C;

- d) Salienta-se que este tipo de correlação deve ser aplicada em projetos rodoviários com cuidado, uma vez que as particularidades locais influenciam significativamente os resultados entre distintos equipamentos. O presente trabalho não recomenda a utilização destas correlações em projetos empíricos-mecanicista de reabilitação de pavimentos, uma vez que este processo demandaria a execução do procedimento de retroanálise, cuja assertividade depende da existência de ensaios deflectométricos com o FWD.

AGRADECIMENTOS

À REDE DE TECNOLOGIA EM ASFALTO ANP/PETROBRAS, CAPES e CNPq pelo apoio às pesquisas do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária – GEPPASV da Universidade Federal de Santa Maria.

5. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D4694-09: Standard test method for deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device. West Conshohocken (EUA), 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM); D4695-03: Standard guide for general pavement deflection measurements. West Conshohocken (EUA), 2008.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

BORGES, C. B. S. Estudo comparativo entre medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina. 197p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BUENO, L.D. Avaliação Deflectométrica e de Rigidez: Estudo de Caso em Três Trechos Monitorados em Santa Maria/RS. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 460p, 2016.

BUENO, L.D.; PEREIRA, D.S.; SPECHT, L.P.; PINHEIRO, G.S.; TAFFE JUNIOR, E. Retroanálise de módulos de resiliência: aspectos inerentes ao processo iterativo de ajuste de bacias deflectométricas. Revista CIATEC – UPF, vol. 12, (1) , p.p. 36-50, 2020.

CARDOSO, S. H. Faixas de módulos dinâmicos (elásticos) obtidos por retroanálise durante sete anos. In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação. Pág. 377-401. Cuiabá, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (DNER). PRO 011/79: Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (DNER). PRO 269/94. Projeto de restauração de pavimentos flexíveis – TECNAPAV. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES (DNIT). Manual de Restauração. Publicação IPR 720, Rio de Janeiro, 2006.

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

FABRÍCIO, J. M., SILVA, G. A., GONÇALVES, E. A., et al., Método Simplificado de Retroanálise em Pavimentos Flexíveis – Anais da 28ª. RAPv – ABPv. 1994

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método Mecânico – Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos. Manual de Utilização do Programa MeDiNa. Projeto DNIT TED nº 682/2014. Processo nº 50607.002043/2013-00. Convênio UFRJ-DNIT, Rio de Janeiro/RJ, 2020.

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.

HOFFMAN, M. S; THOMPSON, M. R. Backcalculating Non-linear Resilient Moduli from Deflection Data. TRR 852. Transportation Research Board, Washington (EUA), 1982.

LYTTON, R. L; SMITH, R. E. Use of Nondestructive Testing in the Design of Overlays for Flexible Pavements. TRR 1007. Pág.11-20. Transportation Research Record, Washington (EUA), 1985.

MACÊDO, J. A. G. Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis. 478 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

MEDINA, J; MACÊDO, J. A. G; MOTTA, L. M. G. Utilização de ensaios deflectométricos e de laboratório para avaliação estrutural de pavimentos. In: 28ª Reunião Anual de Pavimentação. Pág. 595-625. Belo Horizonte, 1994.

MEDINA, J; MOTTA, L. M. G. Mecânica dos Pavimentos. 3ª Edição. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2015.

PINTO (1991), S. Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PINTO, I. E., 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, 2001.

ROCHA FILHO, N. R. Estudo de técnicas para a avaliação estrutural de pavimentos por meio de levantamentos deflectométricos. 185 p. Dissertação de mestrado. Instituto tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1996.

SANTOS, M. S. Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho a partir da implantação de trechos monitorados na região de Santa Maria – RS. 204 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2015.

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, 1998.