



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

ESTUDO DE REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS DEFLECTOMÉTRICOS REALIZADOS COM O TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER DEVICE (TSDD) NO BRASIL

Felipe F. Camargo¹; Caio M. Raul¹; Cecília F. Merighi²; Cláudio R.C. Dias²; Danilo M. Pitta & André F. Vale¹

RESUMO

Avaliações de deflexões por ensaios não destrutivos já fazem parte da rotina do mercado de infraestrutura em termos de avaliação estrutural de pavimentos. Este tipo de ensaio se iniciou na década de 1950, com o emprego da viga Benkelman e teve evolução importante na década de 1980 com o advento dos equipamentos do tipo *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Todavia, em todos estes casos, a sistemática de ensaio e baixa produtividade desses equipamentos exigem a interdição de faixa para a caracterização da deflexão do pavimento, com interferência direta com os usuários. A mudança deste paradigma ocorre agora com a possibilidade de emprego de um *Traffic Speed Deflectometer Device* (TSDd), um equipamento que permite caracterizar a resposta estrutural de um pavimento de forma contínua e em velocidade de tráfego. O presente estudo buscou avaliar a repetibilidade dos resultados obtidos com o equipamento TSDd Falkorr® em relação aos requisitos mínimos da norma NORMA DNIT 440/2023 – PRO para avaliação estrutural contínua de pavimentos utilizando um equipamento móvel. Os resultados em termos de deflexão sob a carga (R^2 médio de 0,981) e em termos de índice de curvatura (R^2 médio de 0,983), demonstraram atendimento pleno à norma. Sendo assim, conclui-se que o Falkorr apresentou condições satisfatórias de repetibilidade interna do sistema para ambos os parâmetros (deflexão máxima e índice de curvatura modelados) e em concordância com a norma do DNIT, consistindo numa inovação que traz avanços não apenas técnicos mas também em relação a segurança viária na metodologia de avaliação de pavimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Traffic speed deflectometer device (TSDd), Deflexão contínua, inclinação de deslocamento, Repetibilidade, Segurança viária.

ABSTRACT

Pavement deflection evaluation using non-destructive tests are already part of the routine in the infrastructure market in terms of structural assessment of pavements. This type of test began in the 1950s with the use of the Benkelman beam, with significant advances in the 1980s with the introduction of the Falling Weight Deflectometer (FWD) equipment. However, in both cases, the testing sequence and low productivity of these devices require lane interruption for pavement deflection testing, with direct interference with users. The change in this paradigm now occurs with the possibility of using a Traffic Speed Deflectometer Device (TSDd), a device that allows for the characterization of the structural response of a pavement continuously and at traffic speed. The present study sought to evaluate the repeatability of the results obtained with the TSDd Falkorr® equipment in relation to the minimum requirements of the DNIT STANDARD 440/2023 – PRO for continuous structural assessment of pavements. The results in terms of deflection under load (average R^2 of 0.981) and in terms of curvature index (average R^2 of 0.983) demonstrated full compliance with the standards. Therefore, it is concluded that Falkorr presented satisfactory conditions of internal repeatability of the system for both parameters (maximum deflection and modeled curvature index) and in accordance with the DNIT standard. That consists in an innovation that brings advances not only technically but also in relation to road safety in pavement evaluations.

KEY WORDS: traffic speed deflectometer device (TSDd), continuous deflection, deflection slope, repeatability, road safety.

¹ RoadRunner, felipe.camargo@rrunner.com.br; caio.raul@rrunner.com.br; andre.vale@rrunner.com.br.

² EcoRodovias, cecilia.merighi@ecorodovias.com.br, claudio.dias@ecorodovias.com.br; danilo.pitta@ecorodovias.com.br.



INTRODUÇÃO

A avaliação estrutural de um pavimento busca determinar a sua capacidade de resistir às cargas, compreendendo o estudo das características de resistência e de deformabilidade de suas camadas. Dados referentes à adequabilidade estrutural do pavimento são essenciais para determinar o diagnóstico da qualidade global da estrutura. Este tipo de avaliação permite detectar regiões com maiores concentrações e/ou probabilidade de problemas, determinar as causas mais prováveis das manifestações de ruína do pavimento, e conseqüentemente, definir as ações necessárias à sua recuperação e manutenção.

Desde a percepção de que o problema de capacidade de carga de pavimentos deve-se também à deformabilidade elástica das camadas, a determinação desta característica por ensaios não-destrutivos vem desempenhando papel preponderante na busca da racionalização da análise e projeto dessas estruturas. Entre os ensaios não-destrutivos (NDT) estão incluídos os deflectométricos, que consistem em medições dos deslocamentos verticais recuperáveis na superfície do pavimento quando submetido à aplicação de cargas transientes. Atualmente, a medida de deflexões do pavimento continua sendo o único método não-destrutivo confiável para determinar a condição estrutural dos pavimentos (Huang et al., 2022).

Avaliações de deflexões por ensaios não destrutivos já fazem parte da rotina do mercado de infraestrutura quando falamos de avaliação estrutural de pavimentos. Este tipo de ensaio se iniciou na década de 1950, com o emprego da viga Benkelman e teve evolução importante na década de 1980 com o advento dos equipamentos do tipo *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Todavia, em todos estes casos, a sistemática de ensaio e baixa produtividade desses equipamentos exigem a interdição de faixa para a caracterização da deflexão do pavimento, com interferência direta com os usuários.

A mudança deste paradigma ocorre agora com a possibilidade de emprego de um *Traffic Speed Deflectometer Device* (TSDd), um equipamento que permite caracterizar a resposta estrutural de um pavimento de forma contínua e em velocidade de tráfego. Esta mudança está em consonância com a Organização Mundial da Saúde (OMS) que instituiu a década de ação pela segurança no trânsito 2021-2030 com a meta de redução de 50% nas mortes e lesões no trânsito neste período.

O TSDd é um equipamento que vem sendo desenvolvido desde 1990 com um primeiro protótipo na Dinamarca (Zofka e Sudyka, 2015), com o objetivo de medir deformações nos pavimentos na velocidade do tráfego. Comparado a outros métodos de aferição das deflexões nos pavimentos mais comuns no Brasil, como Viga Benkelman e FWD, o TSDd possui a vantagem de não exigir um levantamento estático, evitando assim fechamento/interrupção de faixas e conseqüentemente oferecendo mais segurança aos operadores e usuários, além de uma maior agilidade na execução dos levantamentos. O levantamento dinâmico permite a operação da rodovia em velocidades de operação da rodovia com registros detalhados da condição estrutural em grandes extensões por dia. Em comparação com as primeiras versões do equipamento, atualmente o TSDd possui uma melhor repetibilidade dos dados, menor variação da calibração e melhor previsão das deformações (Ferne et al., 2015). Já existem diversos estudos afirmando que o TSDd possui utilização comprovada em malhas rodoviárias, sendo utilizado para levantamento das condições deflectométricas em diversos países como Reino Unido (Ferne et al., 2012), Polônia (Sudyka et al., 2021), Austrália (Muller, 2015) e Estados Unidos (Huang et al., 2022; Elseifi e Zihan, 2018).

Esta evolução na forma de medição de deflexão (dinâmica, contínua e sem interferência com o tráfego) por meio do emprego do TSDd chegou ao Brasil em 2023, ano em o meio técnico



brasileiro vivenciou três fatos relevantes: um experimento do DNIT de avaliação de aproximadamente 12.000 km realizado nos primeiros meses do ano; a publicação da norma nacional para execução deste tipo de ensaio; e a chegada e entrada em operação do Falkorr®, o primeiro TSDd de uma empresa latino-americana (figura 1).



Figura 1. Equipamento TSDd disponível no Brasil desde 2023

OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

O objetivo primordial deste trabalho foi avaliar a repetibilidade dos resultados obtidos com o equipamento Falkorr® em relação aos requisitos mínimos da norma NORMA DNIT 440/2023 – PRO para avaliação estrutural contínua de pavimentos utilizando um equipamento móvel. Apesar de haver diversos estudos na literatura internacional sobre TSDd's, ainda há uma carência de estudos em rodovias brasileiras para avaliar os resultados nas condições climáticas e de carregamento local.

Este tipo de estudo permite avaliar esta nova tecnologia disponível no meio técnico nacional de forma a se ter um suporte técnico para sua ampla utilização que implicará não apenas em benefícios técnicos mas também em termos de segurança viária, face a maior produtividade (menor tempo em pista) e eliminação da necessidade de desvio de tráfego.

MATERIAIS E MÉTODOS

O equipamento TSDd consiste basicamente em um sistema de lasers dopplers, de alta taxa de aquisição de dados, que são instalados em uma viga longa rígida dentro de um caminhão



especialmente adaptado, o qual aplica a carga ao pavimento. Os sensores lasers medem o comportamento real que ocorre no pavimento devido a uma passagem de carga de um eixo comercial de 10 toneladas. Enquanto o caminhão está em movimento, o sistema doppler mede a inclinação das velocidades verticais e horizontais da superfície do pavimento, as quais são posteriormente numericamente integradas para se obter as bacias deflectométricas.

Como a caracterização estrutural com o Falkorr® ocorre na velocidade de tráfego de um caminhão se deslocando pela via, o equipamento permite caracterizar a deflexão de um pavimento:

- de forma contínua, e não amostral, em que pese o impacto que o espaçamento do FWD gera nos projetos de restauração de uma via, por exemplo (Oshima *et al.*, 2023);
- com grande acurácia, repetibilidade e reprodutibilidade (Muller, 2015; e Sudyka *et al.*, 2021);
- com elevada produtividade (Březina *et al.*, 2017), o que implica em menor tempo em pista para realização dos ensaios – e, portanto, menor exposição para os técnicos envolvidos nos ensaios e para os usuários das rodovias;
- sem a necessidade de operação de desvio do tráfego, ou seja, com menor interferência com os usuários e, portanto, maior segurança (e redução do nível de risco de ocorrerem acidentes).

Os resultados podem ser utilizados para monitoramento de vias, projetos de recuperação e planos de investimentos, caracterizando de forma mais precisa e eficiente os locais que efetivamente necessitam de intervenções estruturais. Há, ainda, benefícios para os usuários das rodovias, visto que os ensaios ocorrem sem a necessidade de desvios de tráfego (e a conseqüente redução de velocidade), implicando em melhor condição de deslocamento e menor exposição destes a riscos desnecessários de acidentes.

O princípio de medição está na caracterização da velocidade de deslocamento do pavimento com o emprego de diversos sensores laser doppler, capazes de verificar o movimento de um ponto através da mudança no comprimento de onda de um sinal. Ou seja, no Falkorr® os lasers emitem sinais conhecidos e captam a mudança destes após a sua reflexão pelo pavimento, caracterizando a velocidade de deslocamento da superfície pela mudança do comprimento de onda deste sinal. Com esta informação, determina-se a deflexão do pavimento sob a ação da carga do reboque onde está fixado o equipamento.

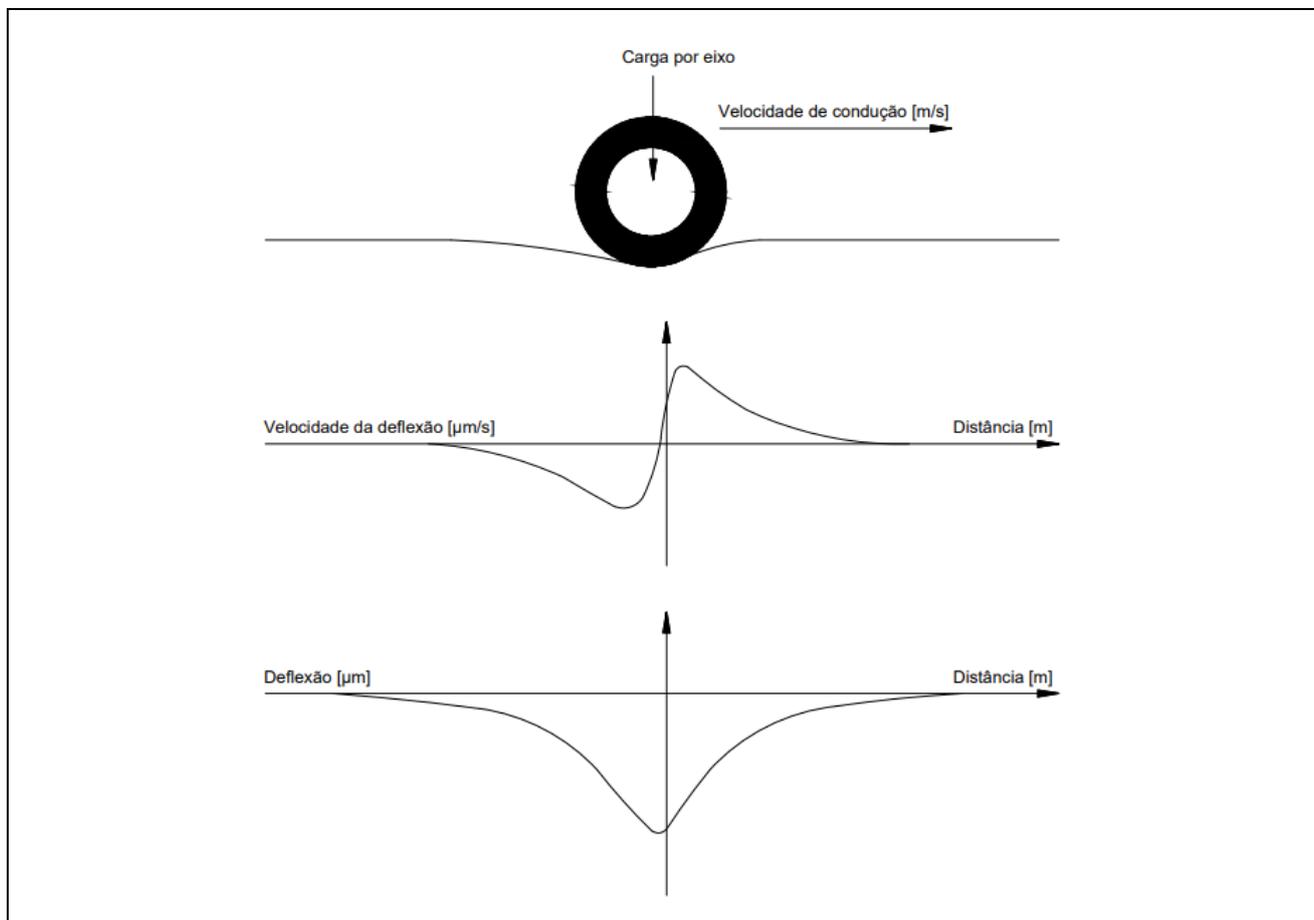


Figura 2. Princípio de funcionamento do Falkorr®

Há sensores laser antes e após a carga de roda do reboque em que está posicionado o equipamento, permitindo a caracterização completa da bacia de deflexões. Complementarmente, há dispositivos de controle e registro de temperaturas, pressão dos pneus, hodômetro de alta precisão e GPS, permitindo a caracterização completa dos demais parâmetros que influem na condição de ensaio deflectométrico. Outros sistemas, como o PavScan®, sistemas de imageamento e georadar (GPR), podem ser sincronizados com o equipamento para que a coleta de dados ocorra de forma unificada e integrada em uma única passagem, atendendo à normativa do DNIT para este tipo de ensaio (DNIT, 2023), como ilustrado a seguir (Figura 3).

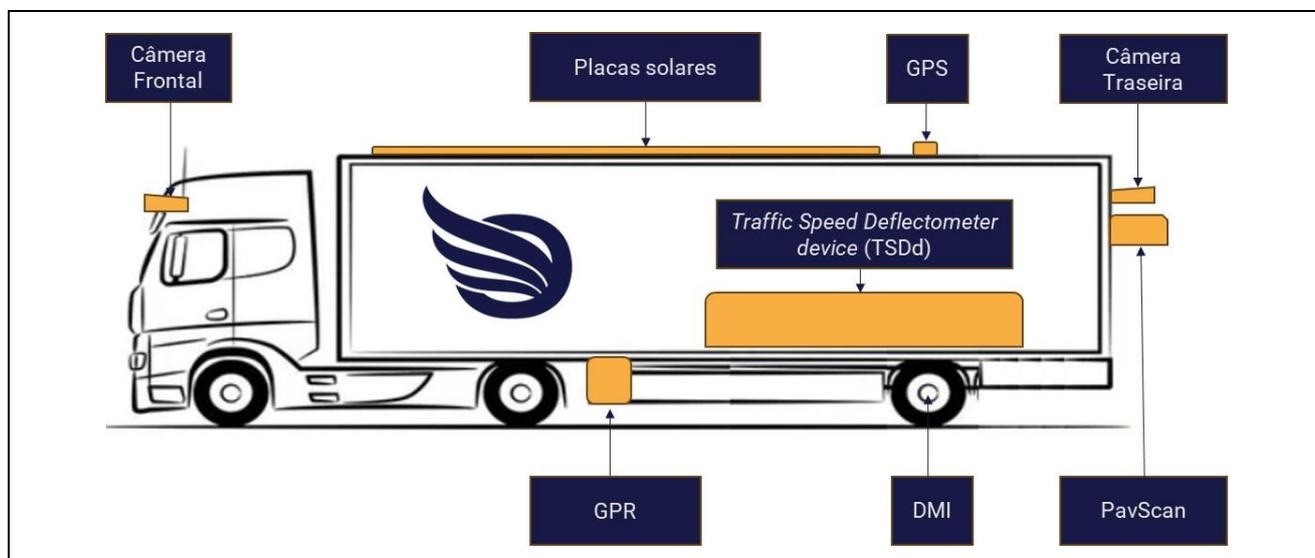


Figura 3. Configurações possíveis do Falkorr

METODOLOGIA

A avaliação da repetibilidade do equipamento Falkorr® para medição da condição estrutural dos pavimentos foi realizada empregando a metodologia de validação estrutural preconizada na normativa de procedimento de levantamento estrutural e funcional utilizando equipamento móvel DNIT 440/2023-PRO. Para o presente estudo, optou-se por utilizar somente o módulo de avaliação estrutural, tendo em vista que o PavScan® vem sendo utilizado no Brasil há mais de uma década com resultados satisfatórios. Na figura 4 estão descritas as etapas consideradas.

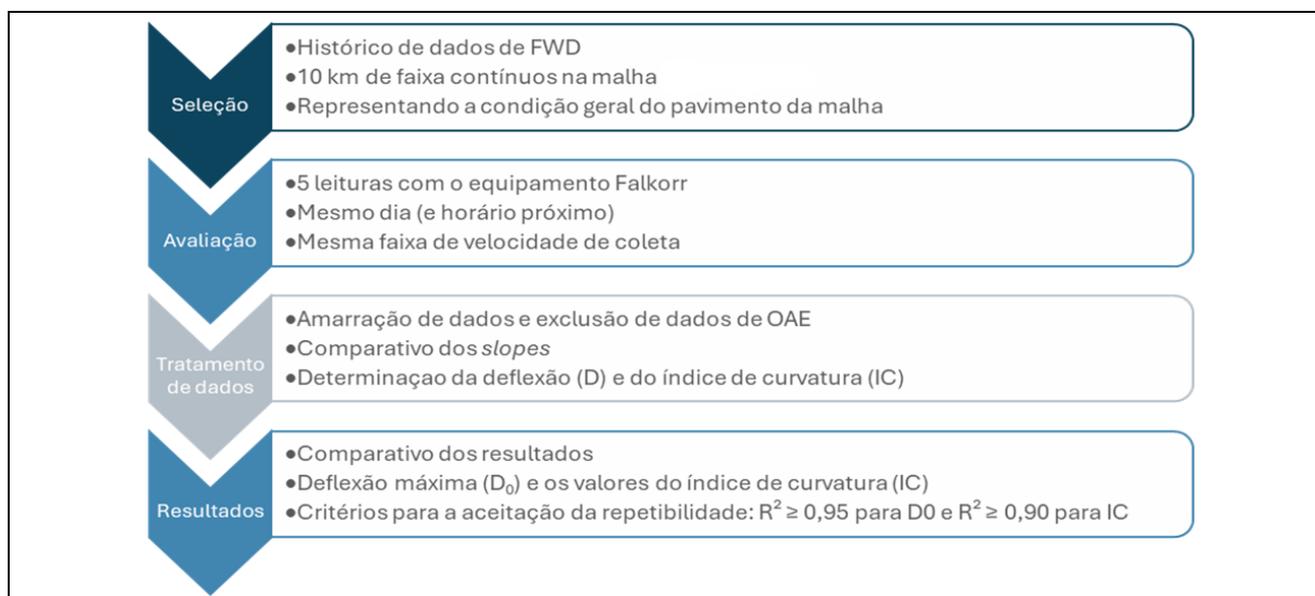


Figura 4. Fluxograma das etapas do estudo



Inicialmente, foi selecionado um trecho teste de rodovia situado na malha rodoviária concedida com um total de 10 km de faixa contínuos, tendo como base o histórico de avaliações que vem sendo realizadas com ensaios deflectométricos com FWD. A partir da análise estatística dos resultados deflectométricos levantados com o FWD na campanha de monitoramento de 2023, foi possível analisar o comportamento estrutural e a distribuição de deflexões representativa da malha rodoviária sob análise. Na sequência, buscou-se selecionar um segmento de faixa contínuo, com poucas interferências, que possibilitasse o levantamento das cinco passagens do equipamento Falkorr®, em um curto intervalo de tempo, de forma a minimizar possível fatores externos (como por exemplo variação de temperatura/umidade), e que tivesse uma distribuição geral de deflexões que representasse bem a condição geral da malha em questão.

A Tabela 1 apresenta as condições estatísticas da malha viária em questão e as condições estatísticas do segmento de 10 quilômetros eleito para avaliação com o Falkorr®.

Tabela 1. Parâmetros representativos da malha e do trecho teste, em termos de deflexão

Parâmetro	Malha Concessionada	Trecho Teste (10 km)
Média	$27,6 \times 10^{-2}$ mm	$28,5 \times 10^{-2}$ mm
Mediana	$24,4 \times 10^{-2}$ mm	$24,4 \times 10^{-2}$ mm
1º Quartil	$34,0 \times 10^{-2}$ mm	$33,6 \times 10^{-2}$ mm
3º Quartil	$18,5 \times 10^{-2}$ mm	$20,4 \times 10^{-2}$ mm

A partir dos dados levantados em campo, determinou-se a inclinação das velocidades de deslocamento da superfície dos pavimentos (*deflection slopes*) e posterior determinação da deflexão e índices de curvatura (IC), além de serem registradas as informações da temperatura ambiente e da superfície do pavimento e coordenadas GPS, bem como data e hora dos ensaios. Optou-se por utilizar a inclinação dos deslocamentos (*deflection slopes*) para evitar a dependência dos dados na velocidade do veículo, onde a velocidade de deslocamento é dividida pela velocidade instantânea do veículo para se obter uma medida da inclinação de deslocamento (Ferne *et al*, 2008). A velocidade de deslocamento é medida em mm/s e a velocidade do levantamento em m/s, resultando, portanto, em medidas de inclinação de deslocamento em mm/m.

Os registros foram obtidos avaliados compilados em valores médios a cada 10m e 100m, associando-se às informações complementares, tais como:

- Identificação do local de ensaio, velocidade de coleta e observações pertinentes;
- Dados de inclinação de deslocamento de cada um dos treze sensores laser Doppler, posicionados a -450, -200, -100, 100, 200, 300, 450, 600, 750, 900, 1200, 1500, 2000 mm do eixo traseiro, apresentadas em $\mu\text{m}/\text{m}$;
- Temperatura do ar e do pavimento, em $^{\circ}\text{C}$;
- Deflexão determinada a 0 e a 200 m do eixo traseiro (D_0 e D_{20});
- Data e hora do ensaio;
- Informações do GPS.

De forma ilustrativa, tem-se na Figura 5, os gráficos do perfil das inclinações de deslocamento registradas a 200 mm do eixo de carga do equipamento nas cinco passagens do equipamento.

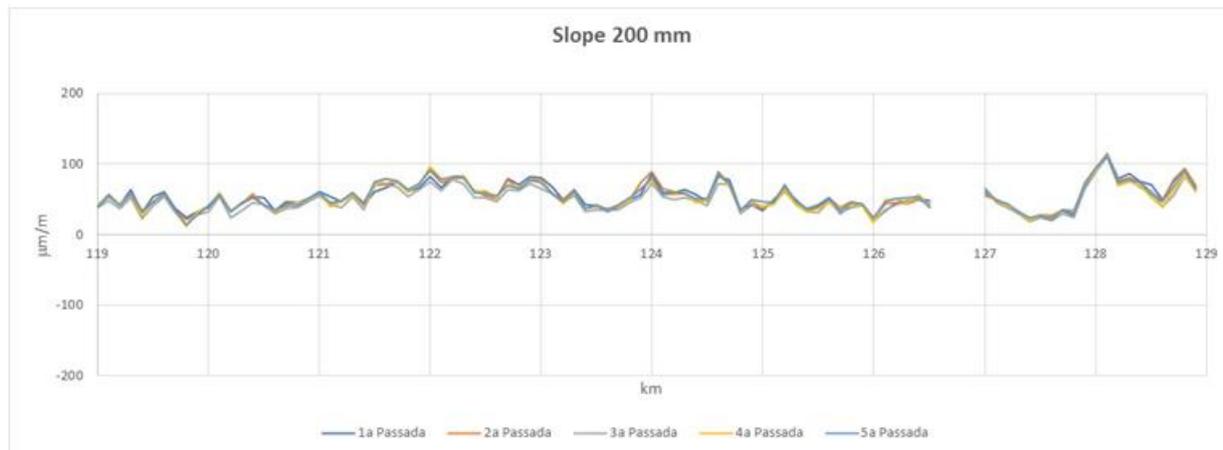


Figura 5. Exemplo de inclinação de deslocamento (slope) a 200 mm do eixo da carga

Nas Figuras 6 e 7, temos imagens do equipamento Falkorr® em operação durante os levantamentos em questão, que se deram em apenas um dos períodos do dia e ocorreram sem nenhuma interferência com os usuários da rodovia e sem exposição para os trabalhadores envolvidos na realização dos ensaios.



Figura 6. Imagens do Falkorr® em operação em velocidade de tráfego na SP-070



Figura 7. Apresentação do equipamento Falkorr® em área de refúgio de base de balança móvel na SP-070 antes da avaliação do trecho teste

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados foram comparados de forma estatística para a avaliação da repetibilidade dos resultados, conforme previsto na norma DNIT 440/2023-PRO. Usando os mesmos conjuntos de cinco execuções, a repetibilidade interna do sistema foi avaliada comparando cada execução com os valores médios de 100 m. A comparação foi realizada para a deflexão máxima modelada (D_0) e o índice de curvatura (IC) com os valores médios de 100 m. Os critérios para a aceitação da repetibilidade interna são $R^2 \geq 0,95$ e $R^2 \geq 0,90$, para os valores de deflexão máxima e índice de curvatura modelados, respectivamente. Os resultados da avaliação de repetibilidade interna do sistema são apresentados na sequência (Tabela 2) para a deflexão máxima modelada.

Tabela 2. Avaliação de repetibilidade interna do sistema em termos de R^2 da Deflexão Máxima

Passada	1	2	3	4	5
1	1				
2	0,98	1			
3	0,98	0,98	1		
4	0,97	0,99	0,98	1	
5	0,97	0,98	0,98	0,99	1



Como se pode observar, os resultados obtidos foram satisfatórios ($R^2 \geq 0,95$), sendo que o valor médio do R^2 foi de 0,981. Os resultados da avaliação de repetibilidade interna do sistema são apresentados na sequência para o índice de curvatura (IC) – diferença entre a deflexão sob a carga e a 200 mm da mesma.

Tabela 3. Avaliação de repetibilidade interna do sistema em termos de R^2 do Índice de Curvatura

Passada	1	2	3	4	5
1	1				
2	0,98	1			
3	0,97	0,98	1		
4	0,97	0,99	0,99	1	
5	0,97	0,98	0,99	0,99	1

Como se pode observar, os resultados obtidos foram satisfatórios ($R^2 \geq 0,90$), sendo que o valor médio do R^2 foi de 0,983. Sendo assim, conclui-se que o Falkorr® apresentou condições satisfatórias de repetibilidade interna do sistema para ambos os parâmetros (deflexão máxima e índice de curvatura modelados) e em concordância com a norma do DNIT.

RESUMO E CONCLUSÃO

O presente documento apresentou o estudo de repetibilidade dos ensaios deflectométricos realizados de forma contínua com o *Traffic Speed Deflectometer Device* (TSDd) Falkorr®. Nesta etapa, constatou-se que o Falkorr® apresentou resultados adequados em termos de repetibilidade em conformidade com as exigências da norma DNIT 440/2023-PRO - Levantamento funcional e estrutural contínuo de pavimentos utilizando um equipamento móvel.

Após a consolidação dos dados das cinco passagens do equipamento pelo trecho constatou-se que:

- Os resultados em termos de deflexão sob a carga indicam um R^2 médio de 0,981, superior ao exigido em norma, de $R^2 \geq 0,95$;
- Em termos de índice de curvatura (IC) o valor médio do R^2 foi de 0,983, também atendendo a exigência da norma do DNIT, de $R^2 \geq 0,90$.

Sendo assim, conclui-se que o Falkorr apresentou condições satisfatórias de repetibilidade interna do sistema para ambos os parâmetros (deflexão máxima e índice de curvatura modelados) e em concordância com a norma do DNIT e que esta tecnologia de realização de ensaios deflectométricos de forma contínua e em velocidade de tráfego é efetiva e está operacional no Brasil.



REFERÊNCIAS

Březina I., Stryk K., Grošek J. Using traffic speed deflectometer to measure deflections and evaluate bearing capacity of asphalt road pavements at network level. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Volume 236, 2017

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. NORMA DNIT 440/2023 – PRO: Pavimentação – Levantamento funcional e estrutural contínuo de pavimentos utilizando um equipamento móvel – Procedimento. Rio de Janeiro: IPR, 2023.

Ferne B. W., P. Langdale, N. Round, & R. Fairclough. Development of a calibration procedure for the UK Highways Agency Traffic Speed Deflectometer. Presented at the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2008.

Ferne B. W., Drusin S., Baltzer S., Langdale P., Meitei B. UK Trial to compare 1st and 2nd Generation Traffic Speed Deflectometers. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlim, Alemanha, 2015

Huang B., Zhang M., Gong H., Polaczyk P. Evaluation of Traffic Speed Deflectometer for Collecting Network-Level Pavement Structural Data in Tennessee. Final Report. Department of Civil and Environmental Engineering. The University of Tennessee, Knoxville. No RES2020-08, 2022

Muller W. A comparison of TSD, FWD and GPR field measurements. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlim, Alemanha, 2015

Oshima, S., Louzane, G., Camargo, F. F., & Vale, A. F. O impacto do espaçamento do FWD em projetos de restauração. Artigo Científico, v 2, 2023.

Sudyka J., Harasim P., Kowalska-Sudyka M, Mechowski T. Quality control of traffic speed deflectometer measurements on road network. Roads and Bridges 20. P 441 – 450, 2021

Zofka A., Sudyka J. Traffic Speed Deflectometer (TSD) Measurements for Pavement Evaluation. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlim, Alemanha, 2015