

Relatório de Pesquisa IPR RP – 001

**ANÁLISE PRELIMINAR DO USO DO iPAVe  
(INTELLIGENT PAVEMENT ASSESSMENT  
VEHICLE) NA GESTÃO DE RODOVIAS**

BRASÍLIA/DF

JUNHO/2023

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES  
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES  
DIRETORIA-GERAL  
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA  
INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTES

Relatório de Pesquisa IPR RP – 001

# **ANÁLISE PRELIMINAR DO USO DO iPAVe (INTELLIGENT PAVEMENT ASSESSMENT VEHICLE) NA GESTÃO DE RODOVIAS**

Elaboração: Eng. Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, DSc.

Diretor de Planejamento e Pesquisa

Processo: 50600.024123/2023-40

Brasília/DF

Junho/2023

**AUTORES:**

Eng.º Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, DSc. – DNIT/DPP

Eng.ª Marília Bomtempo Pereira – DNIT/CGPLAN

Eng.º Bruno Vendramini dos Santos, Esp. – DNIT/DPP

Eng.º André de Oliveira Nunes, MSc. – DNIT/CGPLAN

**COMISSÃO DE REVISÃO:**

Eng.º Nelson Wargha Filho, MSc. – DNIT/DPP/IPR

Eng.ª Emmanuelle Stefânia Holdefer Garcia, DSc. – Consórcio STE/SIMEMP

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria-Geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas em Transportes.

Análise Preliminar do Uso do iPAVe (Intelligent Pavement Assessment Vehicle) na Gestão de Rodovias – Brasília/DF, 2023.

45 p. (Relatório de Pesquisa IPR RP – 001)

Reprodução permitida desde que citado o DNIT como fonte.  
Impresso no Brasil / *Printed in Brazil*

## RESUMO

A gestão rodoviária abrange uma série de iniciativas que dependem fortemente de informações relativas ao estado de sanidade dos pavimentos. No Brasil, devido à significativa extensão de sua rede rodoviária, ainda aquém, no entanto, da real necessidade, o sistema de gerenciamento de pavimentos realizado atualmente pelo DNIT está calcado fortemente em dados funcionais do pavimento. Porém, a tendência internacional avança no uso de análises estruturais para aumentar a confiabilidade nas decisões de gestão. A tecnologia iPAVe, aliada com equipamentos que medem a deflectometria contínua em altas velocidades, vem sendo utilizado em diferentes países na gestão das redes rodoviárias. O DNIT realizou projeto-piloto em aproximadamente 13.000 km para testar essa tecnologia. O trabalho demonstrou que os dados obtidos pelo iPAVe estão coerentes com os resultados realizados por outros equipamentos e, mais ainda, permitiu observar o grande potencial de realizar as campanhas de avaliação funcional e estrutural ao mesmo tempo com um único veículo. A implementação desta tecnologia no país certamente irá mudar o paradigma da gestão de rodovias, trazendo rapidez na obtenção das informações necessárias e aumentando a assertividade na gestão de pavimentos rodoviários.

**Palavras-chave:** gestão rodoviária, *traffic speed deflectometer*.

## ABSTRACT

Road management encompasses a series of initiatives that depend heavily on information regarding the state of the pavements. In Brazil, due to the significant extension of its road network, still short, however, of the real need, the pavement management system currently implemented by DNIT was heavily based on functional pavement data. However, the international trend advances in the use of structural analyzes to increase the reliability of management decisions. The use of iPAVe technology, combined with equipment that measures continuous deflection at high speeds, has been used in different countries in the management of road networks. DNIT carried out a pilot project in approximately 13,000 km to test this technology. The work demonstrated that the data obtained by the iPAVe are consistent with the results obtained by other equipment and, even more, allowed observing the great potential of carrying out the functional and structural evaluation campaigns at the same time with just a vehicle. The implementation of this technology in the country will certainly change the paradigm of road management, bringing speed in obtaining the necessary information and increasing assertiveness in the management of road pavements.

**Keywords:** *road management, traffic speed deflectometer.*

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ATR	Afundamento na Trilha de Roda
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estrada de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DPP	Diretoria de Planejamento e Pesquisa
FWD	Falling Weight Deflectometer
GEIPOT	Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
ICS	Índice de Condição da Superfície
IGGE	Índice de Gravidade Global Expedito
iPAVe	Intelligent Pavement Assessment Vehicle
IPR	Instituto de Pesquisas em Transportes
IRI	International Roughness Index
LCMS	Laser Crack Measurement System
MPD	Mean Profile Depth
PNUD	Programa das Nações Unidas para Desenvolvimento
TSD	Traffic Speed Deflectometer
VDR	Veículo de Diagnóstico de Rodovia

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Veículo iPAVe da empresa AARB Systems realizando levantamento de rodovias federais para o DNIT.....	11
Figura 2 – Trajeto realizado pelo veículo iPAVe em rodovias federais.....	12
Figura 3 – Configuração básica do TSD .....	14
Figura 4 – Método de cálculo da deflexão a partir dos dados obtidos pelo TSD .....	15
Figura 5 – Dados de IRI na BR-232/PE: (a) histograma comparativo; (b) comparativo da extensão total analisada .....	17
Figura 6 – Comparativo das médias móveis dos dois conjuntos de dados de IRI para: (a) segmento na BR-232/PE; (b) segmento na BR-316/PE .....	18
Figura 7 – Comparativo das médias móveis dos dois conjuntos de dados de IRI para: (a) segmento na BR-116/CE; (b) segmento na BR-116/BA.....	19
Figura 8 – Histogramas para os dois conjuntos de dados de IRI para: (a) segmento na BR-116/CE; (b) segmento na BR-116/BA .....	20
Figura 9 – Comparativo das médias móveis dos dados de IRI para: (a) segmento 1 da BR-010/MA; (b) segmento 2 da BR-010/MA .....	20
Figura 10 – Comparativo das médias móveis dos dados de ATR para: (a) segmento na BR-232/PE; (b) segmento na BR-316/PE .....	21
Figura 11 – Comparativo das médias móveis dos dois conjuntos de dados de ATR para: (a) segmentos na BR-116/CE; (b) segmentos na BR-116/BA .....	22
Figura 12 – Histogramas para os dois conjuntos de dados de ATR para: (a) segmento na BR-316/PE; (b) segmento na BR- 116/BA .....	22
Figura 13 – Comparativo das médias móveis dos dados de ATR para: (a) segmento 1 na BR-010/MA; (b) segmento 2 na BR-010/MA .....	24
Figura 14 – Condição do pavimento da BR-010/MA no km 236 no ano de 2022, sentido crescente .....	24
Figura 15 – Acidente envolvendo equipamento FWD durante o levantamento deflectométrico em rodovia federal .....	26
Figura 16 – Comparativo entre as deflexões máximas para o iPAVe e o FWD em dois segmentos da BR-020/CE: (a) segmento 1; (b) segmento 2 .....	27
Figura 17 – Comparativo entre os raios de curvatura para o iPAVe e o FWD em dois segmentos da BR-020/CE: (a) segmento 1; (b) segmento 2 .....	28
Figura 18 – Comparativo entre os dados do iPAVe e do FWD para um segmento na BR-343/PI: (a) deflexão máxima; (b) raio de curvatura .....	29

Figura 19 – Comparativo entre os dados do iPAVe e FWD para um segmento na BR-116/PE: (a) deflexão máxima; (b) raio de curvatura .....	29
Figura 20 – Dados dos pontos de deflexão do iPAVe e do FWD na rodovia BR-020/CE (D0, D20, D30 e D45).....	30
Figura 21 – Dados dos pontos de deflexão (D0, D20, D30 e D45) do iPAVe e do FWD para: (a) segmento na BR-343/PI; (b) segmento na BR-116/PE .....	31
Figura 22 – Bacias deflectométricas para um segmento de 1,0 km da BR-020/CE.....	32
Figura 23 – Comparativo entre os dados do FWD e iPAVe para um segmento da BR-020/CE: (a) deflexão máxima; (b) raio de curvatura .....	32
Figura 24 – Dados de deflexão e IRI do segmento rodoviário entre os km 229 e 240 da BR-010/MA .....	33
Figura 25 – Evolução da média do IRI e IGGE do segmento rodoviário entre os km 229 e 240 da BR-010/MA .....	34
Figura 26 – Aspecto visual do km 297 na rodovia BR-020/CE ao longo dos anos de 2015 a 2023 .....	35
Figura 27 – Aspecto visual do km 292 na rodovia BR-020/CE em 2023: (a) fissuras na superfície do pavimento; (b) aspecto visual .....	36
Figura 28 – Imagem processada demonstrando fissuras na superfície do pavimento da BR-010/MA no km 289: (a) de acordo com o grau de severidade e (b) fotografia do local .....	38
Figura 29 – Macrotextura da rodovia BR-116/CE: (a) variação do MPD; (b) aspecto visual da superfície do pavimento no km 354 .....	39
Figura 30 – Macrotextura da rodovia BR-116/PB: (a) variação do MPD; (b) aspecto visual da superfície do pavimento no km 10 .....	39
Figura 31 – Aspecto visual de painéis e outros defeitos no pavimento do segmento da BR-010/MA no km 237 .....	40

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>CONCEITOS DO TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER (TSD).....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1</b>	<b>AVALIAÇÃO DO IRI COM O iPAVe.....</b>	<b>16</b>
<b>3.2</b>	<b>AVALIAÇÃO DO ATR COM O iPAVe .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3</b>	<b>AVALIAÇÃO DEFLECTOMÉTRICA COM O TSD .....</b>	<b>25</b>
<b>3.4</b>	<b>MACROTEXTURA, ÁREA TRINCADA E INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES .....</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A gestão de rodovias no Brasil é um desafio complexo, mas necessário. Apesar de ser um país com baixa densidade de rodovias quando se observam países com áreas similares, o Brasil atualmente possui uma rede rodoviária pavimentada de aproximadamente 213.000 km, considerando as três esferas federativas, extensão que lhe garante a 13ª posição no ranking mundial.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) tem um importante histórico na avaliação das rodovias federais pavimentadas, visando fornecer dados para a gestão de rodovias sob sua jurisdição. A introdução do conceito de gestão de pavimentos no Brasil teve início no momento que o Programa das Nações Unidas para Desenvolvimento (PNUD) e a extinta Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT), juntamente com o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), desenvolveram uma ampla pesquisa sobre custos rodoviários em conjunto com nove países (VISCONTI, 2000).

Desde então, a rede rodoviária federal vem sendo avaliada, principalmente, em relação aos aspectos funcionais da condição dos pavimentos. Para tanto, criou-se um índice de condição da superfície (ICS) baseado no *International Roughness Index* (IRI) e no índice de gravidade global expedito (IGGE), apresentados na norma DNIT 008/2003 - PRO. Em 2022, quase um terço (32 %) da extensão pavimentada das rodovias federais, sob gestão do DNIT foram classificadas em situação ruim, 25 % regular e 43 % classificadas como bom. As informações coletadas pelo DNIT são utilizadas em diversas áreas, seja para o planejamento orçamentário, precificação do ativo ao longo dos anos ou para a gestão da rede.

Dentre os equipamentos utilizados para a avaliação funcional dos pavimentos, o DNIT conta com equipamentos oriundos de empresas de consultoria. Atualmente, a Diretoria de Planejamento e Pesquisa (DPP) conta com três empresas de levantamento de campo e uma consultoria que realiza a gestão das informações coletadas. Os veículos utilizados são equipados com câmeras de alta definição que

realizam a filmagem da rodovia, bem como equipamentos para avaliação da trilha de roda (ATR), IRI e posicionamento geográfico.

Outro aspecto importante relacionado à avaliação funcional dos pavimentos refere-se à segurança viária, especificamente quando se trata da macrotextura. O referido parâmetro é diretamente relacionado à frenagem dos veículos, e tem ficado restrito apenas às avaliações pontuais realizadas pelos ensaios de mancha de areia ou em avaliações contínuas de pavimentos de aeródromos. Desta forma, não há no Brasil, informações sobre a avaliação da macrotextura em pavimentos a nível de rede em rodovias.

Embora sejam realizadas avaliações sobre a condição superficial do pavimento, estas não refletem a sua condição estrutural. A ausência de informações sobre o histórico de construção dos pavimentos ao longo dos anos, bem como a condição estrutural na qual se encontram, certamente reduzem o grau de assertividade na tomada de decisões relacionadas a ações necessárias para a manutenção dos pavimentos. HUYNH et al. (2021) indicaram que apenas 13 % dos Departamentos Estaduais no EUA utilizam dados estruturais na gestão rodoviária em nível de rede. Outros trabalhos demonstraram que há uma baixa relação entre a condição estrutural do pavimento com as condições funcionais (BRYCE, 2013; AHMED, 2022).

Nesse contexto, a tendência internacional de complementar informações sobre a capacidade estrutural, além daquelas ligadas à condição funcional dos pavimentos, está permitindo melhores análises qualitativas em nível de rede. A avaliação estrutural auxilia na compreensão do processo de deterioração dos pavimentos ao longo de sua vida útil, bem como permite melhor definição dos segmentos homogêneos ou em novos processos para proposição de soluções de manutenção com dados obtidos em nível de rede (DIEFENDERFER, 2019; MILLER, 2019; MOUNZER, 2019; TETLEY, 2019; NAZARIAN, 2022).

O uso do *Falling Weight Deflectometer* (FWD) vem sendo adotado, principalmente, a nível de projeto, apesar de algumas concessões serem obrigadas a realizar campanhas de FWD por exigência contratual nos planos de exploração rodoviária.

Para melhorar a gestão do ativo rodoviário, o DNIT realizou uma grande campanha de avaliação estrutural ao longo dos anos de 2020 e 2021. Foram nove equipamentos FWD e quase 24 meses para levantar aproximadamente 52.000 km de rodovias federais, em intervalos de 200 m intercalados em cada faixa de tráfego, totalizando mais de 266.000 bacias de deflexão. O tamanho levantamento foi inédito no país.

O levantamento estrutural da malha rodoviária foi realizado em momentos distintos dos levantamentos funcionais. A defasagem temporal entre as duas informações pode dificultar análises e, conseqüentemente, o processo de decisão. Em decorrência do período demandado para a realização dos levantamentos e os custos envolvidos para repetir este tipo de avaliação funcional e estrutural, o DNIT buscou novas ferramentas para sua realização e formas de fazê-las simultaneamente, reduzindo custos e tempo dispendido nos levantamentos. O *Traffic Speed Deflectometer* (TSD), em conjunto com demais equipamentos, forma o *Intelligent Pavement Assessment Vehicle* (iPAVe), tecnologia que é, atualmente, o estado da arte neste tipo de proposta (Figura 1). O presente trabalho é o primeiro de uma série de publicações e irá apresentar os resultados de um projeto-piloto utilizando o iPAVe, realizado pela Diretoria de Planejamento e Pesquisa, em conjunto com a empresa de consultoria ARRB Systems, baseada na Austrália.



**Figura 1 – Veículo iPAVe da empresa AARB Systems realizando levantamento de rodovias federais para o DNIT**

A Figura 2 apresenta o trajeto realizado pelo veículo no Brasil. A escolha das rodovias e das regiões por onde o veículo passou baseou-se na necessidade de realizar o levantamento, principalmente, em rodovias não concedidas, considerando que o foco do trabalho é a atuação do DNIT na gestão da malha. Portanto, optou-se por levar o iPAVe para as regiões nordeste, norte e centro-oeste, passando por algumas rodovias no Sudeste em função do ponto de partida e chegada do equipamento ser o Porto de Santos/SP.



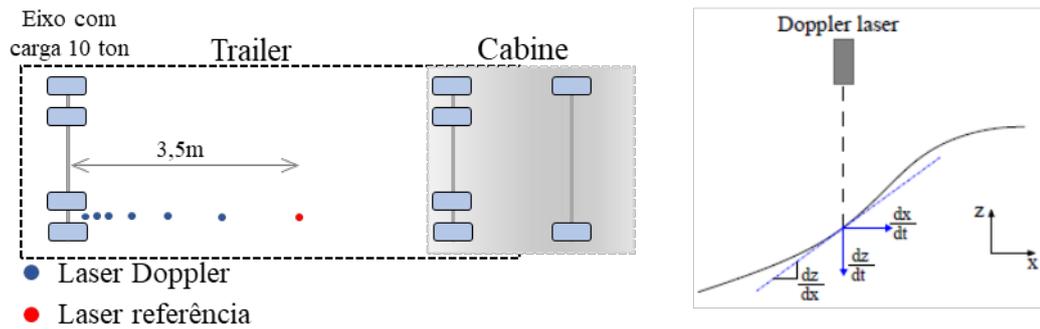
**Figura 2 – Trajeto realizado pelo veículo iPAVe em rodovias federais**

## 2 CONCEITOS DO TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER (TSD)

O *Traffic Speed Deflectometer* (TSD) é o equipamento que permite a determinação da bacia de deflexão dos pavimentos de forma contínua e em velocidade próxima do tráfego e compõe o iPAVe com demais equipamentos de avaliação de pavimentos, como será mencionado posteriormente. Existem outros leitores de deflexão que promovem a leitura pontual de bacias deflectométricas, porém em velocidades baixas, como o Curviômetro e o La Croix. Ambos os equipamentos possuem normativos aprovados no âmbito do DNIT. O primeiro determina as bacias de deflexão por meio de geofones, processo similar ao FWD. O equipamento La Croix, por outro lado, possui processo de aquisição de dados semelhante ao da viga Benkelman. Nenhum dos dois equipamentos teve grandes avanços no Brasil ou em outros países, muito em função do desenvolvimento do TSD nos últimos 15 anos.

O TSD realiza as leituras em velocidades próximas a 80 km/h. Os sensores utilizados para calcular a deflexão do pavimento são lasers Dopplers. Eles determinam a velocidade de deslocamento vertical do pavimento à medida em que a carga é aplicada pelo eixo do veículo. Portanto, é importante frisar que o laser não determina diretamente a deflexão do pavimento, mas sim a velocidade de deslocamento vertical de um determinado ponto na superfície do pavimento. Este esclarecimento torna-se importante pois existe um pós-processamento dos dados para se chegar à bacia deflectométrica que usualmente os engenheiros de pavimentação utilizam para realizar as análises estruturais dos pavimentos. Por sua vez, com a informação da velocidade de deslocamento da superfície, o TSD determina a inclinação da deflexão do pavimento, conforme a Equação 1.

A Figura 3 ilustra a configuração básica do TSD.



**Figura 3 – Configuração básica do TSD**

Fonte: Adaptado de Nielsen, N. R. (2021)

Equação 1:

$$S(\text{slope}) = \frac{V_v}{V_H} = \frac{dz}{dx} \quad (1)$$

Onde:

$S(\text{slope})$  é a inclinação da deflexão do pavimento (adimensional);

$V_v$  é a velocidade vertical da superfície do pavimento ( $\frac{dz}{dt}$ ), expressa em quilômetros por hora (km/h);

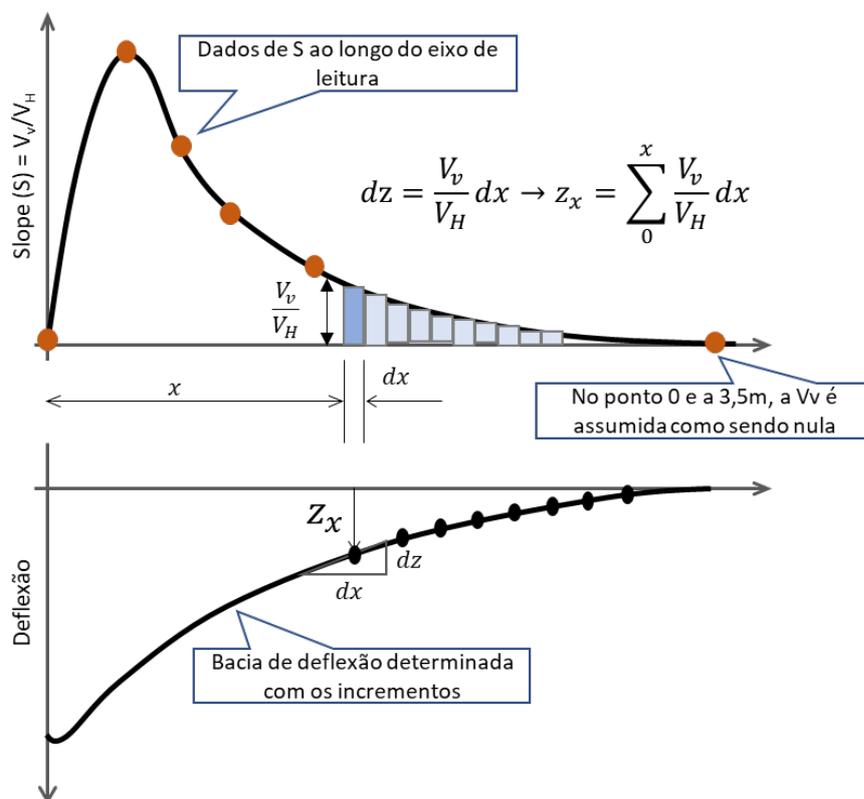
$V_H$  é a velocidade do veículo ( $\frac{dx}{dt}$ ), expressa em quilômetros por hora (km/h).

Os dados são obtidos, geralmente, a 900 Hz e a altura da viga que sustenta os lasers é de 1,23 m ( $\pm 15$  mm). Em face dos movimentos que ocorrem durante o trajeto, a viga é auxiliada por um sistema de servo motores elétricos, suspenso em um amortecimento a ar. O objetivo é atuar constantemente, abaixando e levantando a viga, enquanto o veículo trafega na rodovia, de acordo com o laser de referência, mantendo a viga sempre próxima da distância ótima.

O cálculo da deflexão é realizado por meio de integração numérica de uma curva modelada a partir dos dados da inclinação  $S$ . Para tanto, utiliza-se a premissa de que sob o eixo, a velocidade de deslocamento vertical é nula, tendo em vista que, neste

ponto, o pavimento para de se deslocar para baixo e está prestes a iniciar seu deslocamento para cima. Da mesma forma, para a distância relativa ao laser de referência (3,5 m), como não há interferência da carga, a velocidade também é nula (Figura 4). Assim, a sequência de cálculo é a seguinte:

- i. Construir gráfico do valor de S em função da distância do eixo;
- ii. Assumir os valores nulos para os pontos 0 m e 3,5 m;
- iii. Construir modelo para os dados;
- iv. Promover a integração numérica para determinar a deflexão em diferentes pontos e construir a bacia deflectométrica.



**Figura 4 – Método de cálculo da deflexão a partir dos dados obtidos pelo TSD**

Fonte: Adaptado de ARRB Systems (2022)

### 3 RESULTADOS

O projeto-piloto realizado pelo DNIT alcançou o total de 12.955 km de faixas levantadas pelo iPAVe em 55 dias. Esse período considerou as folgas das equipes, bem como eventuais necessidades de calibração do equipamento ou problemas técnicos. Com um planejamento mais detalhado, estima-se que é possível realizar o levantamento de 55.000 km de faixas em até 180 dias. Ressalta-se que, além de fornecer a avaliação estrutural do pavimento de forma contínua, o iPAVe permite alcançar avaliações funcionais e geométricas que até então, o DNIT não obtinha em seus levantamentos funcionais.

Um dos principais objetivos do projeto-piloto é avaliar como o iPAVe poderá melhorar o sistema de gestão rodoviária, especificamente do pavimento. Para isso, buscou-se realizar um comparativo com os dados obtidos pelo procedimento atualmente adotado pelo DNIT, aqui denominado veículo de diagnóstico de rodovia (VDR), tanto em relação aos aspectos funcionais (IRI e ATR) quanto aos estruturais (deflexão, raio de curvatura). Destaca-se que nas rodovias federais não foram realizados levantamentos repetidos do iPAVe em um mesmo segmento em função do prazo disponível para a permanência do veículo no país. Nesse sentido, escolheu-se realizar os levantamentos em diferentes regiões do país, capturando climas e estruturas de pavimentos distintos, o que permitiu avaliar de uma melhor forma o comportamento do iPAVe para fins de planejamento no âmbito da Autarquia.

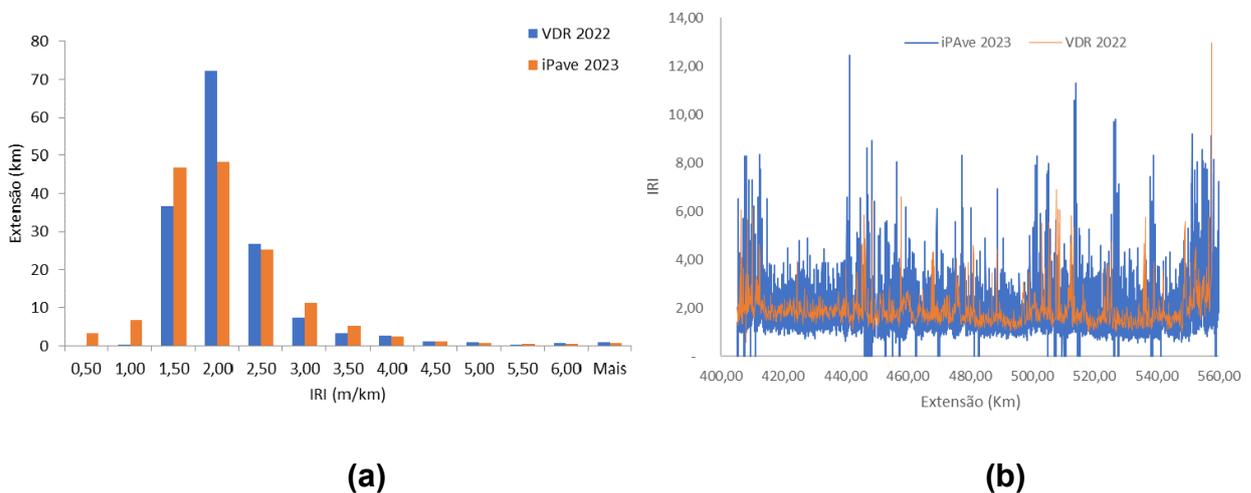
Como uma das limitações do iPAVe, ressalta-se a necessidade de interrupção da realização do levantamento, durante períodos de chuva. A existência de uma película de água livre na superfície do pavimento impede que algumas informações sejam processadas. O laser Doppler é um dos sistemas que não funcionam com a água na superfície do pavimento.

#### 3.1 AVALIAÇÃO DO IRI COM O iPAVe

A irregularidade longitudinal (IRI) embarcada no iPAVe atende às especificações internacionais que tratam do tema. O equipamento fornece dados do IRI para as duas

trilhas de roda, bem como sua média. A precisão alcançada pelo equipamento chega a 0,01 m/km e neste projeto-piloto, os dados foram coletados a cada 10 m. No processo realizado atualmente pelo DNIT, os dados de IRI são recebidos a cada 100 m.

O processo de comparar dois conjuntos de dados, ao longo de um eixo longitudinal e com grande número de informações, necessariamente requer não apenas um formato, mas diferentes opções de análise para permitir maior confiabilidade nas conclusões. O histograma da Figura 5a é uma forma clara de observar os dados do iPAVe (2023) e do VDR (2022) para um segmento de 153 km da BR-232/PE. Para esse segmento, foram comparados 1.539 dados do VDR e 15.359 dados do iPAVe. Observa-se que os resultados apresentam comportamentos similares em relação à variação do IRI, com médias próximas (1,89 m/km e 1,94 m/km, respectivamente). Contudo, o desvio padrão dos dados oriundos do iPAVe é maior, sendo 0,85 contra 0,79 do VDR. Apesar da comparação entre as médias não ser um formato ideal para estes tipos de dados, permitem que o gestor tenha uma percepção sobre como os dois tipos de levantamentos podem estar aderentes. A Figura 5b apresenta os resultados de forma diferente, com os valores de IRI ao longo da extensão da rodovia.



**Figura 5 – Dados de IRI na BR-232/PE: (a) histograma comparativo; (b) comparativo da extensão total analisada**

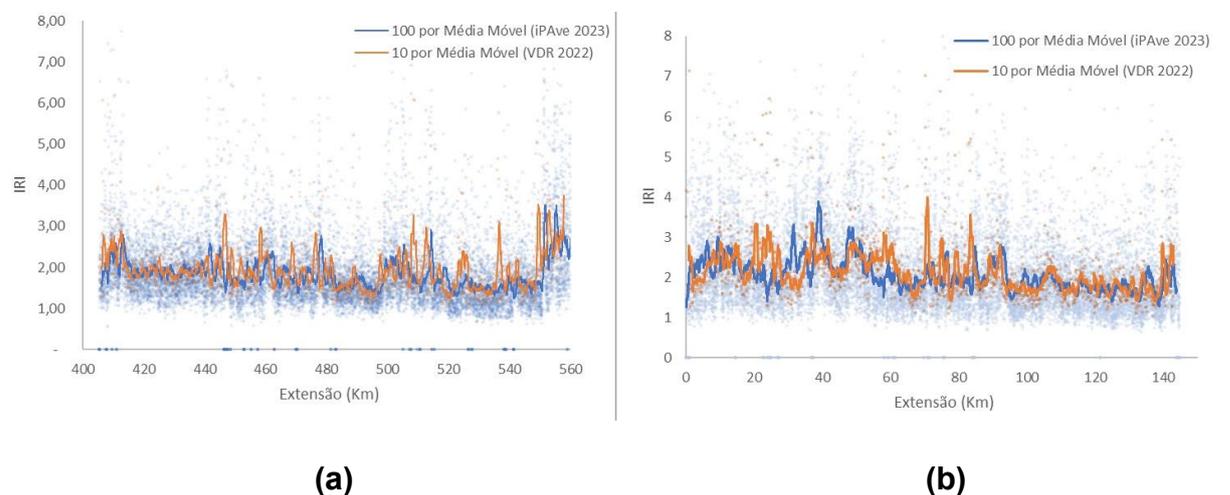
Pela quantidade de dados, este tipo de formato dificulta a avaliação dos resultados dos dois grupos de dados. Porém, é possível perceber uma clara diferença no padrão

da variabilidade dos resultados, fortemente impactada pela frequência das informações no caso do iPAVe (10 m do iPAVe e 100 m do VDR).

Visando melhorar o comparativo entre os dois conjuntos de dados, buscou-se utilizar a média móvel com períodos diferentes entre o iPAVe e o VDR, o que permite identificar mais facilmente os segmentos homogêneos, a exemplo das Figuras 6 e 7.

A Figura 6a apresenta o resultado para o segmento rodoviário na BR-232/PE, cujos pontos representam os dados individuais e as duas linhas as médias móveis em seus respectivos períodos. É possível perceber uma grande extensão cujo valor do IRI é próximo de 2,0 m/km. Entretanto, é perceptível para os dois conjuntos de dados, a existência de segmentos com maiores valores de irregularidade, por exemplo, próximo do km 560, o que demonstra uma equivalência entre os dois métodos.

A Figura 6b apresenta os resultados para outro segmento rodoviário, a BR-316/PE. Da mesma forma, trata-se de um segmento cujas médias para os dois conjuntos de dados são próximas (2,11 m/km para iPAVe e 2,14 m/km para o VDR) e, novamente, o desvio padrão observado nos dados do iPAVe é maior (0,95 para o iPAVe e 0,79 para o VDR).

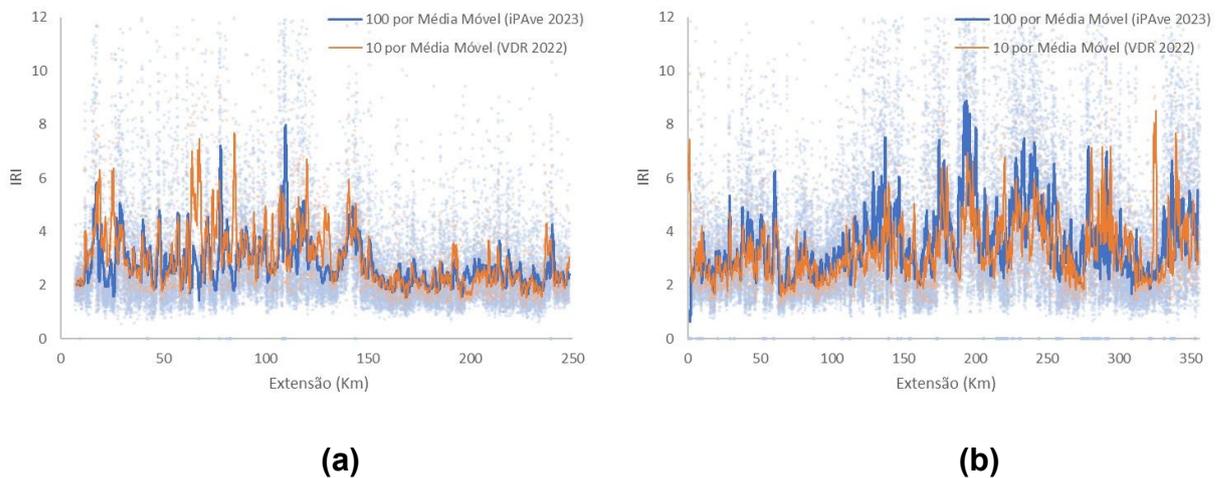


**Figura 6 – Comparativo das médias móveis dos dois conjuntos de dados de IRI para: (a) segmento na BR-232/PE; (b) segmento na BR-316/PE**

A Figura 7a apresenta os dados para o segmento da BR-116/CE. Trata-se de um segmento rodoviário com patamar de irregularidade maior em relação aos demais. Os

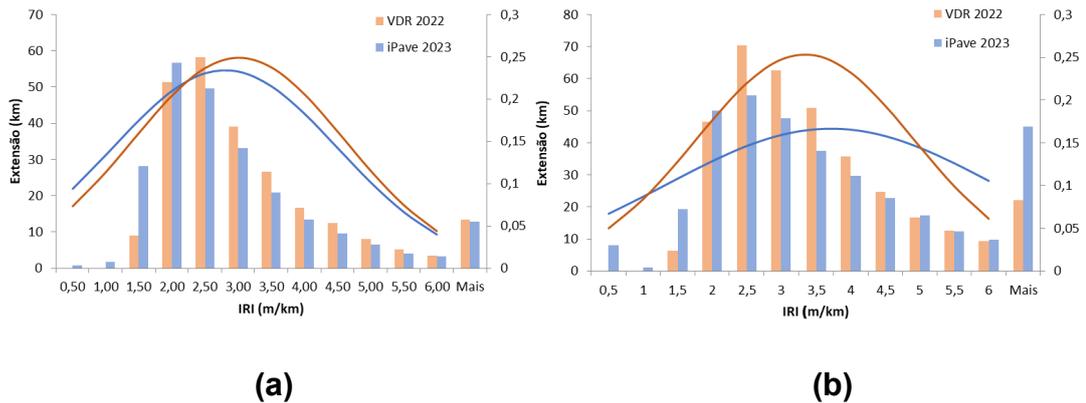
valores médios para o iPAVe e o VDR foram 2,80 m/km e 3,01 m/km, respectivamente, enquanto o desvio padrão para o primeiro conjunto foi 1,71 e para o segundo 1,60, obedecendo a tendência encontrada.

A Figura 7b apresenta os resultados para um trecho com IRI elevado, na rodovia BR-116/BA. A média dos resultados do iPAVe e VDR foi de 3,72 m/km e 3,34 m/km, respectivamente. Em função da maior frequência de dados do iPAVe, o desvio padrão alcançou valores maiores que aqueles do VDR, 2,39 contra 1,57. Apesar da maior variabilidade observada nos resultados do iPAVe, os dados mostram que os comportamentos das duas curvas são equivalentes, captando as visíveis mudanças na condição do pavimento.



**Figura 7 – Comparativo das médias móveis dos dois conjuntos de dados de IRI para: (a) segmento na BR-116/CE; (b) segmento na BR-116/BA**

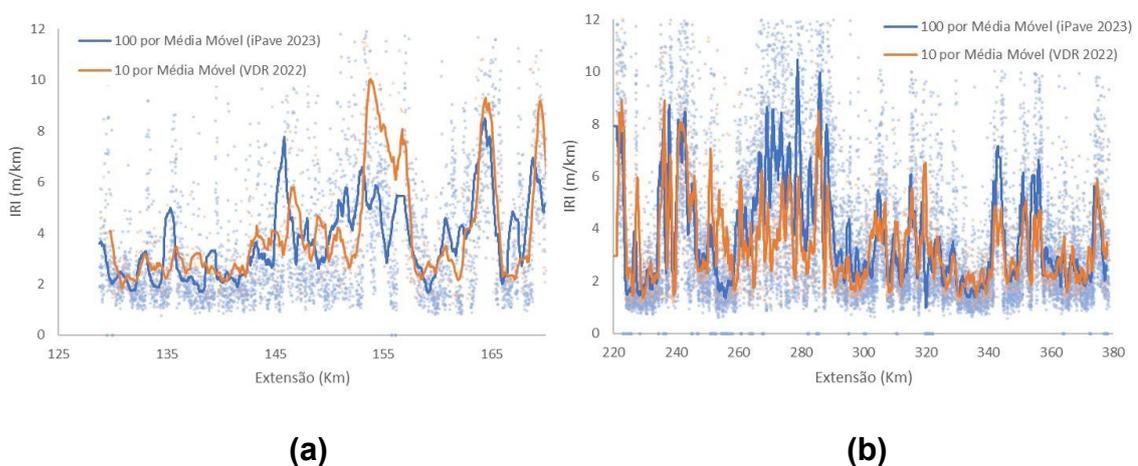
A Figura 8 apresenta a distribuição da frequência dos valores de IRI para um segmento rodoviário na BR-116/CE e outro na BR-116/BA. Os dados demonstram que a distribuição dos valores de IRI seguem tendências similares para o VDR e o iPAVe, confirmando a visualização dos resultados na Figura 7. Novamente, percebe-se que a variabilidade de dados do iPAVe, em função do maior número de dados analisados, é maior em relação aos resultados do VDR.



**Figura 8 – Histogramas para os dois conjuntos de dados de IRI para: (a) segmento na BR-116/CE; (b) segmento na BR-116/BA**

Outro segmento escolhido para avaliar a relação entre os dois conjuntos de dados de IRI foi a BR-010/MA, por se tratar de segmento com alto índice de defeitos superficiais. Dentre os segmentos apresentados, é a rodovia com maiores patamares de IRI. A Figura 9 apresenta o comparativo entre o VDR e o iPAVe para os dois segmentos da rodovia, que totalizam aproximadamente 200 km.

Apesar dos levantamentos terem sido realizados em faixas distintas (crescente e decrescente), e em períodos distintos, os resultados de IRI apresentam coerência entre si ao permitir observar diferentes segmentos ao longo da extensão da rodovia. Como será visto mais à frente, os dados de ATR, contudo, não apresentaram resultados compatíveis entre os dois tipos de levantamentos.

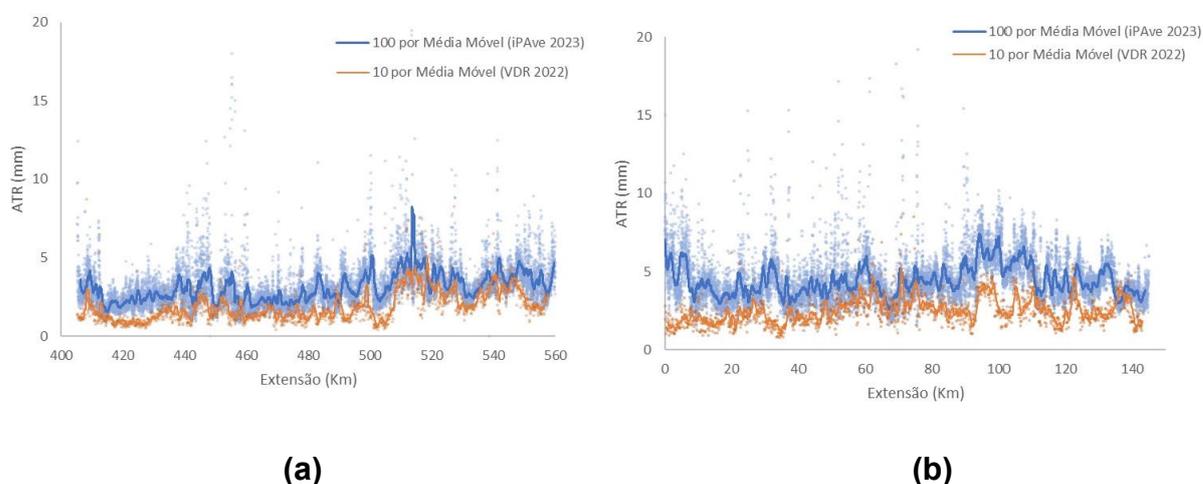


**Figura 9 – Comparativo das médias móveis dos dados de IRI para: (a) segmento 1 da BR-010/MA; (b) segmento 2 da BR-010/MA**

### 3.2 AVALIAÇÃO DO ATR COM O iPAVe

Outro parâmetro utilizado pelo DNIT na gestão de pavimentos é o valor do afundamento na trilha de roda (ATR). O mesmo procedimento foi adotado para realizar a comparação dos dois grupos de dados que determinaram o afundamento na trilha de roda, como apresentado nas Figuras 10 e 11. Nesta etapa, para algumas rodovias, foi perceptível a diferença entre os resultados obtidos pelo iPAVe e pelo VDR, apesar das tendências se mostrarem aderentes.

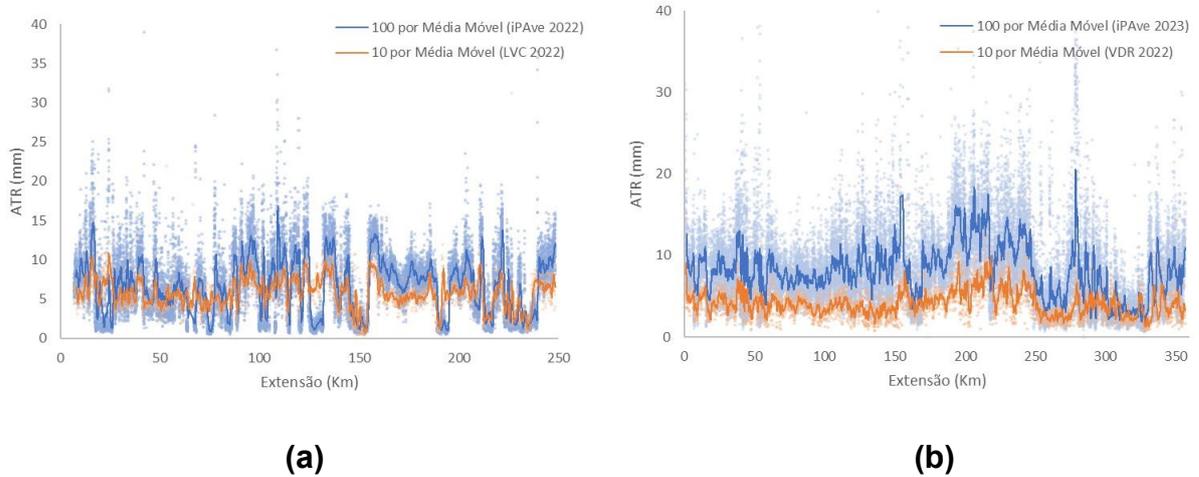
A comparação da média móvel dos resultados de ATR para os dois conjuntos de dados na rodovia BR-232/PE (Figura 10a) e na rodovia BR-316/PE (Figura 10b) são apresentados, demonstrando um maior afundamento em quase toda extensão quando se observa os dados do iPAVe. A média do iPAVe alcançou 3,12 mm enquanto o VDR resultou em 1,92 mm, com desvio padrão de 1,45 e 1,09, respectivamente, para o primeiro segmento. Para o segundo segmento rodoviário, a média do iPAVe alcançou 4,45 mm, enquanto a média do VDR foi de 2,54 mm, com desvio padrão de 1,49 e 0,96, respectivamente.



**Figura 10 – Comparativo das médias móveis dos dados de ATR para: (a) segmento na BR-232/PE; (b) segmento na BR-316/PE**

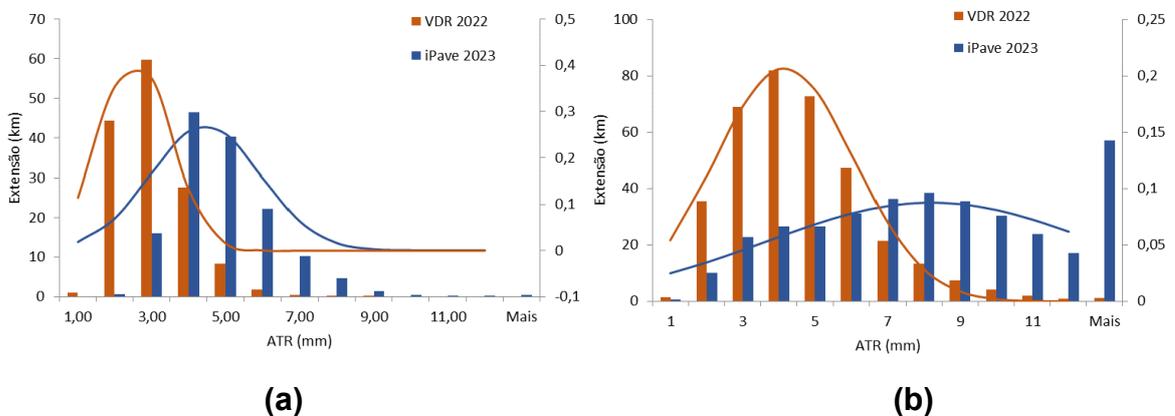
Outros dois segmentos são apresentados na Figura 11, para a BR-116/CE (Figura 11a) e para a BR-116/BA (Figura 11b) e demonstram que, independentemente dos resultados absolutos em relação aos dois levantamentos realizados, há percepção de que o comportamento dos segmentos segue a mesma tendência de variação. Os

resultados distintos entre os dois levantamentos, VDR e iPAVe, podem ser demonstrados de outra forma.



**Figura 11 – Comparativo das médias móveis dos dois conjuntos de dados de ATR para: (a) segmentos na BR-116/CE; (b) segmentos na BR-116/BA**

A Figura 12 apresenta o histograma dos dois conjuntos de dados para as rodovias BR-116/BA (Figura 12a) e BR-316/PE (Figura 12b). Este tipo de representação permite observar de forma mais clara a diferença nos valores absolutos para os dois tipos de levantamentos nos segmentos indicados, o que pode estar sendo ocasionado pelo diferente período entre os levantamentos e o avanço na deterioração do pavimento. Alguns trabalhos técnicos de diferentes autores também indicaram diferenças nos valores de ATR em pesquisas comparativas com o uso do iPAVe (TETLEY, 2019; MOUNZER, 2019).

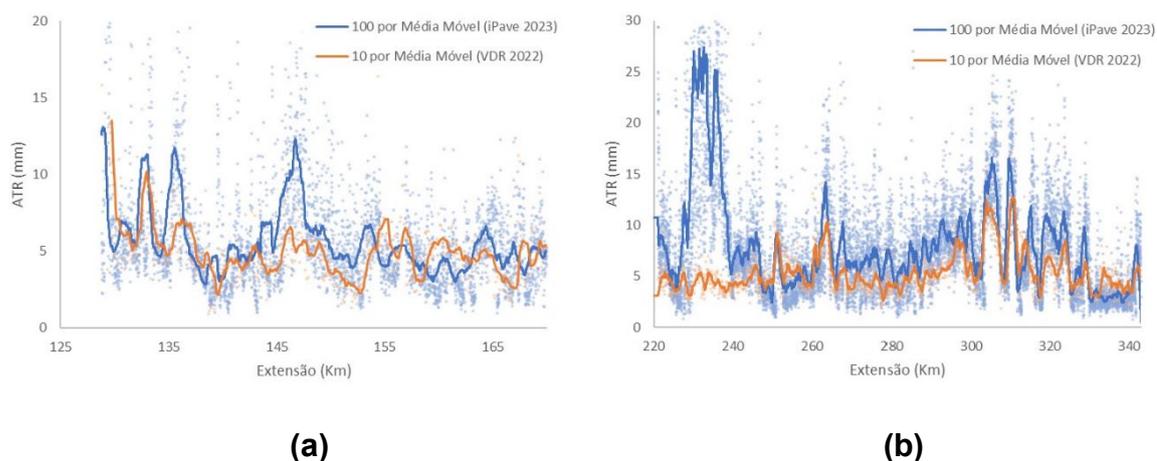


**Figura 12 – Histogramas para os dois conjuntos de dados de ATR para: (a) segmento na BR-316/PE; (b) segmento na BR-116/BA**

As diferenças observadas entre os valores em alguns segmentos podem ser explicadas por alguns fatores. O primeiro deles trata da defasagem de tempo do levantamento feito pelo VDR, todos em 2022, enquanto o iPAVe foi utilizado nos meses de fevereiro e março de 2023. Outro aspecto que pode interferir na comparação dos grupos de dados é a faixa levantada. O iPAVe e o VDR realizaram levantamento em apenas uma das faixas de tráfego de uma pista simples, e, por esse motivo, em algumas rodovias as faixas não foram coincidentes, como é o caso da BR-316/PE.

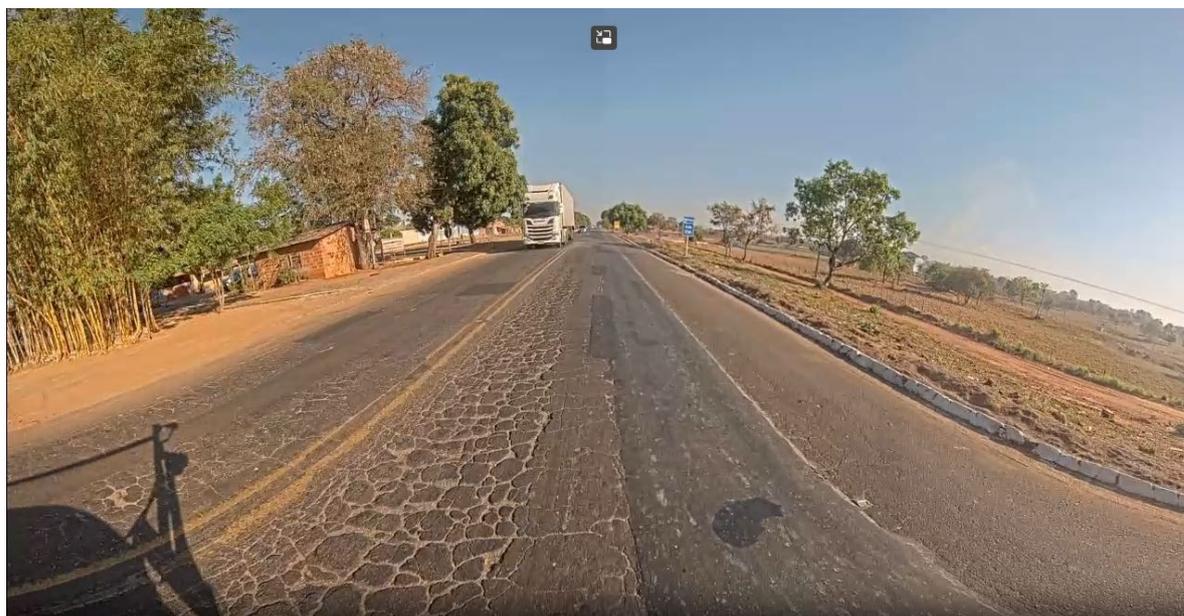
Além desses fatores, tem-se que as diferenças nos valores de deformação permanente entre o iPAVe e o VDR podem ser resultados do método adotado por cada equipamento. O VDR utiliza feixes de laser para obter a deformação permanente nas trilhas de roda, sendo três por trilha ou cinco no caso das duas trilhas, e estes estão alocados transversalmente no veículo. Já o iPAVe determina o afundamento por meio do imageamento 3D realizado pelo *Laser Crack Measurement System* (LCMS), também utilizado para detectar as fissuras na superfície do pavimento, bem como a macrotextura, como será visto mais adiante.

Outro exemplo destas divergências de resultados de ATR foi observada na BR-010/MA. Os levantamentos do iPAVe e VDR foram realizados em momentos distintos e em diferentes faixas de tráfego. A Figura 13 apresenta o comparativo dos resultados para dois segmentos da rodovia. As curvas demonstram que, mesmo que pontualmente em alguns trechos os resultados tenham valores absolutos distintos, na maioria da extensão as curvas seguem uma tendência similar (Figura 13a). Entretanto, entre o segmento compreendido pelo km 220 e km 240 (Figura 13b), há uma grande discrepância entre os dois resultados. Esse fato pode ser explicado pela diferença nas faixas levantadas e pelo fato de as leituras utilizarem metodologias distintas, conforme mencionado anteriormente.



**Figura 13 – Comparativo das médias móveis dos dados de ATR para: (a) segmento 1 na BR-010/MA; (b) segmento 2 na BR-010/MA**

Além disso, como os levantamentos foram realizados em anos distintos, é provável que tenha ocorrido o agravamento dos defeitos da superfície do pavimento, que em 2022 apresentava a condição da Figura 14.



**Figura 14 – Condição do pavimento da BR-010/MA no km 236 no ano de 2022, sentido crescente**

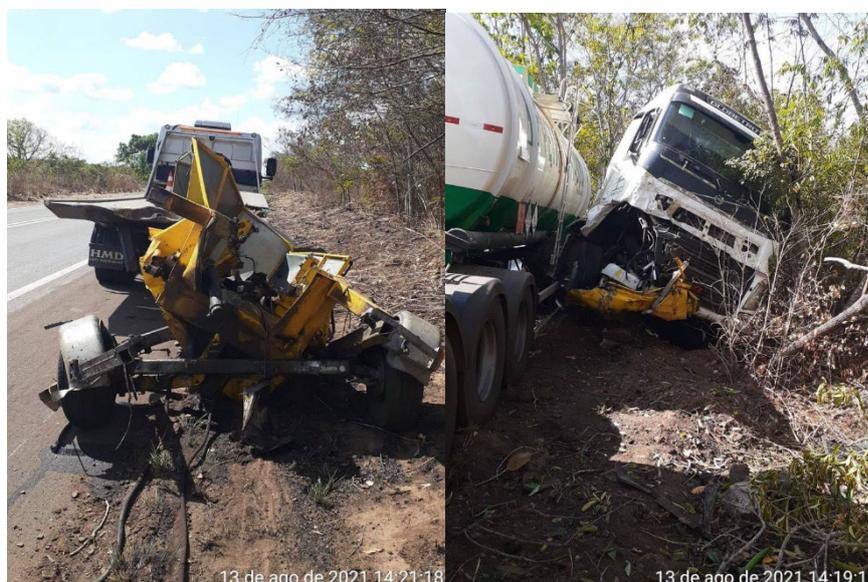
### 3.3 AVALIAÇÃO DEFLECTOMÉTRICA COM O TSD

Como mencionado anteriormente, um dos aspectos mais importantes da tecnologia oriunda do iPAVe é a possibilidade de analisar o pavimento estruturalmente de forma contínua, na velocidade da via, com o uso do TSD. A ampliação do uso dessas informações na gestão de pavimentos tem conduzido a decisões mais assertivas, haja vista a possibilidade de segmentos rodoviários apresentarem bons resultados de dados funcionais, mas, por outro lado, o pavimento apresentar problemas estruturais. Nesses casos, certamente a ausência de uma manutenção constante fará com que rapidamente os defeitos apareçam no pavimento. O inverso também pode ser verdadeiro, existindo situações em que o pavimento apresenta uma série de defeitos funcionais, mas estruturalmente encontra-se com comportamento adequado. HUYNH et al. (2021) demonstraram que a correlação entre aspectos funcionais e o índice de condição estrutural, utilizado para estimar a vida remanescente do pavimento, foi considerada baixa para 50 % dos casos.

Nesse contexto, o processo de obtenção de dados estruturais torna-se relevante para grandes extensões. O levantamento realizado com FWD torna-se oneroso e demorado, enquanto o TSD permite maior densidade de informações e com produtividade compatível com a necessidade dos responsáveis pelas proposições de políticas públicas relativas à gestão rodoviária. Enquanto o FWD é capaz de produzir algo em torno de 80 km/faixa/dia, o levantamento realizado pelo DNIT foi, em média, de 235 km/faixa/dia. Este patamar é considerado baixo e é resultado do primeiro teste do equipamento no país, bem como pela escolha da logística do levantamento. Patamares próximos de 400 km/faixa/dia são facilmente alcançáveis. A grande diferença entre os dois equipamentos está na densidade de informações, considerando a aquisição de dados contínua do TSD, o que torna o processo de comparação com o FWD complexo.

Um aspecto que deve ser levado em consideração é a segurança durante o processo de levantamento. O FWD necessita estar parado na rodovia para realizar a leitura das deflexões. Este tipo de levantamento é arriscado em rodovias cuja operação não pode ser interrompida. Além disso, em grandes corredores, com alto tráfego, torna-se uma

tarefa de grande complexidade por necessitar fechar uma faixa de tráfego para realizar o levantamento, trazendo transtornos à operação da via. A Figura 15 ilustra um acidente ocorrido em rodovia federal entre um veículo comercial e um equipamento FWD.



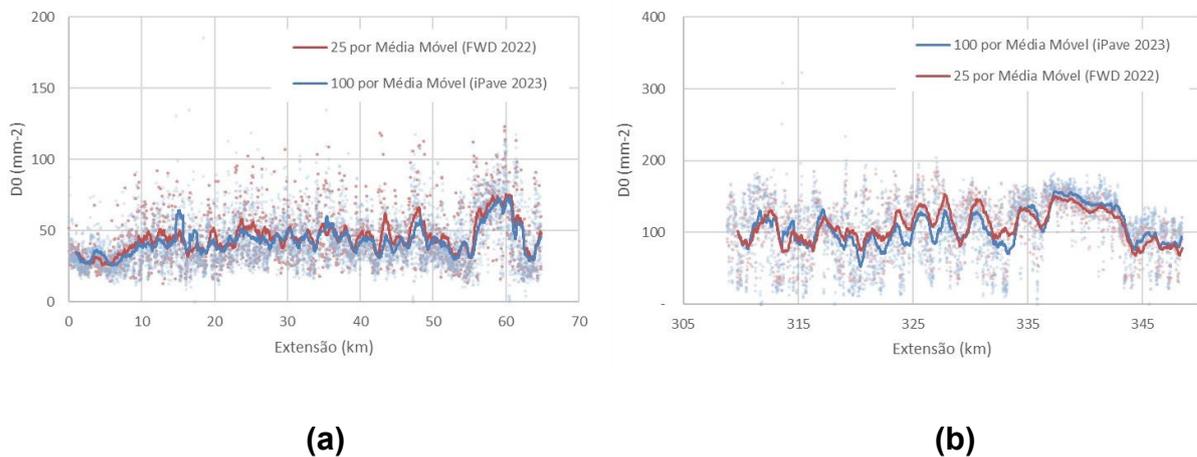
**Figura 15 – Acidente envolvendo equipamento FWD durante o levantamento deflectométrico em rodovia federal**

O DNIT realizou o levantamento de sua malha rodoviária pavimentada com FWD durante os anos de 2020 e 2021, com espaçamento de 200 m, intercalando-se os lados das faixas de tráfego. Onde o iPAVe iria trafegar, foram realizados levantamentos específicos em segmentos rodoviários com distanciamento menor, a cada 40 m, nos meses de novembro e dezembro de 2022. Estes levantamentos tiveram o objetivo de comparar os resultados deflectométricos entre o FWD e o TSD para uso em planejamento a nível de rede. Nesse sentido, busca-se demonstrar a efetividade do iPAVe na obtenção de dados estruturais em rodovias federais, em substituição ao FWD, para o uso no sistema de gestão de pavimentos da Autarquia.

Portanto, não serão tratados aspectos considerados importantes quando há necessidade de comparar dois equipamentos distintos para fins de projeto, tais como correções de carga aplicada ou temperatura do pavimento. Este tema será tratado em

outra oportunidade. Para realizar a avaliação estrutural, o iPAVe conta com pesos que permitem a aplicação de até 10 t no eixo simples de rodagem dupla.

A Figura 16 apresenta os dados da deflexão máxima de dois segmentos da BR 020/CE, totalizando aproximadamente 125 km de dados. Novamente, a forma de comparar os resultados seguiu o uso da média móvel para os dois conjuntos, com diferentes períodos de análise, utilizando para cada ponto no gráfico a compilação de 25 pontos para o FWD e 100 para o iPAVe. O processamento de dados também apresentou distinção, tendo em vista o processamento a cada 10 m pelo iPAVe e realização dos levantamentos com o FWD com espaçamento de 40 m. As curvas das médias móveis levaram em consideração segmentos de 1,0 km.

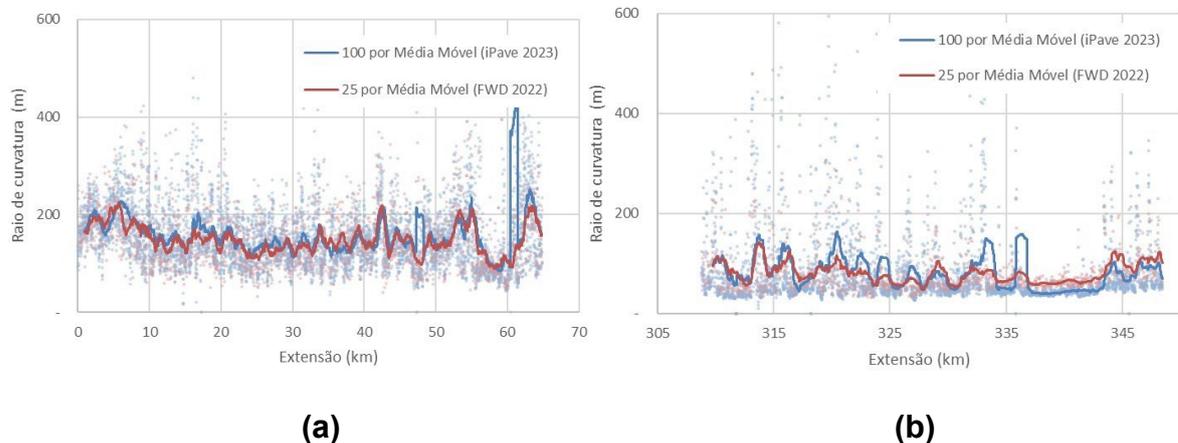


**Figura 16 – Comparativo entre as deflexões máximas para o iPAVe e o FWD em dois segmentos da BR-020/CE: (a) segmento 1; (b) segmento 2**

Como pode ser observado, os dois segmentos apresentam comportamento estruturais e patamares deflectométricos diferentes. Apesar de não ser o foco deste trabalho, a temperatura do pavimento durante o levantamento do FWD variou entre 33 °C e 57 °C, enquanto durante o levantamento do iPAVe variou entre 30 °C e 49 °C. A dispersão dos dados do iPAVe também foram maiores em função do número de dados ser superior ao do FWD.

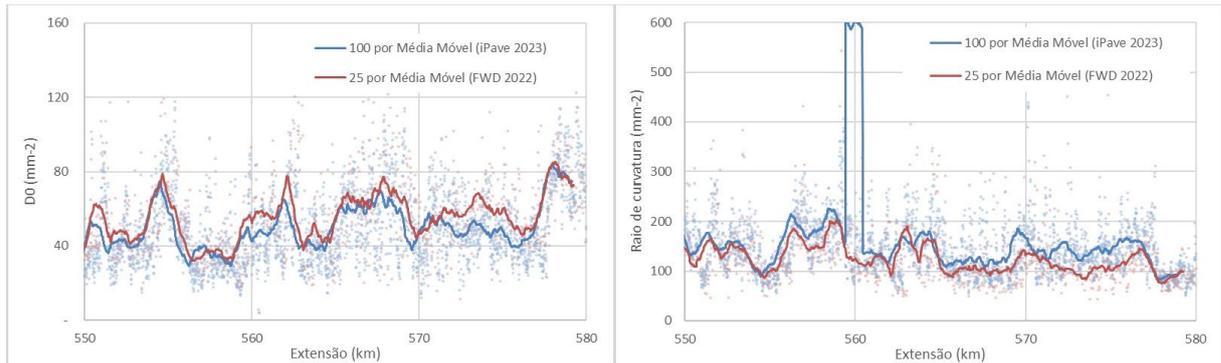
Contudo, pelo comparativo entre segmentos de 1,0 km, adequado para fins de planejamento, as duas curvas apresentam comportamentos similares ao longo da extensão da rodovia nos dois segmentos da BR-020/CE apresentados. A Figura 17

apresenta os resultados do raio de curvatura para os mesmos segmentos, também com análises comparativas das médias móveis. Novamente é perceptível uma grande similaridade no comportamento dos dois conjuntos de dados, mesmo que os segmentos rodoviários tenham patamares distintos de raio de curvatura.



**Figura 17 – Comparativo entre os raios de curvatura para o iPAVe e o FWD em dois segmentos da BR-020/CE: (a) segmento 1; (b) segmento 2**

A Figura 18 apresenta os dados de deflexão máxima (Figura 18a) e do raio de curvatura (Figura 18b) de aproximadamente 30 km da rodovia BR-343/PI, cujos levantamentos também foram realizados para fins comparativos entre o FWD e o iPAVe. Nesse caso, a temperatura do pavimento variou entre 24 °C e 39 °C, no levantamento do FWD, e entre 32 °C e 40 °C para o iPAVe. Os dados de deflexão máxima demonstram compatibilidade entre os dois conjuntos de dados, confirmando a hipótese de que é possível usar os dados do iPAVe para fins de planejamento. Os resultados de raio de curvatura também apresentam comportamentos similares, sendo excluídos alguns resultados que despontaram dos demais (outliers), como por exemplo os valores do iPAVe nas proximidades do km 560. Neste ponto, percebe-se que as deflexões medidas pelo iPAVe são muito baixas (perto de  $2 \times 10^{-2}$  mm) e por tais motivos, o raio de curvatura resultou em valores muito acima dos demais. De posse dos dados brutos, foi possível observar que a planilha cujos levantamentos foram realizados com o FWD indicou a existência de uma obra de arte especial neste ponto, o que pode ter influenciado os resultados do iPAVe.

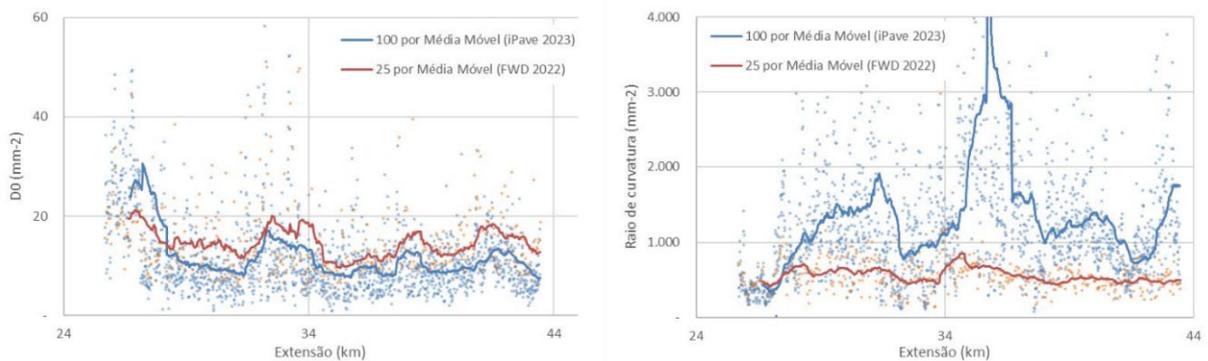


(a)

(b)

**Figura 18 – Comparativo entre os dados do iPAVe e do FWD para um segmento na BR-343/PI: (a) deflexão máxima; (b) raio de curvatura**

Em segmentos onde o pavimento apresenta bom comportamento estrutural, observou-se maior sensibilidade dos resultados do iPAVe em relação ao raio de curvatura. A Figura 19 apresenta os dados de deflexão máxima (Figura 19a) e do raio de curvatura (Figura 19b) para um segmento de 20 km da BR-116/PE. Os resultados da deflexão máxima para os dois conjuntos de dados demonstram que os valores para o FWD estão acima daqueles obtidos pelo iPAVe. Contudo, o comportamento das duas médias móveis continua coerente. Entretanto, para os resultados do raio de curvatura, há uma grande diferença entre as curvas de tendência, ocasionando também uma diferença entre os dois conjuntos de dados.



(a)

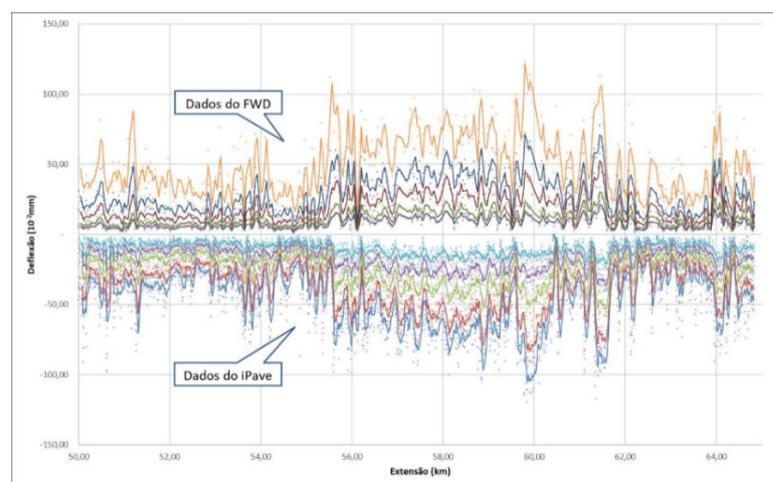
(b)

**Figura 19 – Comparativo entre os dados do iPAVe e FWD para um segmento na BR-116/PE: (a) deflexão máxima; (b) raio de curvatura**

Em função do bom comportamento estrutural é possível que o TSD tenha menor sensibilidade nas leituras da velocidade de deflexão da superfície do pavimento,

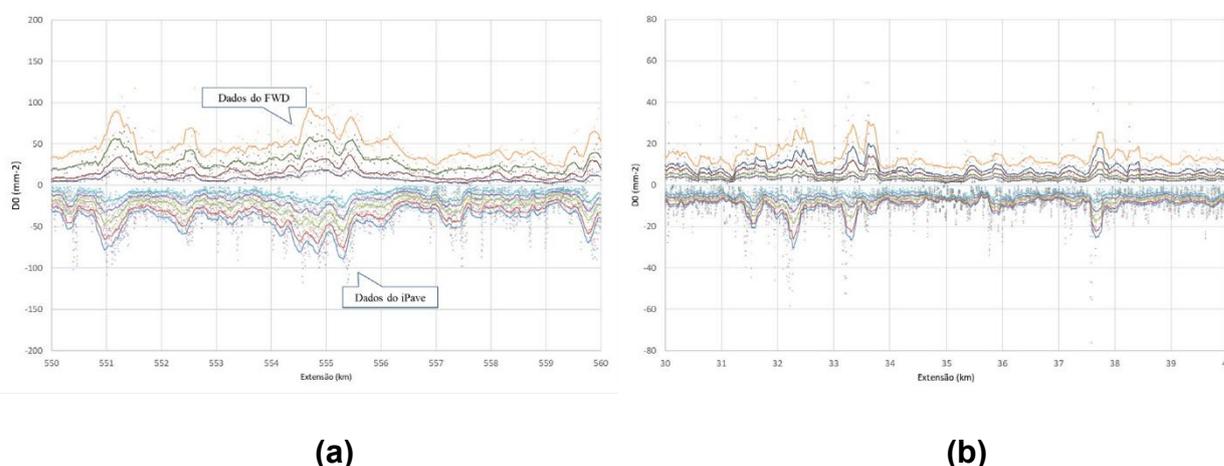
resultando em baixos valores de deflexão e altos valores do raio de curvatura. É importante destacar que nos levantamentos realizados com o FWD, o pavimento variou de temperatura entre 33 °C e 55 °C, enquanto durante o levantamento do iPAVe, a temperatura variou entre 32 °C e 38 °C. A diferença entre as faixas de temperatura também pode ser uma das causas das discrepâncias observadas entre as duas campanhas de levantamento.

Além da análise dos valores de deflexão máxima e do raio de curvatura, buscou-se uma forma diferente de realizar a análise comparativa também das deflexões, com dados do FWD e do iPAVe, em outras distâncias do ponto de carga. Para facilitar a análise dos dois conjuntos de dados, os resultados obtidos pelo iPAVe foram apresentados com ordenadas negativas, enquanto os dados do FWD com valores das ordenadas positivas. A Figura 20 apresenta os dados de parte dos segmentos da rodovia BR-020/CE. Os pontos apresentados são os valores isolados para as diferentes distâncias da carga (D0, D20, D30 e D45), enquanto as linhas são as médias móveis para as diferentes distâncias da carga, determinadas para segmentos de 200 m. Para que seja verificada a similaridade de comportamento entre os dois conjuntos de dados, o resultado deve ser apresentado de forma “espelhada” entre as duas partes do gráfico. No segmento em análise, é possível perceber que há uma coerência entre os comportamentos dos dois tipos de levantamentos, o que demonstra a potencialidade do iPAVe na análise estrutural contínua de pavimentos.



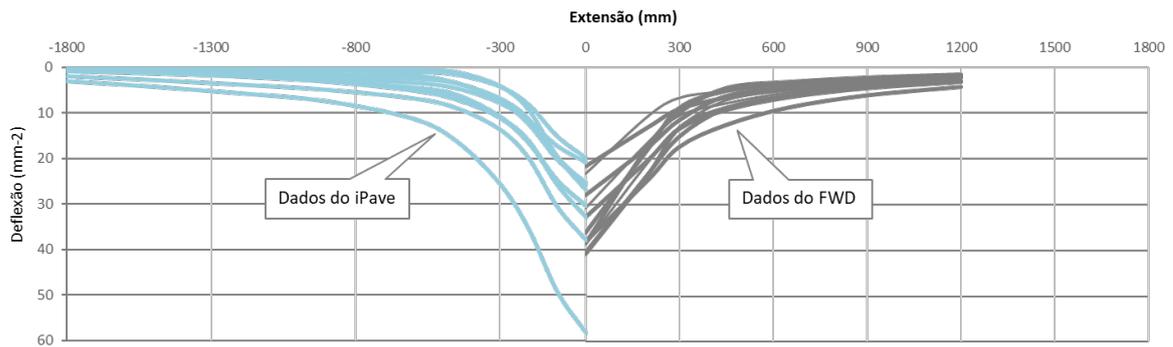
**Figura 20 – Dados dos pontos de deflexão do iPAVe e do FWD na rodovia BR-020/CE (D0, D20, D30 e D45)**

Em alguns pontos, observou-se que o iPAVe apresentou deflexões baixas, com valores não usuais para pavimentos flexíveis. Observando tais pontos de forma mais detalhada, os levantamentos do FWD e do iPAVe indicavam a existência de obras de arte especiais no campo de observações, cujo preenchimento é realizado pelos operadores dos veículos. Como o iPAVe realiza a leitura contínua, tais dados devem ser tratados, ou excluídos, de uma análise gerencial. Na Figura 21 são apresentados os dados de deflexão para dois segmentos: Rodovia BR-343/PI (Figura 21a) e Rodovia BR-116/PE (Figura 21b). Após análise dos gráficos, verificou-se que o comportamento das curvas das médias móveis para os dois conjuntos de dados foi similar nos diferentes pontos de leitura.



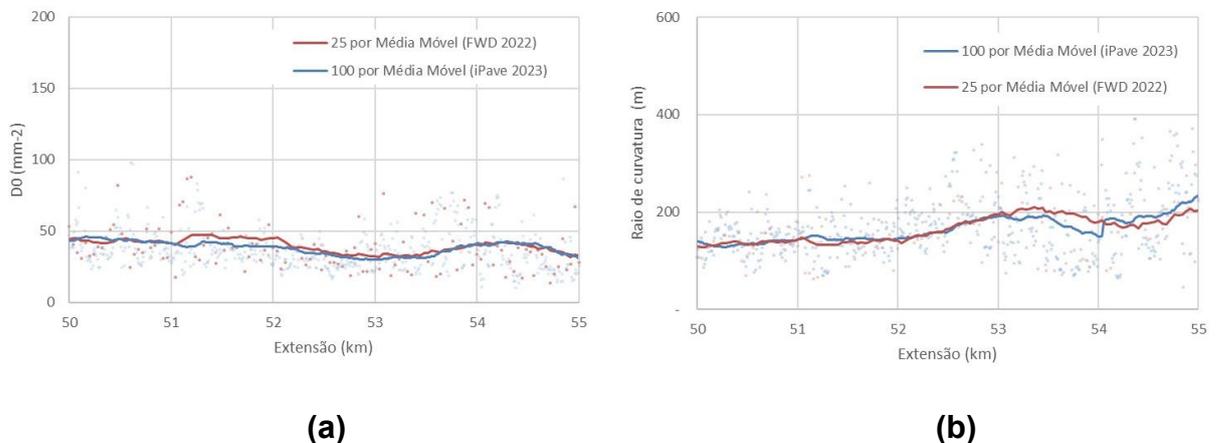
**Figura 21 – Dados dos pontos de deflexão (D0, D20, D30 e D45) do iPAVe e do FWD para: (a) segmento na BR-343/PI; (b) segmento na BR-116/PE**

Com o objetivo de avançar no processo comparativo entre os dois grupos de dados, foi selecionado um segmento de 1,0 km da BR-020/CE para ilustrar as bacias deflectométricas obtidas com os dois tipos de equipamentos. A Figura 22 apresenta os resultados, sendo que as abscissas negativas para o iPAVe são apenas para auxiliar na análise dos resultados em relação aos dados do FWD. Percebe-se que neste segmento de rodovia, entre os km 52 e km 53 da BR-020/CE, as 11 bacias deflectométricas escolhidas estão aderentes entre os dois conjuntos de dados.



**Figura 22 – Bacias deflectométricas para um segmento de 1,0 km da BR-020/CE**

Para demonstrar como os levantamentos do FWD e do iPAVe se comportaram nas proximidades deste segmento de rodovia, a Figura 23 apresenta os dados de deflexão máxima (Figura 23a) e os raios de curvatura (Figura 23b) para o segmento entre o km 50 e o km 55. Novamente, é perceptível que os dados seguem tendências similares ao longo da extensão da rodovia, demonstrando a capacidade promissora da tecnologia iPAVe para fins de planejamento e gestão rodoviária a nível de rede.

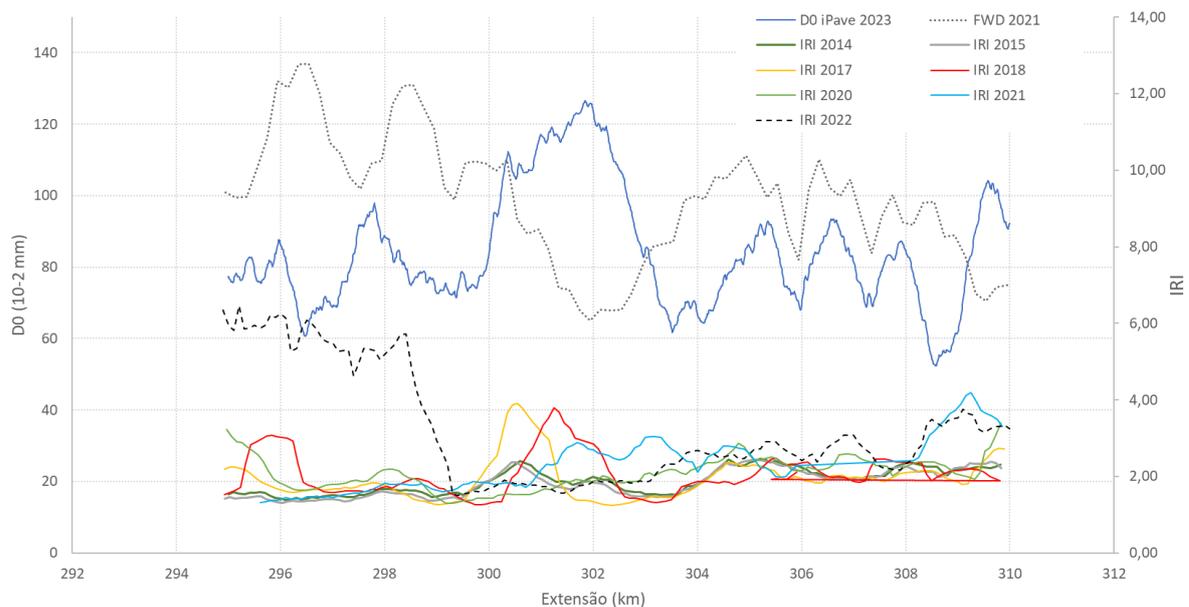


**Figura 23 – Comparativo entre os dados do FWD e iPAVe para um segmento da BR-020/CE: (a) deflexão máxima; (b) raio de curvatura**

Um dos grandes benefícios do uso do iPAVe é a avaliação simultânea entre a condição estrutural e funcional do pavimento. Como mencionado anteriormente, em alguns casos, é possível o pavimento apresentar bom comportamento funcional e, por outro lado, ter problemas estruturais que, aliado a ausência de uma manutenção adequada, poderá induzir à deterioração do pavimento acelerada, caso o gestor avalie

apenas aqueles resultados funcionais. Um exemplo pode ser apresentado quando uma rodovia com grandes patamares de deflexão máxima é analisada com os resultados do iPAVe.

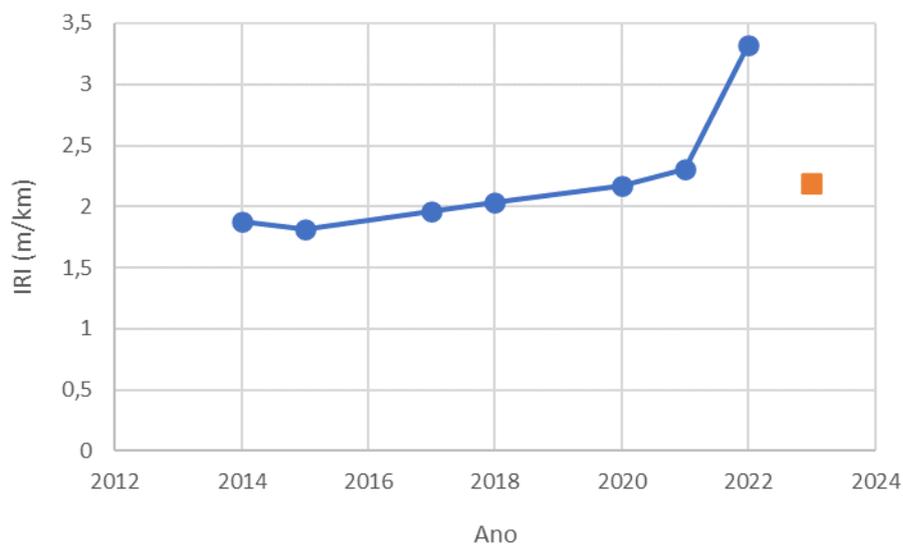
Por exemplo, a BR-010/MA apresentou, em determinados segmentos, altos valores de deflexão máxima. Realizando-se um filtro desses segmentos e conjugando os dados de IRI, pôde-se observar situações em que, sem a análise integrada (funcional e estrutural), ocorra o risco de decisões inadequadas de manutenção. O segmento entre o km 229 e o km 240 da BR-010/MA é apresentado na Figura 24, com as curvas (média móvel a cada 200,0 m) de deflexão máxima (D0) e os dados de IRI obtidos pelo iPAVe, bem como os dados de IRI realizados pelo VDR em diferentes anos. As deflexões máximas medidas pelo iPAVe demonstram que o pavimento se encontra estruturalmente comprometido. Contudo, em alguns trechos é possível observar que há resultados de IRI que não demonstram tal criticidade.



**Figura 24 – Dados de deflexão e IRI do segmento rodoviário entre os km 229 e 240 da BR-010/MA**

No ano de 2022 o levantamento de IRI indicou segmentos com aumento significativo do IRI, o que pode levar à conclusão que o pavimento está iniciando o processo de ruptura de forma acelerada. Assim, a busca pela melhor caracterização funcional,

nesse contexto, torna-se relevante. A caracterização da superfície do pavimento considerando área fissurada passa a ser um elemento complementar à irregularidade longitudinal. Observando o histórico de evolução da média do IRI e do índice de gravidade global (IGGE), índice ligado à frequência de defeitos superficiais e que o DNIT realiza de forma visual, por meio do VDR, percebe-se que há uma tendência de crescimento exponencial destes parâmetros no segmento rodoviário em análise, o que corrobora o grave problema estrutural indicado pela deflectometria (Figura 25). Porém, em 2023, os dados de IRI obtidos pelo iPAVe demonstraram uma brusca queda desse parâmetro funcional, o que levou a necessidade de observar as imagens do segmento, representado pelo quadrado laranja na Figura 25.



**Figura 25 – Evolução da média do IRI e IGGE do segmento rodoviário entre os km 229 e 240 da BR-010/MA**

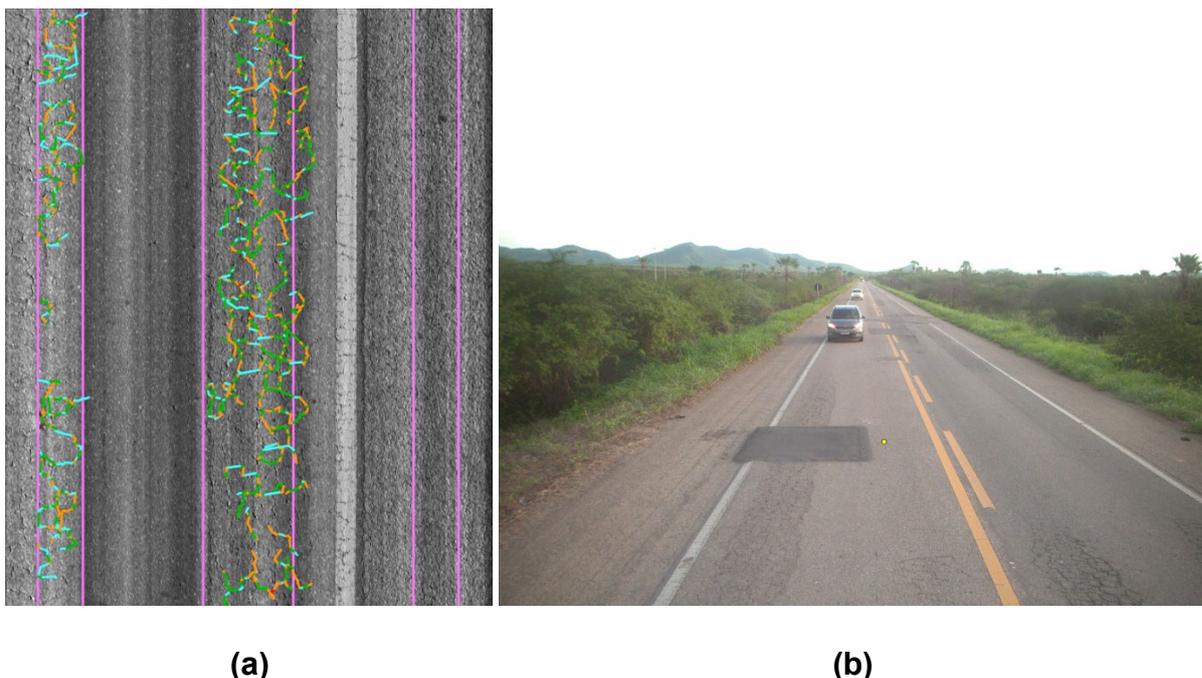
As imagens da rodovia ao longo do tempo demonstram a evolução da condição do pavimento no km 297 da BR-020/CE. A sequência de imagens na Figura 26 não só apresenta os levantamentos realizados pelo DNIT anteriormente, mas também o levantamento realizado pelo iPAVe no ano de 2023. Como é perceptível, o DNIT realizou uma nova camada de revestimento asfáltico entre 2022 e 2023. Percebe-se assim, que em 2022 o revestimento estava em processo de fresagem e em 2023 o mesmo já conta com a nova camada de revestimento asfáltico.



**Figura 26 – Aspecto visual do km 297 na rodovia BR-020/CE ao longo dos anos de 2015 a 2023**

Em 2023, o segmento adjacente ao que recebeu uma nova camada de revestimento asfáltico, no km 292 na rodovia BR-020/CE, aparece já severamente deteriorado, conforme pode ser observado na Figura 27, pela imagem processada demonstrando fissuras na superfície do pavimento (Figura 27a) e por seu aspecto visual (Figura 27b). De posse desses resultados e com base nas análises dos dados, é possível indicar que o novo revestimento asfáltico executado no segmento não possuirá desempenho satisfatório por prazo elevado, dada a alta deflexão observada.

Pretende-se demonstrar, portanto, que a realização de levantamentos funcionais e estruturais permitirão que o gestor tenha maior confiabilidade na tomada de decisões sobre a gestão de seu ativo rodoviário mais nobre, o pavimento. Certamente, segmentos com baixos valores de IRI, como o trecho entre o km 229 e km 241 (Figura 24) poderão extrapolar níveis aceitáveis de defeitos funcionais rapidamente, em função dos problemas estruturais existentes.



**Figura 27 – Aspecto visual do km 292 na rodovia BR-020/CE em 2023:  
(a) fissuras na superfície do pavimento; (b) aspecto visual**

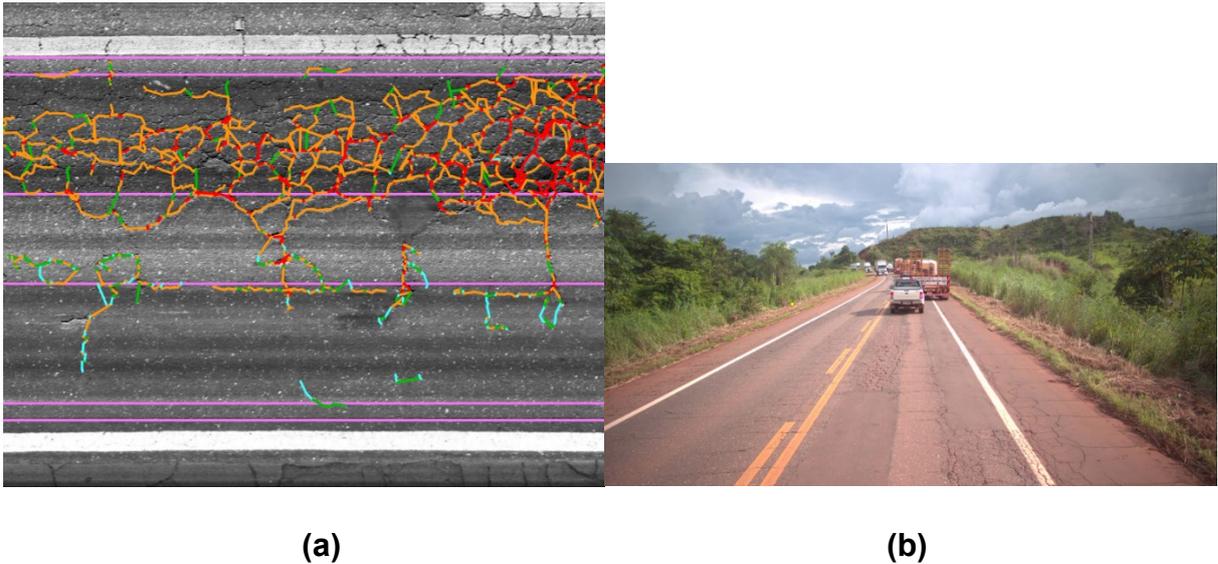
### **3.4 MACROTEXTURA, ÁREA TRINCADA E INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES**

Outros benefícios provenientes do uso da tecnologia iPAVe são as informações obtidas com os equipamentos embarcados no veículo e que complementam dados que permitem otimizar as análises durante o processo de gerenciamento de pavimentos. Um dos equipamentos que está integrado ao iPAVe é o *Laser Crack Measurement System* (LCMS). O veículo está equipado com dois sensores 3D adaptados na parte traseira do trailer, a 2,2 m de altura, além de contar com uma câmera de alta definição. Com isso, permite realizar uma leitura de 4,0 m de largura da pista, com resolução de 1,0 mm, continuamente, produzindo uma série de imagens

da superfície da rodovia. A partir da análise das imagens, podem ser identificadas fissuras, desgastes, macrotextura e panelas. Este tipo de equipamento permite, portanto, realizar a avaliação automática da área fissurada de um pavimento continuamente.

Em contraponto, o atual processo realizado pelo DNIT esbarra na atuação de operadores para a quantificação da frequência do aparecimento deste tipo de defeito, sem, contudo, quantificar efetivamente a área fissurada. Torna-se um processo oneroso, demorado e sem a completude necessária na quantificação desse problema tão comum em rodovias brasileiras.

A Figura 28 ilustra um exemplo do resultado para análise das fissuras na superfície do pavimento obtido em um segmento da rodovia BR-010/MA, km 289. As imagens são processadas em ferramenta própria, desenvolvida pela ARRB Systems e disponibilizada ao DNIT juntamente com os dados. A possibilidade de realizar o levantamento contínuo dos pavimentos das rodovias federais automatizando o cálculo das áreas fissuradas levará, certamente, a uma necessária reformulação dos índices atualmente existentes para caracterização funcional dos pavimentos, como por exemplo o IGGE. O iPAVe entrega mais de 30 parâmetros de leitura de fissuras, em diferentes formatos de contagem, permitindo que o usuário escolha o formato que melhor se adequa às suas análises. Este tipo de levantamento realizado pelo iPAVe mudará o paradigma até então utilizado pelo DNIT no gerenciamento de pavimentos.

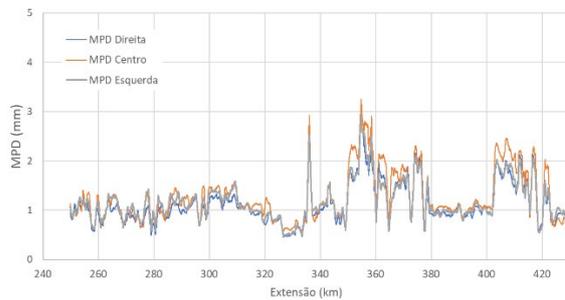


**Figura 28 – Imagem processada demonstrando fissuras na superfície do pavimento da BR-010/MA no km 289: (a) de acordo com o grau de severidade e (b) fotografia do local**

Além das áreas fissuradas, é possível obter informações da macrotextura dos revestimentos existentes nas rodovias. Ao contrário do que atualmente é feito em algumas rodovias, cuja avaliação da macrotextura é pontual, o uso do LCMS permite um resultado contínuo deste parâmetro. O iPAVe entrega 17 tipos de informações relacionadas à macrotextura, também com diferentes formatos de apresentação dos dados. A Figura 29 apresenta as médias móveis dos dados de *Mean Profile Depth* (MPD) em três subsegmentos da faixa analisada (direita, centro e esquerda) ao longo de 180 km da rodovia BR-116/CE (Figura 29a), juntamente com o aspecto visual da superfície do pavimento (Figura 29b). Neste caso, não há comparação com outro conjunto de dados, tendo em vista que o DNIT não realiza, atualmente, levantamento da macrotextura para fins de planejamento.

Os resultados são claros em demonstrar a possibilidade de subdividir a rodovia em segmentos com valores críticos de macrotextura e, assim, propor soluções específicas para o pavimento visando enquadrar os parâmetros aos limites das especificações técnicas. A foto da superfície do pavimento no km 354 (Figura 29b) comprova uma superfície desgastada, levando a patamares de MPD elevados. Neste segmento, em função da observação de vários defeitos na superfície, foi avaliado o IRI médio entre

o km 350 e o km 360, cujo valor foi igual a 3,20 m/km e média da deflexão (D0) de  $70 \times 10^{-2}$  mm.

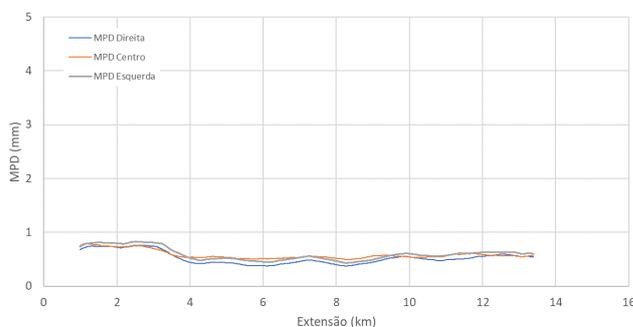


(a)

(b)

**Figura 29 – Macrotextura da rodovia BR-116/CE: (a) variação do MPD; (b) aspecto visual da superfície do pavimento no km 354**

Para a mesma rodovia, porém em outro Estado, agora na Paraíba, os dados de macrotextura foram bem diferentes (Figura 30). Os valores para variação do MPD, apresentados na Figura 30a, estão abaixo de 1,0 mm o que confirma a situação superficial do pavimento, apresentada na Figura 30b. Ademais, neste segmento, o IRI médio é de 1,84 m/km, condizente com a condição do pavimento.



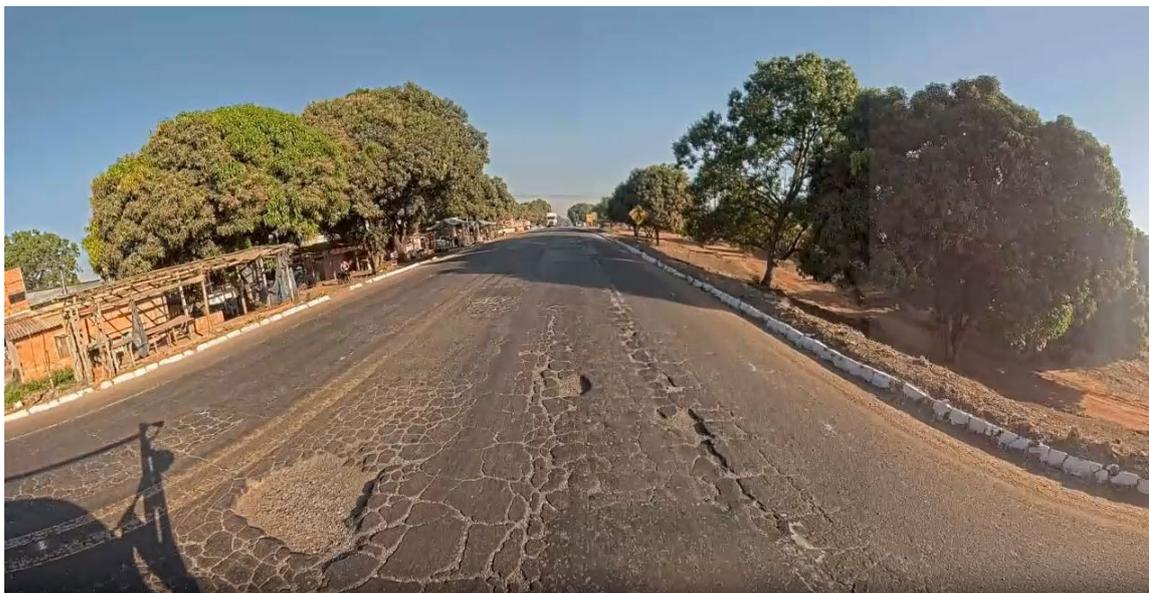
(a)

(b)

**Figura 30 – Macrotextura da rodovia BR-116/PB: (a) variação do MPD; (b) aspecto visual da superfície do pavimento no km 10**

Além das informações já apresentadas, o iPAVe caracteriza a rodovia sob os aspectos geométricos, catalogando a inclinação longitudinal, as declividades transversais da faixa levantada, a largura da faixa, bem como o número de painéis existentes na rodovia, sua área e profundidade estimada. Este último parâmetro é determinado pela

análise dos dados oriundos do LCMS. Os dados podem ser categorizados em termos de número de painéis. Tomando como exemplo um segmento da BR-010/MA, a Figura 31 apresenta uma imagem com identificações de painéis e outros defeitos no pavimento. A partir da análise desta imagem, o iPAVe considerou corretamente que o segmento apresentou alta frequência para este defeito. Neste segmento, os resultados do IRI foram próximos de 6 m/km e a deflexão (D0) acima de  $200 \times 10^{-2}$  mm (média dos valores), o que demonstra uma coerência entre os diversos parâmetros levantados pelo iPAVe.



**Figura 31 – Aspecto visual de painéis e outros defeitos no pavimento do segmento da BR-010/MA no km 237**

Nesse sentido, a utilização da tecnologia iPAVe na gestão de pavimentos permitirá que o DNIT tenha oportunidade de utilizar dados nunca obtidos e que facilitarão a construção de processos dentro do sistema de gerenciamento de pavimentos para melhorar os procedimentos decisórios. Além disso, a produtividade alcançada pelo veículo iPAVe contribuirá para redução dos custos e prazos de avaliação da rede rodoviária federal, sem esquecer o benefício de dar maior segurança ao processo.

## 4 CONCLUSÕES

Este Relatório de Pesquisa apresentou a implementação de um projeto-piloto com o uso da tecnologia iPAVe, realizado em aproximadamente 13.000 km de rodovias federais. Os resultados demonstraram que os dados são coerentes quando comparados com o atual modelo usado pelo DNIT. Além disso, a obtenção de um maior número de informações, por ser um levantamento contínuo, permitirá que os gestores tenham mais informações para escolher as melhores alternativas para a manutenção rodoviária. Dentre esses benefícios, destaca-se a avaliação estrutural na velocidade diretriz da rodovia, realizada pelo equipamento TSD.

A redução dos prazos e dos custos de levantamento certamente são benefícios complementares na implementação da tecnologia iPAVe no país. Ademais, o DNIT, como organismo tradicionalmente indutor de novas práticas rodoviárias, está abrindo as portas para que Estados, Municípios e gestoras privadas de rodovias possam vislumbrar a aplicação destes novos conceitos na gestão rodoviária. Para tanto, o DNIT publicou a norma DNIT 440/2023-PRO que trata das diretrizes para a realização de levantamentos com equipamentos como o iPAVe.

Ainda há muitos pontos de discussão no uso do iPAVe e na interpretação dos resultados do TSD, seja pelo impacto da temperatura, velocidade do veículo ou tipo de pavimentos. Contudo, percebe-se que a tendência internacional é mudar a diretriz da forma como os dados de planejamento serão obtidos em redes de rodovias, cuja mudança pode ser comparada à impactante substituição da viga Benkelman pelo FWD. A engenharia rodoviária está diante de um novo processo cujo potencial ainda precisa ser explorado, mas que demonstra ganhos significativos para a gestão de pavimentos.

## 5 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A análise preliminar aqui apresentada não realizou avaliações de fatores importantes quando se trata de deflectometria de pavimentos. Um aspecto importante para que o processo de introdução dessa nova tecnologia permita dar confiabilidade aos gestores é a replicabilidade dos resultados.

O objetivo experimental deste projeto-piloto, decidiu pela aplicação do equipamento em diferentes trechos de rodovias. Contudo, é necessário que nas próximas utilizações desta tecnologia, proponha-se um plano para definir o nível de confiabilidade dos resultados, visando garantir que as leituras estejam aderentes à variabilidade aceitável para esses casos.

Mais ainda, para fins do uso no sistema de gerência de pavimentos, os dados deflectométricos necessitam de adequação em função da variação da temperatura. Esse processo visa garantir que o DNIT obtenha parâmetros comparáveis em uma determinada temperatura de referência. Existem vários procedimentos existentes na literatura técnica que permitem essa correção.

Outro elemento que merece destaque é o impacto que um determinado veículo comercial, ao trafegar pela faixa contrária na qual o iPAVe está realizando a leitura, pode causar nos resultados obtidos pelos lasers do TSD. Em função de grande parte da malha rodoviária ser de pista simples, é possível que esse cenário cause algum impacto nos resultados e tal avaliação merece ser discutida futuramente, senão em nível de rede, mas certamente para a aplicação em nível de projeto.

Ademais, torna-se relevante medir efetivamente a carga aplicada pelo iPAVe. Para tanto, seria oportuno realizar a pesagem do equipamento com uma balança móvel, de uso do DNIT, antes de iniciar os levantamentos. Apesar da empresa contratada apresentar as especificações que permitem tal informação, entende-se que a medição da pressão dos pneus e sua carga trarão referências fundamentais para possíveis aplicações do iPAVe em nível de projeto.

Do ponto de vista funcional, torna-se mandatório que o DNIT revise suas especificações para caracterização funcional dos pavimentos. A automatização do processo, implementada pelo iPAVe, trará possibilidades ainda não discutidas e, portanto, merecem especial atenção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- a) AHMED, N. S.; HUYNH, N.; GASSMAN, S.; MULLEN, R.; PIERCE, C.; CHEN, Y. (2022). Predicting Pavement Structural Condition Using Machine Learning Methods. *Sustainability*, 14, 8627. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14148627>.
- b) AUTOMATED ROAD REHABILITATION BUSINESS SYSTEMS. (2022). ARRB Systems Proposal for DNIT Survey.
- c) BRYCE, J.; FLINTSCH, G.; KATICHA, S.; DIEFENDERFER, B. (2013). Developing A Network-Level Structural Capacity Index for Asphalt Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 139, 123–129.
- d) DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 008/2003 – PRO. Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos – Procedimento.
- e) \_\_\_\_\_. DNIT 440/2023 – PRO. Pavimentação – Levantamento funcional e estrutural contínuo de pavimentos utilizando um equipamento móvel – Procedimento.
- f) DIEFENDERFER, B. (2019). Virginia Traffic Speed Deflectometer Network Testing. Workshop on the use of traffic speed deflection device data in network and project-level pavement decisions. Transportation Research Circular N. E-C254.
- g) HUYNH, N., GASSMAN, S., MULLEN, R., PIERCE, C., CHEN, Y., AHMED, N. (2021). Utilization of Traffic Speed Deflectometer for Pavement Management. Report FHWA-SC-21-04.
- h) MILLER, R. (2019). Kansas Traffic Speed Deflectometer (and More) Experimental Findings. Workshop on the use of traffic speed deflection device data in network and project-level pavement decisions. Transportation Research Circular N. E-C254.

- i) MOUNZER, H. (2019). Traffic Speed Deflectometer for Network-Wide Pavement Strength Monitoring. Workshop on the use of traffic speed deflection device data in network and project-level pavement decisions. Transportation Research Circular N. E-C254.
- j) NAZARIAN, S. (2022). Importance of Pavement Structural Evaluation to Decision-Making Process. State Departments of Transportation experiences and applications with traffic speed deflection devices. Transportation Research Circular N. E-C276.
- k) NIELSEN, N. R. (2021). Investigating pavement response-to a moving vehicle: Characterisation of structural properties and direct measurement of structural rolling resistance. Ph.D. Thesis. Rskilde University. 303 p.
- l) TETLEY, S. (2019). Automated Collection of Continuous Integrated Pavement Condition Data – The South African experience 2015 – 2018. Workshop on the use of traffic speed deflection device data in network and project-level pavement decisions. Transportation Research Circular N. E-C254.
- m) VISCONTI, T. S. (2000). O Sistema Gerencial de Pavimentos do DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 84 p.