



26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DEFLECTOMÉTRICOS OBTIDOS COM VIGA BENKELMAN E DEFLECTÔMETRO DE PESO LEVE (LWD): ESTUDO DE CASO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PAVIMENTO

Maurício Nunes Cabral¹; Martônio José Marques Francelino¹; Wanderson Freitas Lucio²

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo de caso para reflexão das boas práticas necessárias para uma investigação a respeito dos critérios necessários para correlações das medidas de deflexão de uma pavimentação por aparelhos com funções semelhantes. As deflexões, além de desempenhar um papel fundamental na avaliação da integridade estrutural e no desempenho dos pavimentos, é uma das principais informações para dimensionamento de reforços nessas estruturas. A viga Benkelman (VB), equipamento deflectométrico bem estabelecido e de uso corriqueiro, têm seus dados amplamente utilizados como parâmetros de entrada em vários métodos para reforços no pavimento. Diante dessa perspectiva, o presente artigo tem como objetivo analisar a viabilidade do uso do ensaio do Deflectômetro de Peso Leve (LWD), cujo emprego tem crescido no transcorrer dos últimos anos, e seus dados de deflexão para os mesmos fins em que os dados da viga Benkelman são empregados. Nesse contexto, para coleta de informações comparativas, esta pesquisa, apresenta o estudo realizado em duas rodovias, ambas apresentando dois segmentos, um com revestimento em concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) e a outro sobre camada de solo natural compactado. Posteriormente, utilizando-se o software Excel, uma análise estatística com modelos de regressão foi conduzida com as medições deflectométricas obtidas em campo e comparadas com estudos de outros autores. Os resultados indicaram a impossibilidade de estabelecer, nesse estudo de caso, uma correlação válida entre os dois equipamentos, contudo possibilitam uma reflexão sobre os critérios essenciais para obtenção desses dados de campo.

PALAVRAS-CHAVE: Viga Benkelman. LWD. Deflexão

ABSTRACT

This article presents a case study for reflecting on the best practices necessary for an investigation regarding the criteria required for correlations of deflection measurements of pavement using similar devices. Deflections, in addition to playing a fundamental role in assessing structural integrity and pavement performance, are one of the key pieces of information for designing reinforcements in these structures. The Benkelman Beam (BB), a well-established and commonly used deflectometric device, has its data widely used as input. parameters in various pavement reinforcement methods. Given this perspective, the presente article aims to analyze the feasibility of using the Lightweight Deflectometer (LWD) test, whose use has grown in recent years, and its deflection data for the same purposes as the Benkelman Beam data. In this context, for comparative data collection, this research presents the study conducted on two highways, both featuring two segments, one with hot mix asphalt (HMA) pavement and the other over compacted natural soil. Subsequently, using Excel software, a statistical analysis with regression models was conducted with the deflectometric measurements obtained in the field and compared with studies by other authors. The results indicated the impossibility of establishing a valid correlation between the two devices in this case study; however, they do allow for reflection on the essential criteria for obtaining these field data.

KEY WORDS: Benkelman Beam. LWD. Deflection.

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica do Cabo de Sto. Agostinho - UACSA, e-mail: mauricio.nunes@ufrpe.br; martonio.francelino@ufrpe.br

² TPF Engenharia, mauricio.cabral@tpfe.com.br; wanderson.freitas@tpfe.com.br



INTRODUÇÃO

Recomenda-se que o pavimento de uma rodovia seja projetado de maneira a atender um período de vida útil, ou ciclo de vida como também pode ser denominado, devendo manter um bom estado de utilização, tendo em vista a sua importância nas atividades de transporte que, por sua vez, exercem grande impacto socioeconômico no país (DNIT, 2006).

Bernucci et al. (2022) afirmam que, geralmente, os pavimentos não falham de maneira abrupta, mas sim, por meio do processo gradual de deterioração funcional e estrutural que se acumulam ao longo do tempo em que estão sujeitos ao tráfego, até que percam sua plena serventia.

Compreender os mecanismos que desencadeiam o processo de deterioração de um pavimento é imprescindível para que haja a elucidação das razões que conduziram à sua atual situação, além de ser base importante para a escolha da técnica mais adequada para a restauração. Neste contexto, o estudo da condição estrutural do pavimento irá fornecer informações indispensáveis quanto a sua adequação estrutural, permitindo o dimensionamento de uma alternativa mais apropriada, sendo os ensaios defletoométricos os mais adequados e utilizados para a interpretação desse comportamento estrutural (DNIT, 2006).

Ensaio, ou levantamentos defletoométricos, são avaliações não destrutivas realizadas a partir de equipamentos denominados como defletoômetros, que irão mensurar as deformações elásticas verticais sofridas pelo pavimento quando estes são expostos a influência de uma carga, também conhecidas como deflexão. Rodrigues (2017) comenta que essas deflexões são responsáveis pelo aparecimento de grande parte das fissuras ao longo da existência da via, cuja continuidade pode resultar na fadiga do revestimento.

Apresentado como um dos ensaios de medida de deflexão mais usados no país, a viga Benkelman, foi desenvolvida nos Estados Unidos pelo engenheiro Arthur Benkelman em 1950 e introduzida no Brasil em 1962. Embora seja um método simples, é trabalhoso e possui baixa precisão, especialmente quando são empregadas vigas comuns não automatizadas (BERNUCCI et al., 2022). Ademais, diversos outros dispositivos para ensaios defletoométricos foram desenvolvidos ao longo dos anos, como pontuam Medina e Motta (2015), visando aprimorar os procedimentos de avaliação não destrutiva do pavimento, no sentido de aumentar a acurácia nas medições, otimizar o tempo gasto nos ensaios, simular de forma fidedigna as condições de carregamento de acordo com o tráfego, gerar dados de forma mais rápida e direta e reduzir os custos associados aos ensaios.

Neste contexto, temos a criação e uso de equipamentos denominados como “de peso batente” como o FWD (Falling Weight Deflectometer), criado no anos 1980 e implementados para uso no Brasil em 1994 (BERNUCCI et al., 2022), e posteriormente o Light Weight Deflectometer (LWD) ou defletoômetro de peso leve, caracterizado por ser um defletoômetro de impacto com cargas baixas, sendo uma versão simplificada que pode ser operada manualmente e usado durante ou após a construção das camadas do pavimento (MEDINA E MOTTA, 2015).

Conforme destacado por Rodrigues (2018), o equipamento LWD possui uma introdução mais tardia no mercado se comparado com seus precursores, entretanto, se apresenta como uma opção mais vantajosa em virtude da sua característica portátil, conferindo maior rapidez e praticidade nos ensaios. Além disso, o equipamento fornece uma leitura da via sem demandar alterações substanciais ou interrupções significativas no fluxo do tráfego local, tornando-o particularmente adequado em cenários que envolvam dificuldades de acesso para instrumentação de maior porte.

Diante desta perspectiva, o presente estudo de caso tem como objetivo identificar a existência de uma correlação entre a VB e o LWD que justificasse a viabilidade do uso do ensaio do



deflectômetro de peso leve e seus dados de deflexão para os mesmos fins em que os dados de viga Benkelman são empregados, possibilitando assim, a adoção de um equipamento mais simplificado, nas respectivas rodovias estudadas. Desta forma, pretende-se comparar e estabelecer uma correlação estatística entre as medições de deflexão obtidas pelos ensaios de viga Benkelman e LWD.

REFERENCIAL TEÓRICO

Análise de Correlação entre Dados Deflectométricos Obtidos por Diferentes Ensaios

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006), em seu manual de restauração de pavimentos asfálticos, aborda a perspectiva de estabelecer correlações entre diversos equipamentos deflectométricos. Diante do amplo uso já estabelecido da viga Benkelman e do FWD, são examinados estudos que conseguiram identificar correlações válidas. Destaca-se o trabalho de Fabrício et al. (1988), que conseguiu estabelecer uma correlação não linear altamente significativa ($R^2 = 0,95$) entre as deflexões medidas pelos equipamentos mencionados. Além disso, Borges (2001) definiu correlações lineares significantes com um coeficiente de determinação de 0,84. Esses estudos indicam a possibilidade de desenvolver modelos comparativos usuais entre dados deflectométricos obtidos com diferentes equipamentos, corroborando o objetivo central desta pesquisa.

Embora a correlação entre os dados seja viável, o DNIT (2006) destaca que os modelos são sensíveis a múltiplos fatores, uma vez que a deflexão está intrinsecamente ligada à resposta elástica da estrutura do pavimento. Consequentemente, não existem modelos genéricos capazes de serem aplicados universalmente, razão pela qual é recomendável que os projetistas desenvolvam seus próprios modelos de correlação.

Em sua dissertação, Rodrigues (2018) analisou segmentos de CBUQ sobre base granular e CBUQ sobre alvenaria de paralelepípedos. Ele constatou que, na maioria dos trechos estudados, as deflexões médias medidas pela viga Benkelman eram menores em cerca de 34% em comparação com as deflexões médias obtidas pelo LWD. O autor conseguiu encontrar correlações bastante fortes em três dos cinco trechos avaliados, sendo a mais significativa com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,90.

Beninca e Santos (2021), ao investigarem a utilização dos dois equipamentos, identificaram correlações válidas nos dados deflectométricos em dois dos treze trechos analisados ao longo de mais de 4 km de via e cerca de 80 pontos de análise. O coeficiente de determinação do modelo mais significativo foi de 0,79. De modo geral, as deflexões medidas pelo LWD superaram aquelas medidas pela viga Benkelman.

Nery e Santos (2022) avaliaram seis segmentos de uma via com 9,4 km de extensão, localizados em vias urbanas e rurais, todos pavimentados com revestimento asfáltico e com estruturas de espessuras iguais, mas diferentes materiais de reforço do subleito. Os dados obtidos pelo LWD indicaram deflexões médias maiores em comparação com as deflexões médias obtidas pela viga Benkelman. No entanto, não foram encontradas correlações válidas em nenhum dos trechos estudados, sendo o maior coeficiente de determinação igual a 0,12.

Martello e Garcez (2022) realizaram um estudo em vias pavimentadas com CCR, concreto asfáltico e solo argiloso. Foram utilizados dois equipamentos de LWD diferentes, comparando-os com uma viga Benkelman. Os valores da deflexão não seguiram um padrão consistente, às vezes sendo



maiores em um equipamento e outras vezes maiores em outro. O estudo não estabeleceu modelos de regressão, pois não foram encontradas relações significativas entre os dados deflectométricos devido à grande variabilidade nas leituras.

É relevante destacar que os autores citados anteriormente conseguiram identificar e mensurar as estruturas que estavam sendo avaliadas, obtendo informações sobre as espessuras e a idade dos pavimentos, bem como as características das camadas sobre as quais foram executados, ademais a incidência de manifestações patológicas.

METODOLOGIA

Caracterização da Área de Estudo

Os dados deflectométricos analisados neste estudo foram levantados em quatro vias urbanas, duas na cidade de Jaboatão dos Guararapes, no estado de Pernambuco, e duas vias na cidade de Maceió, Alagoas. Em cada cidade selecionou-se uma via pavimentada com CBUQ e outra não pavimentada, apresentando apenas leito natural carroçável. Ambos os segmentos demarcados para estudo em Pernambuco possuíam 12 pontos de leituras, já os de Alagoas possuíam 20 pontos na via em CBUQ e 16 pontos na via de leito natural conforme apresentam-se nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Resumo dos trechos delimitado para estudo em Jaboatão dos Guararapes, PE (Autores, 2023)

Trecho	Composição	Quantidade de Pontos
1	CBUQ	12
2	Leito Natural	12

Tabela 2. Resumo dos trechos delimitado para estudo em Maceió, AL (Autores, 2023)

Trecho	Composição	Quantidade de Pontos
3	CBUQ	20
4	Leito Natural	16

Para todas as vias estudadas foram definidos espaçamentos em cerca de 2 metros entre cada ponto de aferição, alocados convenientemente sobre a trilha de roda, respeitando a distância mínima da borda do revestimento, conforme indicado na norma DNIT 133/2010.

Ressalta-se que as vias pavimentadas com CBUQ, não tiveram as espessuras de suas camadas estruturantes levantadas em campo, entretanto, a partir de análise visual, apresentavam boas condições superficiais. Já as vias que possuíam o revestimento composto por solo natural, além de não identificadas as camadas estruturantes, o Índice de Suporte Califórnia (ISC) e o grau de compactação também não foram levantados.

Estudos de Campo: Ensaios de Viga Benkelman e LWD

A realização das atividades de campo em Jaboatão dos Guararapes/PE aconteceu em 31 de janeiro de 2023, em um dia sem incidência de chuvas, com o tempo ensolarado e temperatura média de 27 °C.

Já os ensaios em Maceió/AL foram realizados no dia 01 de fevereiro de 2023, sob um tempo chuvoso com temperatura média de 26 °C.



Realizado de forma simultânea, as leituras do LWD e VB em cada ensaio foram realizadas lado a lado, alinhados a um mesmo ponto, posicionando o aparelho de LWD ao lado do eixo traseiro de rodas duplas utilizado como carga de prova da viga Benkelman, com distância entre um e outro variável, mas não superior a 1,00 metro. Dessa forma, tentou-se verificar áreas que compartilham características estruturais mais semelhantes possíveis, conforme mostrado nas Figuras 1 e 2. Tal procedimento de ensaio comparativo foi experimental, e não se apresenta normatizado nas literaturas técnicas.



Figura 1. Realização dos ensaios de LWD e VB lado a lado (AUTORES, 2023)



Figura 2. Realização dos ensaios de LWD e VB (AUTORES, 2023)

O levantamento de dados deflectométricos com a viga Benkelman foi regido de acordo com a norma DNIT 133/2010. O equipamento possuía relação 2/1 (constante da viga, de acordo com o tamanho dos seus braços), a carga de prova empregada foi o caminhão com eixo traseiro de rodas duplas possuindo 8,2 tf e o ensaio se deu obedecendo a seguinte ordem:

- Foi posicionada ponta de prova da VB entre os pneus de uma das rodas do eixo traseiro do caminhão, alinhando-a sob o seu eixo;
- Foi aferida e registrada a leitura inicial (L_i) no extensômetro;
- O caminhão foi afastado lentamente para uma distância superior a 5 metros da ponta de prova para que a estrutura retornasse ao seu estado original. É válido pontuar que esse item foi adaptado da norma, que indica 10 metros de afastamento final do caminhão, uma vez que não se detectava variação de leitura acusada pelo extensômetro após 5 metros;
- Foi aferida e registrada a leitura final (L_f) no extensômetro;
- Os dados aferidos foram inseridos na Equação 1, apresentada anteriormente, e com auxílio de uma planilha eletrônica (MS Excel) foi calculada a deflexão do ponto ensaiado.

Para as leituras de deflexão a partir do LWD foi usado um equipamento da marca Zorn Instruments, referência ZFG 3000, que possui peso de impacto de 10 kg e placa com 300mm de dimensão. O ensaio foi realizado de acordo com as recomendações da norma americana ASTM E2835-21, seguindo a seguinte ordem:

- O LWD foi posicionado no ponto de análise com superfície limpa (Sem vegetação ou material solto);
- O leitor digital é ligado e o peso móvel é posicionado no topo do equipamento;



- c) O peso móvel é liberado pelo operador do ensaio por 3 vezes, registrando 3 medidas no leitor digital do equipamento;
- d) A deflexão final é calculada automaticamente por média aritmética dos dados aferidos a partir dos 3 impactos sobre o ponto, e exibida pelo leitor digital do equipamento.

Análise Estatística

Buscou-se estabelecer uma equação que pudesse descrever a interdependência entre duas grandezas e avaliar a validade desse modelo, para isso foi feita um estudo de regressão, que se acordo com Lopes (2003) é uma análise que pode ser realizada com o intuito de examinar a existência de uma relação significativa de dependência entre duas ou mais variáveis, fundamentando-se tanto em representações gráficas quanto em fundamentos matemáticos.

Sendo assim, com o propósito de simplificar a avaliação estatística das medidas de deflexão, procedeu-se ao cálculo dos valores médios ($D_{méd}$), máximos ($D_{máx}$) e mínimos ($D_{mín}$), bem como do desvio padrão (DP).

Neste estudo, foram obtidos, com auxílio do MS Excel, os modelos de regressão simples, linear e não linear, conforme a seguir:

$$\text{Linear: } Y = \alpha X + \beta \quad (1)$$

$$\text{Exponencial: } Y = \alpha e^{\beta X} \quad (2)$$

$$\text{Potencial: } Y = \alpha X^{\beta} \quad (3)$$

$$\text{Log.: } Y = \alpha \cdot \ln(X) + \beta \quad (4)$$

em que:

Y: valor a ser estimado (variável dependente);

X: variável independente;

, α , β : coeficientes da equação.

O valor dependente (Y) será representado pela deflexão medida com o LWD e o independente (X) pela deflexão medida na VB.

Uma vez obtido o modelo de regressão, será possível gerar o coeficiente de determinação (R^2), que irá representar percentualmente o quanto de dados de uma variável dependente podem ser explicados a partir da variável independente, ou seja quantas leituras feitas com o LWD podem ser explicadas por leituras feitas com viga Benkelman.

O valor de R^2 pode variar de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, mais o modelo de regressão possui uma curva que se ajusta bem aos dados, sendo esse o fator que determinará qual o melhor modelo dentre o linear e os não lineares.

Caso vez que haja uma regressão linear como modelo mais significativo de acordo com o seu coeficiente de correlação (R^2), é possível obter também o Coeficiente de Correlação, que indicará o quão relacionável uma medição será da outra estatisticamente, ou seja, o grau da relação entre as deflexões aferidas pela viga Benkelman e as aferidas com LWD.



O valor do coeficiente pode ser negativo ou positivo e variar de 0 a 1, de acordo com a tabela 3 a seguir:

Tabela 3. Interpretação para o valor do coeficiente de correlação de Pearson (ρ)

Valor de ρ (Positivo ou negativo)	Interpretação
0,00 a 0,19	Correlação muito fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

O valor de ρ foi calculado e obtido com auxílio do software MS Excel.

Com o objetivo de eliminar possíveis dados incorretos que possam ter sido resultado de uma coleta inadequada, foi aplicado um procedimento de tratamento para identificar as medições que sejam atípicas ou discrepantes, as quais poderiam distorcer os resultados das análises estatísticas.

Para realizar esse tratamento, foi empregado o método da Amplitude Interquartil (IQR), onde o qual é calculado por meio do MS Excel, utilizando a seguinte fórmula:

$$L = Dméd \pm 1,5 (Q3 - Q1) \quad (5)$$

em que:

L: Limites aceitáveis de deflexão;

$Dméd$: Deflexão média;

Q1: Quartil 1;

Q3: Quartil 3.

Caso identificados dados espúrios, que ultrapassem os limites estabelecidos, essas observações serão excluídas do conjunto de dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados dos Ensaio de Campo

No trecho 1, observando as leituras deflectométricas da VB, é possível notar uma dispersão moderada em torno do valor médio, desvio padrão se mantendo em cerca de 30%, com deflexões variando entre 1,482 mm e 0,561 mm e valor médio de 1,102 mm. As leituras do LWD possuíram uma dispersão também moderada em relação à média, com o desvio padrão de 0,08, possuindo valor máximo de 0,416 mm e mínimo de 0,198 mm, além de uma média de 0,310 mm.



No trecho 2, a deflexão média detectada a partir da viga Benkelman foi de 0,653 mm, com valor máximo de 1,042 mm, mínimo de 0,140 mm e desvio padrão foi de 0,26. Já para o ensaio com LWD foi obtida a deflexão média de 0,321 mm, máxima de 0,391 mm e mínima de 0,272 mm.

Ao ser ensaiado, o trecho 3 apresentou valores de deflexão menores comparados aos obtidos em Pernambuco, com uma dispersão em relação à média também menor. Para a viga Benkelman, foi vista leitura máxima de 0,461 mm e mínima de 0,100, possuindo média de 0,300 mm e desvio padrão de 0,07 mm. No LWD verificou-se valor máximo de 0,287, mínimo de 0,179, médio de 0,225 e desvio padrão de 0,03 mm.

Por fim, as deflexões aferidas com a VB no trecho 4, apresentaram valor médio de 0,280 mm com desvio padrão de 0,09 mm, sendo o maior 0,421 mm e o menor 0,120 mm. Já no LWD temos deflexão média de 0,433, com desvio padrão de 0,09, possuindo deflexões máximas e mínimas de 0,599 mm e 0,264 respectivamente.

Diante do exposto, no que diz respeito aos segmentos 1, 2 e 3, as deflexões obtidas por meio da viga Benkelman sempre se mostraram superiores. No entanto, no segmento 4, observou-se um comportamento contrário, no qual as deflexões obtidas com o equipamento LWD apresentaram valores mais elevados.

Em uma análise global dos achados dessa pesquisa (Figura 3), ao considerar todos os pontos de forma empírica, não foi possível identificar matematicamente, um padrão claro entre as medidas de deflexão, nem uma proporção bem definida. Todavia, na seção das conclusões, serão abordadas possíveis causas geradoras desses resultados apresentados.

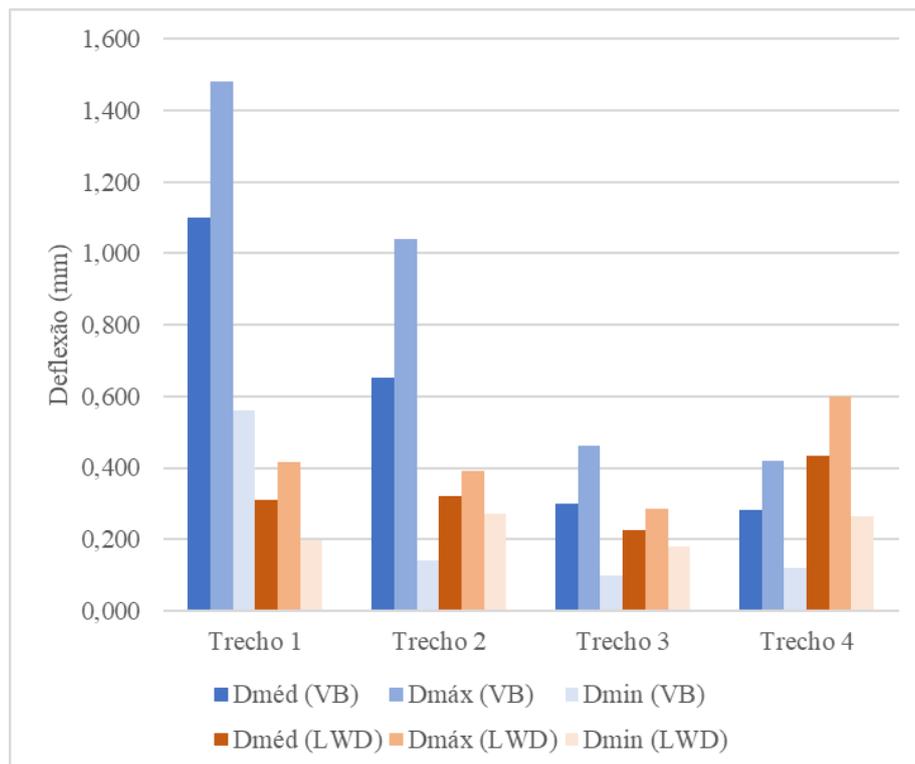


Figura 3. Gráfico resumo de dados deflectométricos de todos os trechos (AUTORES, 2023)



Dados das Análises Estatísticas

Nos segmentos 1, 2 e 4, apresentados nas tabelas 4, 5 e 7 respectivamente, nenhum modelo de regressão foi capaz de estabelecer uma correlação satisfatória, uma vez que os coeficientes de determinação calculados permanecem abaixo de 0,1. Esses coeficientes indicam que as curvas não se ajustam adequadamente aos dados dispersos, sendo menos de 1% das leituras de LWD podendo ser explicadas por leituras feitas com viga Benkelman. Os coeficientes de Pearson observados nos modelos lineares apresentam uma correlação linear classificada como muito fraca, tão próxima de zero que se pode inferir nula.

No segmento 3 (Tabela 6) é perceptível a presença de correlações ligeiramente mais definidas, conforme indicado pelos modelos que demonstram que mais de 10% das leituras realizadas com o equipamento LWD podem ser explicadas pelas leituras obtidas com a viga Benkelman.

Tabela 4. Modelos de regressão e Coeficiente de determinação do trecho 1 (AUTORES, 2023)

Tipo do Modelo	Modelo	R ²	ρ	Interpretação
Linear	$Y = -0,0166X + 0,3286$	0,06	0,07	Correlação linear muito fraca
Exponencial	$Y = 0,318e^{0,052X}$	0,06	-	-
Potencial	$Y = 0,3004X^{0,011}$	0,004	-	-
Logarítmica	$Y = -0,004 \cdot \ln(X) + 0,3105$	0,004	-	-

Tabela 5. Modelos de regressão e Coeficiente de determinação do trecho 2 (AUTORES, 2023)

Tipo do Modelo	Modelo	R ²	ρ	Interpretação
Linear	$Y = 0,0087X + 0,3151$	0,004	0,06	Correlação linear muito fraca
Exponencial	$Y = 0,3136e^{0,0237X}$	0,004	-	-
Potencial	$Y = 0,318X^{0,003}$	0,00	-	-
Logarítmica	$Y = -3 \cdot 10^{-5} \cdot \ln(X) + 0,321$	0,00	-	-

Tabela 6. Modelos de regressão e Coeficiente de determinação do trecho 3 (AUTORES, 2023)

Tipo do Modelo	Modelo	R ²	ρ	Interpretação
Linear	$Y = 0,1544X + 0,1832$	0,12	0,35	Correlação linear fraca
Exponencial	$Y = 0,1836e^{0,7081X}$	0,11	-	-
Potencial	$Y = 0,2865X^{0,1868}$	0,15	-	-
Logarítmica	$Y = 0,0409 \cdot \ln(X) + 0,2805$	0,16	-	-

Tabela 7. Modelos de regressão e Coeficiente de determinação do trecho 4 (AUTORES, 2023)

Tipo do Modelo	Modelo	R ²	ρ	Interpretação
Linear	$Y = 0,0642X + 0,4418$	0,004	0,07	Correlação linear muito fraca
Exponencial	$Y = 0,4411e^{0,0612X}$	0,004	-	-
Potencial	$Y = 0,4538X^{0,089}$	0,003	-	-
Logarítmica	$Y = 0,0133 \cdot \ln(X) + 0,4773$	0,003	-	-



Todavia, dentre os modelos estudados contidos nas tabelas apresentadas, e gerados no MS Excel, o que apresentou o melhor coeficiente de determinação foi o logarítmico, com um valor de R^2 de 0,16, embora não tenha se destacado significativamente em relação aos demais modelos. O coeficiente de Pearson de 0,35 evidenciou uma correlação fraca para o modelo linear.

Sendo assim, a equação observada por esse estudo que possui o maior potencial para explicar a relação entre deflexões aferidas com VB e LWD é:

$$Y = 0,0409.ln(X) + 0,2805 \quad (6)$$

em que:

Y: Deflexão medida com o LDW (Variável dependente);

X: Deflexão medida com a Viga Benkelman (Variável independente).

CONCLUSÃO, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Esta pesquisa tentou correlacionar dados deflectométricos medidos com dois equipamentos diferentes, o Deflectômetro de peso leve (LWD) e a viga Benkelman, com o intuito de poder usar as deflexões aferidas com o LWD convertidas como parâmetro de entrada em métodos de dimensionamento de reforço de pavimento, que hoje utilizam leituras da VB em suas metodologias de projeto.

Após analisar dados levantados por ensaios realizados em quatro trechos localizados em duas cidades diferentes do Nordeste brasileiro, não foi possível estabelecer uma correlação válida entre os dois equipamentos, visto que os trechos (1, 2 e 4) estudados não apresentaram correlação e o trecho 3 apresentou correlação fraca.

Dado o cunho experimental desta pesquisa, o presente estudo de caso se propôs a analisar e observar os resultados viáveis mediante as aferições ao longo de pequenos trechos de vias urbanas. Entretanto, como apresenta-se na literatura, a ausência de informações referentes a caracterização dos materiais constituintes dos pavimentos submetidos aos ensaios, bem como a disposição das camadas estruturantes subjacentes, tampouco a delimitação de segmentos de características homogêneas, podem ter contribuído para a ausência de correlações válidas entre as medições de deflexões obtidas nesta pesquisa.

Ainda no contexto da sensibilidade da análise em questão, é necessário pontuar que a falta de controle do afastamento entre os equipamentos de LWD e VB durante a realização dos ensaios lado a lado, podem ter interferido ou influenciado na medição das deflexões, uma vez que o Deflectômetro de Peso Leve, poderia estar dentro da área de influência da carga apresentada pelo eixo do caminhão.

Ademais, a utilização do Deflectômetro de peso leve, sem o emprego do pistão de aço temperado, em detrimento da placa de carga convencional, como sugerido por alguns pesquisadores, pode não ter induzido uma deformação mensurável na superfície do pavimento asfáltico necessária para aferir deflexões em estruturas asfálticas.

A análise relatada neste estudo pode oferecer contribuições a estudos futuros, destacando a importância de seguir as recomendações da literatura ao se procurar discernir interdependências entre dados deflectométricos obtidos por distintos equipamentos. A esse respeito, é possível recomendar os seguintes parâmetros:



- I. Análise caso a caso, visto que os modelos de correlação carecem de generalidade;
- II. Condução dos ensaios em condições idênticas de umidade e temperatura;
- III. Amostragem representativa e abrangente;
- IV. Conhecimento das espessuras da estrutura do pavimento, uma vez que isso afeta o módulo de resiliência e pode afetar também o desempenho do equipamento LWD;
- V. Avaliação de outras características estruturais do pavimento, como composição do material, condições do subleito e ocorrência de manifestações patológicas;
- VI. Investigação de pontos localizados em trechos homogêneos, isto é, que compartilham semelhanças;
- VII. Ensaios com diferentes equipamentos devem ser realizados próximos ao ponto escolhido para análise, havendo a garantia de que uma estrutura de mesma característica está sendo estudada, mas não devem ser feitos ao mesmo tempo, evitando interferências nas leituras de deflexão.

Sugere-se a realização de pesquisas que avaliem a aplicabilidade e desempenho de equipamentos de LWD em estruturas de pavimento com várias camadas, e o estudo de correlação entre deflexões medidas com LWD e VB aferidas em apenas uma camada da estrutura, de forma a avaliar a significância de avaliar de forma isolada apenas um elemento estrutural durante o processo de controle tecnológico da construção de uma via.

REFERENCIAS

- ASTM (2015) E2835-11 - Standard test method for measuring deflections using a portable impulse plate load test device. American Society for Testing and Materials
- Beninca, G. P.; Santos, A. G. (2021). Avaliação estrutural de pavimentos urbanos revestidos por concreto asfáltico sobre camada de paralelepípedos a partir de ensaios deflectométricos. 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, s.l.
- 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), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2022). Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: ABEDA, 2ª ed., 2022.
- DNIT – IPR 719 (2006). Manual de Restauração de pavimentos asfálticos. 3.ed. Rio de Janeiro.
- DNIT (2010) 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.
- Lopes, L. F. D. (2003). Apostila de Estatística. Santa Maria: UFMS. 2003.
- Magalhães, M. N.; Lima, A. C. P. Noções de probabilidade e estatística. 4. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.
- Martello, V. G.; Garcez, M. G. (2022). Comparação de deflexões obtidas por meio de equipamentos LWD e viga Benkelman. XXXIV Salão de Iniciação Científica da UFRGS, Porto Alegre, RS.



- Medina, J.; Motta, L. M. G. (2015). Mecânica dos Pavimentos. São Paulo: Editora Interciência, 3ª ed., 2015.
- Nery, C. C. Z.; Santos, A. G. (2022). Comparativo entre deflexões com a viga benkelman, fwd e lwd na avaliação estrutural de uma rodovia catarinense. 36º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Fortaleza, CE.
- Oliveira, A.; Pitta, D.; M. Trichês, G. (2000). Avaliação do comportamento mecânico da camada de lastro de pedra pulmão empregada no lote 8 da duplicação da br-101. Reunião Anual de Pavimentação: 2º Seminário Nacional de Modernas Técnicas Rodoviárias., Florianópolis, 2000.
- Reis, M.; Lino, M. Introdução e Análise Exploratória de Dados. [S. l.: s. n.], 2023.
- Rodrigues, T. N. (2017). Estudo comparativo do CBR “in situ” & lwd para determinação da capacidade de suporte de subleitos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Rodrigues, P. R. (2018). Medidas de deflexão em pavimentos asfálticos urbanos com o deflectômetro de peso leve. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC.
- SANTANA, Cinthia Isabelle Alves; SÁ, Renner Freire Aguiar. Ensaios não destrutivos em pavimentos pelo método FWD, análise estrutural comparativa entre as faixas da Av. Arthur Lima Cavalcanti, Santo Amaro, Recife, PE. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - CTG, Universidade Federal de Pernambuco, [S. l.], 2012.
- Velasco, B. Q. (2018) Análise crítica do controle construtivo de pavimentos com a viga de Benkelman: aplicação ao caso da ampliação do Aeroporto Internacional Tom Jobim no Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- Zorn Instruments (2021). Asphalt Tester: Modified Light Weigh Deflectometer. [S. l.: s. n.], 2021.