

# Análise comparativa de deformações e tensões obtidas por meio de retroanálise e instrumentação de um trecho experimental da BR 101 em Pernambuco

## *Comparative analysis of strain and stresses obtained through backcalculation and instrumentation of a test track at BR 101 in Pernambuco*

Cacildo de Medeiros Brito Cavalcante<sup>1</sup>, John Kennedy Guedes Rodrigues<sup>2</sup>, Jonny Dantas Patrício<sup>2</sup>, Christian Rafael Ziegler<sup>2</sup>, Paulo Germano Tavares Marinho Filho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, João Pessoa, Paraíba, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil

**Contato:** cacildo.cavalcante@dnit.gov.br, , (CMBC); profkennedy@hotmail.com, , (JKGR); jonny\_dantas@hotmail.com, , (JDP); crziegler1@hotmail.com, , (CRZ); marinho.paulo05@gmail.com, , (PGTMF)

### Recebido:

19 de setembro de 2023

### Revisado:

29 de abril de 2024

### Aceito para publicação:

8 de maio de 2024

### Publicado:

2 de julho de 2024

### Editor de Área:

Jorge Barbosa Soares, Universidade Federal do Ceará, Brasil

### Palavras-chave:

Análise estrutural.  
Deformação.  
Tensão.  
Instrumentos medidores.  
Retroanálise

### Keywords:

Structural analysis.  
Strain.  
Stress.  
Measuring instruments.  
Backcalculation.

DOI: 10.58922/transportes.v32i2.2949

### RESUMO

A necessidade do desenvolvimento e aprimoramento de sistemas de análise estrutural dos pavimentos asfálticos possibilitou o surgimento de novos instrumentos de avaliação de desempenho mecânico. A instrumentação fundamenta-se na instalação de sensores que possibilitam avaliar o desempenho mecânico da estrutura por meio de leituras de tensão e deformação. Em estruturas de pavimentos em revestimento asfáltico, a temperatura torna-se também um parâmetro importante a ser avaliado na instrumentação. Desse modo, a instrumentação fornece análise aprofundada acerca da estrutura do pavimento e do desenvolvimento dos esforços do tráfego, bem como do entendimento de suas manifestações patológicas. Esta pesquisa teve o objetivo de analisar o desempenho estrutural de um trecho reestruturado da BR-101 na cidade de Recife por meio da instrumentação do pavimento. Foram instalados instrumentos medidores em diferentes camadas do pavimento e desenvolvido um software para a filtragem e organização dos dados recebidos pelas leituras registradas para cada veículo. Por fim, foi realizada a avaliação estrutural não destrutiva por meio do equipamento FWD. Os sensores apresentaram valores de deformação longitudinal foram da ordem de 290 a 380  $\mu\epsilon$ , deformação transversal de 270 a 290  $\mu\epsilon$  e a tensão vertical determinado pelas células de tensão foram em média de 964 kPa no mesmo horário do levantamento defletoométrico. Verifica-se que existe forte influência da temperatura no comportamento da estrutura. Comparando-se valores médios obtidos na instrumentação com os calculados por meio de retroanálise, observou-se resultados similares entre as deformações e tensões encontradas. Portanto, a utilização da instrumentação de pavimentos mostrou-se como uma importante metodologia para a análise do desempenho estrutural do pavimento estudado, demonstrando valores de tensão e deformação similares aos encontrados na utilização de outros métodos de análise.

### ABSTRACT

The need for the develop and improve systems for structural analysis for asphalt pavements has enabled the emergence of new instruments for evaluating mechanical performance. The instrumentation is based on the installation of sensors that make it possible to evaluate the mechanical performance of the structure through stress and strain readings. In asphalt pavement structures, temperature also becomes an important parameter to be evaluated in instrumentation. In this way, the instrumentation provides in-depth analysis of the pavement structure and the development of traffic efforts, as well as the understanding of its pathological manifestations. This research aimed to analyze the structural performance of a restructured section of BR-101 in the city of Recife through pavement instrumentation.



Measuring instruments were installed in different layers of the pavement and software was developed to filter and organize the data received through the readings recorded for each vehicle. Finally, the non-destructive structural evaluation was performed using the FWD equipment. The sensors presented longitudinal strain in the order of 290 to 380  $\mu\epsilon$ , transverse strain of 270 to 290  $\mu\epsilon$  and the vertical stress determined by the strain cells averaged 964 kPa. It is verified that there is a strong influence of temperature on the behavior of the structure. Comparing the mean values obtained in the instrumentation with those calculated by means of backcalculation, similar results were observed between the strains and stresses found. Therefore, the use of pavement instrumentation proved to be an important methodology for analyzing the structural performance of the studied pavement, demonstrating stress and strain values like those found when using other analysis methods.

## 1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos flexíveis no Brasil são objetivo de inúmeras pesquisas, principalmente em relação à sua capacidade estrutural. A metodologia de dimensionamento vigente foi criada e desenvolvida no ano de 1966 pelo engenheiro Murillo Lopez de Souza, baseando-se no método CBR (*California Bearing Ratio*), utilizado nos Estados Unidos desde primórdios da década de 1920 (Silva, 2018). Devido à natureza empírica da metodologia de dimensionamento utilizada, notou-se uma necessidade de desenvolver procedimentos mais atualizados, considerando propriedades fundamentais das misturas asfálticas, utilizando-se assim técnicas mecanístico-empíricas.

Para tal fim, foi desenvolvido por Franco (2007) o método de dimensionamento MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional) que passou a ser apresentado no ano de 2021 no Brasil. Este método busca dimensionar os pavimentos asfálticos levando-se em consideração o desenvolvimento de patologias no pavimento, tais como, o trincamento por fadiga e a deformação permanente. Pesquisas como a de Nascimento (2015) e a de Fritzen (2016) foram realizadas com o intuito de desenvolver funções de transferência campo-laboratório para a calibração da nova metodologia de dimensionamento.

Além do desenvolvimento do dimensionamento em pavimentos asfálticos, existe também a necessidade de se ampliar técnicas para o acompanhamento e avaliação da qualidade da estrutura construída. Atualmente tem-se como técnicas bem estabelecidas de avaliação estrutural não-destrutiva o método da viga Benkelman, o FWD (*Falling Weight Deflectometer*) e o *Dynaflect*. Consequentemente, desde a metade do século passado, têm-se realizados esforços para se obter um instrumento calibrador campo vs. laboratório para o entendimento do desempenho estrutural do pavimento.

A instrumentação de pavimentos consiste basicamente na instalação de *strain gauges* e células de tensão abaixo da camada do revestimento ou nas demais camadas da estrutura do pavimento, com o objetivo de avaliar a deformação na profundidade instalada e a tensão decorrente do carregamento da superfície oriunda do tráfego, respectivamente. Para Barriera et al. (2020), a seleção atenta e a instalação correta de dispositivos para a detecção das respostas do pavimento aos efeitos do carregamento são fundamentais pré-requisitos para coleta de dados de qualidade, sendo, portanto, essenciais para o sucesso de um projeto de instrumentação.

Por meio da instrumentação é possível analisar e comparar as tensões e patologias desenvolvidas no pavimento com as técnicas existentes. No Brasil, as primeiras experiências utilizando a instrumentação foram realizadas durante o projeto de Silva e Motta (1999) e posteriormente por pesquisadores como Gonçalves (2002), DNIT (2008), Bastos (2016), Ceratti et al. (2017) e Colpo (2019).

Estudos realizados por Coleri e Harvey (2019), Ghuzlan et al. (2023) e Donev et al. (2023) demonstram a necessidade do conhecimento do comportamento real da estrutura e sua comparação aos resultados de laboratório. Coleri e Harvey (2019) identificaram que as previsões de deformação permanente em laboratório são superiores àquelas retroanalisadas das deformações medidas em campo, na ordem de 5 a 11%, concluindo que os ensaios de laboratório fornecem boas previsões para a deformação permanente.

Ghuzlan et al. (2023) estudaram a previsão da deformação permanente de pavimentos asfálticos utilizando o software ABAQUS, calibrado e verificado através dos modelos teóricos e das medidas de resposta obtidas de um simulador de tráfego em um trecho monitorado. Já Donev et al. (2023) compararam a propagação das tensões e deformações ao longo das camadas em pavimentos flexíveis e rígidos, solicitados pelo impacto de um martelo padrão e o realizado por um FWD, através da instalação de sensores nas interfaces das camadas destes pavimentos, concluindo que o uso de um martelo padrão pode ser utilizado para avaliar a frequência de propagação das ondas elásticas através das camadas asfálticas, desde que as interfaces das camadas de revestimento, placa e material granular estejam em pleno contato.

Outra problemática estudada nos pavimentos asfálticos é a correta conservação e restauração das estruturas. Barca e Nogueira (2015) pontuam que as rodovias necessitam de intervenções, motivadas não somente pelos materiais utilizados e sua vida útil de projeto, mas também por fatores como a má execução da obra, falha de projeto e variação de condições ambientais.

Logo, o recapeamento de pavimentos existentes tem sido cada vez mais utilizado como solução para a restauração das estruturas. Dentre as metodologias de recapeamento se destaca o “*whitetopping*”. De acordo com Sanchez e Cancian (2012), se trata do recapeamento do pavimento asfáltico com uma camada de um pavimento de concreto Portland, tornando-se o concreto a camada de capa e o asfalto a sua base.

A instrumentação realizada nesta pesquisa, teve como objeto um trecho experimental da BR101 em Pernambuco, com uma estrutura de pavimento do tipo blacktopping (revestimento asfáltico sob pavimento rígido). A estrutura foi executada com instalação de um geocomposto (Geogrelha com malha asfáltica sintética) com a finalidade de evitar a propagação das trincas das juntas de transferência e longitudinais do pavimento rígido.

Esta pesquisa teve o objetivo de analisar o desempenho estrutural de um trecho instrumentado da BR-101 na cidade de Recife/PE por meio da instrumentação do pavimento, aprimorando o conhecimento de como o pavimento se comporta quando solicitado, proporcionando assim, uma forma mais acurada de prever seu comportamento ao longo do tempo.

## 2. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste tópico foram apresentadas as características mecânicas e funcionais das misturas asfálticas, bem como a metodologia de instalação e análise da instrumentação do trecho experimental da BR-101 no estado de Pernambuco.

### 2.1. Seleção e características do trecho experimental

O trecho monitorado se localiza na BR-101, aproximadamente no quilômetro 69,8, no bairro do Curado, na cidade de Recife em Pernambuco. O trecho em questão possui cerca de 200 metros e é localizado nas margens da unidade local do DNIT, que foi utilizada como centro de apoio para a instalação e monitoramento. A Figura 1 apresenta a localização do trecho monitorado.



Figura 1. Localização do trecho monitorado.

A BR 101/PE na região do Recife possui número de operações do eixo padrão rodoviário (número N) na ordem  $7,2 \times 10^7$ . A estrutura do pavimento consiste em um reforço com 12,0 cm de espessura de Binder (Faixa B – DNIT ES – 031/2006) executado em 3 camadas de 4,0 cm e para a camada de capa foi adotada a espessura de 4,0 cm de revestimento asfáltico modificado por polímero. Sob a primeira camada de binder foi instalado uma geogrelha. Na Tabela 1 é apresentada estrutura do pavimento.

Tabela 1: Características das camadas do pavimento monitorado.

Estrutura	Espessura (cm)
Faixa C – AMP 55/75 (Revestimento)	4,0
Faixa B – CAP 50/70 (Binder)	12,0
Concreto de Cimento Portland (Pré-existente) – CCP	20,0
Concreto compactado a rolo – CCR	10,0

Para a instrumentação do trecho, foram instalados 9 *strain gauges* em formato de roseta de 120 ohms, 4 células de tensão com capacidade de 2,5 MPa e taxa de amostragem de 800 leituras/segundo e 2 termostatos (tipo LM 35) com taxa de amostragem de 1 leitura/segundo sobre cada junta de dilatação, porém entre as camadas do Binder do novo revestimento. Como pode ser observado na Figura 2.

Os *strain gauges* em formato de roseta tem como finalidade determinar as deformações da camada asfáltica. As células de tensão vertical foram instaladas na profundidade 8,0 cm, juntamente com os termostatos (tipo LM 35) de maneira a determinar o comportamento tensão x deformação x temperatura da camada de Binder.



Figura 2. Croqui da instalação dos sensores entre as novas camadas do Binder e da Capa.

### 2.2. Ensaios de laboratório para determinação do Módulo de Resiliência

A mistura asfáltica dosada em laboratório foi avaliada por meio de ensaios mecânicos. O ensaio de Módulo de Resiliência para as camadas de revestimento asfáltico foi realizado a uma temperatura de 25 °C, utilizando uma carga axial de 10% do valor da Resistência a Tração por Compressão Diametral (RT), com um pulso de 1 Hz, de acordo com a norma DNIT 135/2018 (DNIT, 2018). Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Módulos de resiliência das camadas de Capa e Binder.

Revestimento	CP 1 (MPa)	CP 2 (MPa)	CP 3 (MPa)	Média (MPa)
Faixa B – BINDER	8.732	8.727	7.877	8.445
Faixa C - CAPA	6.865	7.618	6.628	7.037

Bernucci et al. (2022) afirmam que valores típicos do MR para concretos asfálticos a temperatura de 25 °C, se situam em torno de 2.000 a 8.000 MPa. Valores inferiores do módulo podem corresponder a ligantes modificados por polímero, como é o caso do ligante utilizado na Faixa C. Contudo, outros fatores como a carga utilizada, temperatura do ensaio e a granulometria dos agregados podem influenciar nos resultados obtidos.

### 2.3. Retroanálise das deflexões com o auxílio do FWD

O levantamento não-destrutivo das deflexões com utilização do equipamento FWD foi realizado de acordo com os parâmetros adotados pela DNER – PRO 273/96 (DNER, 1996). Primeiramente foram realizados levantamentos deflectométricos em 3 pontos, utilizando uma carga de 41 kN. As leituras foram realizadas com distâncias de 0, 200, 300, 450, 650, 900, 1.200, 1.400 e 1.600 mm do local de impacto.

Posteriormente, com o auxílio do *software* BackMeDiNa, foi realizada a retroanálise das bacias deflectométricas para determinação dos módulos de elasticidade estimados a partir do procedimento FWD. Os valores foram então comparados com aqueles obtidos por meio dos ensaios de laboratório (MR da camada de revestimento) e obtidos por meio da instrumentação.

Para a análise das deformações desenvolvidas no pavimento, utilizou-se o *software* AEMC (análise elástica de múltiplas camadas), desenvolvido junto ao *software* MeDiNa. Foram utilizados os valores de módulo de elasticidade obtidos com o auxílio do FWD com o carregamento do eixo padrão, um eixo tandem duplo, com 8,2 t de carga e um raio de 10,80 cm, com o ponto de avaliação sob uma das cargas aplicadas, de forma a se aproximar do carregamento realizado na pista.

De forma complementar, também foram utilizados os *softwares* WinJULEA, um software de análise de pavimentos que utiliza a teoria multi-elástico linear, adotado pelo MEPDG, o ELSYM5, software que utiliza o método das diferenças finitas para cálculo das tenões, deformações e deslocamentos na estrutura e o SISPAV, desenvolvido por Franco (2007). Foram utilizados os mesmos dados de carregamento e módulos elásticos retroanalizados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Retroanálise dos levantamentos do FWD

As bacias deflectométricas medidas em campo e calculadas pelo *software* BackMeDiNa podem ser observadas nas Figuras 3 a 5.

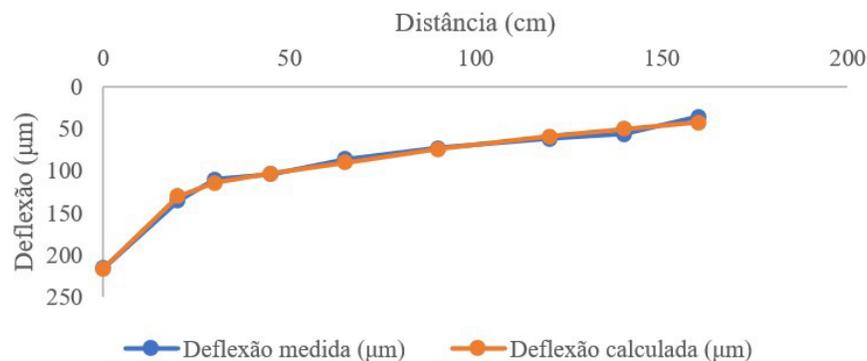


Figura 3. Bacia deflectométrica I (41 KN).

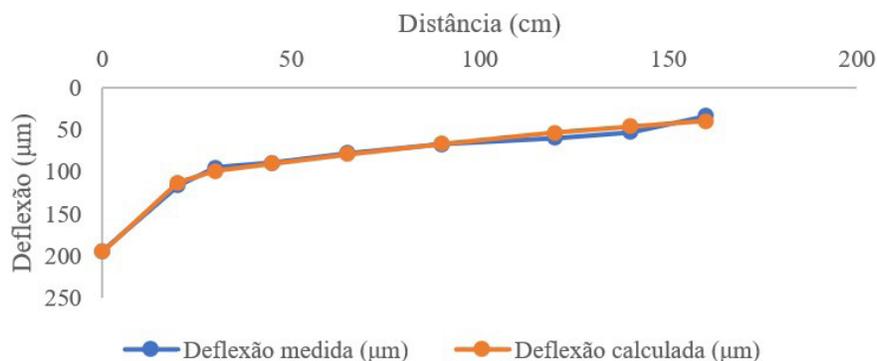
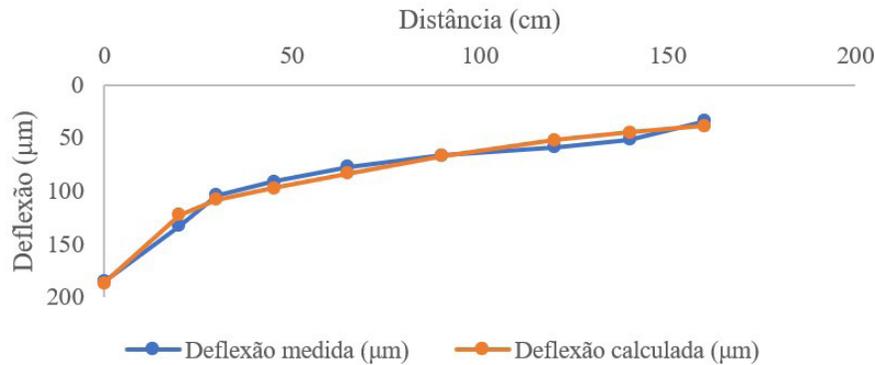


Figura 4. Bacia deflectométrica II (41 KN).



**Figura 5.** Bacia deflectométrica III (41 kN).

Nota-se, portanto, que foram obtidos baixos valores para as deflexões, chegando a valores máximos de 200 micrometros no local de impacto. Isto ocorre devido à alta rigidez fornecida pela base do pavimento que passou a ser a placa de concreto. Os valores estimados para os módulos elásticos de cada camada estão apresentados na Tabela 3. É possível notar que os valores de ME para as camadas de placa de concreto e CCR estão de acordo com aquelas descritas na literatura (Silva, 2006).

**Tabela 3** - Módulos de elasticidade das camadas (41 kN).

Bacia	ME Revestimento (MPa)	ME Placas de Concreto (MPa)	ME CCR (MPa)	ME Subleito (MPa)	RMSE (%)
41 KN I	923	26.987	15.063	186	4,40
41 KN II	964	36.388	17.819	203	4,07
41 KN III	1.284	24.810	6.158	209	6,14
Média	1.057	29.395	13.013	199	

Os módulos retroanalizados para a camada de revestimento apresentam valores distintos daqueles medidos em laboratório, e este comportamento pode ser atribuído a diferenças de temperatura de trabalho, sendo as temperaturas em campo superiores às de referência para caracterização da mistura betuminosa.

Foram então realizadas simulações numéricas utilizando os programas AEMC e o *software* WinJULEA (Window Layered Elastic Analysis), ELSYM5 (Elastic Layered System) e o SISPAV, com os módulos retroanalizados pelo BackMeDiNa para um eixo duplo padrão rodoviário e foram obtidos os valores de deformação e pressão vertical a uma profundidade de 8 centímetros (Tabela 4). É possível observar que os valores de deformação longitudinal e transversal estão situados aproximadamente entre 200 e 400 µm, estabelecendo assim uma faixa de valores para verificação dos medidos pelos *strain gauges*.

Pode-se atribuir a diferença nos valores apresentados aos métodos de cálculo das tensões e deformações que ocorrem na estrutura pelos programas citados. Segundo Franco (2007) o código do AEMC baseou-se no programa JULEA, mas com algumas alterações com o intuito de melhorar seu desempenho, baseando-se em Huang e Rodrigues para implementação da elasticidade não linear; já o JULEA é utilizado no método PAVE, pelo guia da AASHTO, o ELSYM5 apresenta uma análise elástico linear através do método das diferenças finitas e o SISPAV é uma versão anterior do AEMC antes da elaboração do MeDiNa.

Esta análise denota o cuidado na escolha do programa a ser utilizado para o cálculo das tensões de deformações que ocorrem no corpo estradal, sendo recomendado ser utilizado o AEMC, devido a sua atualização para uso no MeDiNa.

**Tabela 4** - Valores de deformação e pressão vertical estimados pelo AEMC, WinJULEA, ELSYM5 e SISPAV a 8 cm de profundidade.

BACIA	Deformação Longitudinal ( $\mu\text{m}$ )	Deformação Transversal ( $\mu\text{m}$ )	Tensão Vertical (kPa)
AEMC	181	150	646
WinJULEA	421	330	516
ELSYM5	123	101	588
SISPAV	301	222	490
Média	274	206	560

### 3.2. Tensões e deformações da instrumentação

A instalação dos sensores de instrumentação ocorreu de forma planejada, com o funcionamento de 57% dos *strain gauges*, além de 50% das células de pressão. As análises primárias dos sistemas de instrumentação se provaram bastante promissoras, demonstrando valores de deformação entre 274 e 318  $\mu\text{e}$  e de pressão vertical de cerca de 964 kPa, deformações na faixa de valores esperada com base na modelagem numérica.

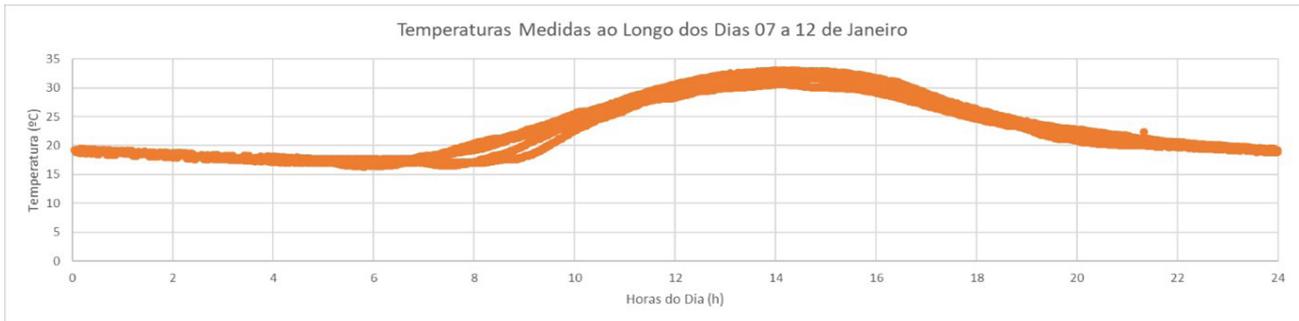
Tomando como referência o levantamento deflectométrico realizado às 10:50, optou-se pela escolha dos dados obtidos com o auxílio da instrumentação no período de 7 de janeiro de 2020 até 12 de janeiro de 2020 entre os horários de 10:30 e 11:30, por apresentar comportamentos em temperaturas aproximadas. Utilizou-se uma rotina computacional com uso de programação em *Python* para compilar valores diários médios de deformações e de pressões verticais. Isto foi feito para validar a eficácia da instrumentação, por meio da análise dos valores médios encontrados. Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 5.

**Tabela 5** - Deformações e pressão vertical entre 07 e 12 de janeiro entre 10:30 e 11:30.

Data	Deformação Longitudinal ( $\mu\text{m}$ )	Deformação Transversal ( $\mu\text{m}$ )	Pressão Vertical (kPa)
07/janeiro	288,5	279,3	929
08/janeiro	315,4	269,0	930
09/janeiro	299,0	261,0	1005
10/janeiro	309,4	271,1	945
11/janeiro	335,6	286,6	920
12/janeiro	360,4	279,3	1.056
<b>Média</b>	<b>318,0</b>	<b>274,4</b>	<b>964</b>

Foi observado que os valores registrados pelos sensores da instrumentação apresentam valores distintos daqueles estimados através da análise no AEMC do BackMeDiNa, podendo este comportamento ser atribuído, em parte, as diferenças de temperatura a que o pavimento estava

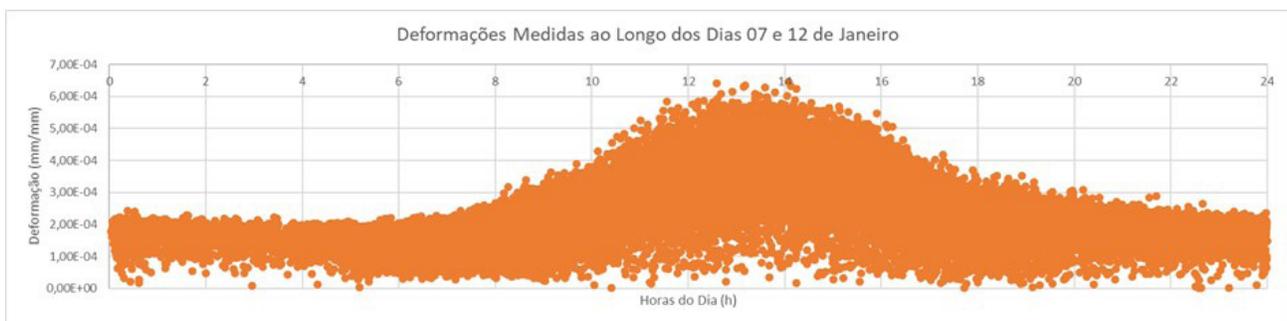
submetido quando do da realização das medidas de tensão e deformação, conforme podemos verificar na Figura 6.



**Figura 6.** Variação de temperatura ao longo do dia a 8,0 cm de profundidade.

A temperatura na profundidade 8,0 cm variou de 16,3 °C à 33,0 °C ao longo do dia, apresentando os maiores valores no período entre 12:00 e 16:00 horas, enquanto a temperatura mínima e a máxima do ar foram 24,4 °C e 31,1 °C respectivamente. A operação da rodovia ocorrendo em temperaturas distintas daquelas utilizadas como referência para caracterização dos materiais demonstra como este fator influencia substancialmente no comportamento da estrutura, e de que como deixar de se considerar sua influência pode acarretar redução da vida útil do pavimento.

Na Figura 7 podemos ver como houve variação nas deformações longitudinais registradas ao longo do dia, acompanhando sua maior dispersão aos aumentos da temperatura de operação da via.



**Figura 7.** Variação das deformações longitudinais registradas ao longo do dia a 8,0 cm de profundidade.

Percebe-se então que no horário em que o levantamento de FWD foi realizado o pavimento sofreu forte influência da temperatura, e este fator pode ter influenciado as diferenças nas medidas realizadas.

As diferenças existentes entre as deformações transversais e longitudinais apresentam valores distintos e isto decorre da forma de aplicação da carga pelos pneus dos veículos em contato com o pavimento, que é elíptica, e não circular, como adotado pelo FWD.

Os valores de tensão vertical apresentaram valores maiores que aqueles estimados pela análise mecânica no horário analisado, tal comportamento pode ser atribuído as tensões medidas por diferentes tipos de carregamentos, quando do compute da média das tensões máximas.

Na Tabela 6 são apresentados a análise estatística dos valores medidos, onde observou-se resultados aproximados àqueles representados pela simulação computacional.

**Tabela 6** - Valores médios das deformações longitudinal e transversal ao longo dos dias 07 e 12 de janeiro a 8,0 cm de profundidade.

	Deformação Longitudinal ( $\mu\text{m}$ )	Deformação Transversal ( $\mu\text{m}$ )
Média	115	93
Desvio Padrão	88	46
Máximo	700	453
Mínimo	52	60
Deformação Característica ( $m+\sigma$ )	203	139

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados da retroanálise a partir dos levantamentos realizados com auxílio do FWD e determinados pelo *software* BackMeDiNa demonstraram alta confiabilidade, detendo valores de erro médio quadrático (RMS) da ordem de 5%. Além disso, os valores dos módulos de elasticidade se mostraram bastante análogos a valores comuns aos materiais empregados, exceto pelo revestimento asfáltico, que obteve valores de módulo de elasticidade inferiores aos medidos em laboratório, o que pode ser atribuído a influência da temperatura, respectivamente.

A utilização de *softwares* computacionais mostrou-se como uma ferramenta eficaz para estimar valores de tensão e deformação. Entretanto, foram encontrados valores diferentes daqueles medidos por meio dos sensores utilizados durante a instrumentação, quando analisamos horários com temperatura elevadas, entretanto, quando passamos para uma análise de todos os valores medidos no período, estes apresentaram valores da mesma ordem de grandeza daqueles estimados pela modelagem computacional.

Portanto, a utilização da instrumentação se mostrou como uma metodologia para a análise do desempenho estrutural do pavimento estudado no trecho experimental da BR-101 na cidade de Recife, demonstrando valores de tensão e deformação similares aos encontrados na utilização de outros métodos de análise, tornando possível estudar o comportamento da camada asfáltica quando solicitada pelos veículos a longo do tempo, e assim, determinar a relação tensão x deformação x temperatura.

#### AGRADECIMENTOS

À Superintendência Regional do DNIT de Pernambuco, ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos, ao Departamento de Estradas de Rodagem de Pernambuco e Governo do Estado de Pernambuco.

#### REFERÊNCIAS

- Barca, M.A. e S.P. Nogueira (2015) *Análise de Técnicas de Conservação de Pavimentos Rodoviários*. Projeto (graduação). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: < <https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/3491/1/Lu%C3%ADs%20Almeida.pdf> > (acesso em 13/06/2024).
- Barriera, M.; S. Pouget; B. Lebental et al. In situ pavement monitoring: a review. *Infrastructures*, v. 5, n. 2, p. 18, 2020. DOI: 10.3390/infrastructures5020018.
- Bastos, J.B.S. (2016) *Considerações sobre a Deformação Permanente de Pavimentos Asfálticos no Dimensionamento Mecânico-Empírico*. Tese (doutorado). Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: < <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/23173> > (acesso em 13/06/2024).
- Bernucci, L.L.B.; L.M.G. Motta; J.A.P. Ceratti et al. (2022) *Pavimentação Asfáltica – Formação Básica Para Engenheiros* (2a ed.). Rio de Janeiro: ABEDA. Disponível em: < <https://trinfotransbrasiliana.com.br/wp-content/uploads/2022/07/PA-Completo-2022.pdf> > (acesso em 13/06/2024).

- Ceratti, J.A.P.; L.A.T. Brito; G.B. Colpo et al. (2017) *Instrumentação In Situ de um Segmento da BR-116 - Estudo Comparativo do Efeito Laboratório-campo da Fadiga. Relatório Final - Concepa/ANTT*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Coleri, E. e J.T. Harvey (2019) The use of laboratory-measured and strain-gauge backcalculated asphalt stiffness for rutting performance prediction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2673, n. 3, p. 323-333. DOI: 10.1177/0361198119825644.
- Colpo, G.B. (2019) *Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas: Ensaios Laboratoriais e Instrumentação in situ* Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, DOI: 10.13140/RG.2.2.23109.27363.
- DNER (1996) DNIT 273/1996 - PRO Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Determinação de deflexões utilizando deflectrômetro de impacto tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)". Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2006) DNIT 031/2006 - ES. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2008) *Projeto de Instrumentação para Medição de Deformação do Pavimento*. Florianópolis: Laboratório de Transportes e Logística - LABTRANS/UFSC.
- DNIT (2018) DNIT 135/2018 - ME: Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação do Módulo de Resiliência - Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNIT.
- Donev, V.; R.D. Flores; L. Eberhardsteiner et al. (2023) *Instrumentation of field-testing sites for dynamic characterization of the temperature-dependent stiffness of pavements and their layers. Structural Control and Health Monitoring*, vol. 2023, n. 2, pp. 1-25. DOI: 10.1155/2023/2857660.
- Franco, F. A. C. P. (2007) *Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos - SISPAV*. Tese (doutorado). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: < [https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/BRCRIS\\_8bfeed73f11bfb91f08d8eaa5a7ced86](https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/BRCRIS_8bfeed73f11bfb91f08d8eaa5a7ced86) > (acesso em 13/06/2024).
- Fritzen, M.A. (2016) *Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos*. Tese (doutorado). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: < <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/391-2016/4707-marcos-antonio-fritzen> > (acesso em 13/06/2024).
- Ghuzlan, K.A.; G.G. Al-Khateeb; A.A. Sharo et al. (2023) Viscoelastic-based finite element rutting predictive models for asphalt pavements, *Emergent Materials*, v. 6, p. 337-354. DOI: 10.1007/s42247-022-00435-2.
- Gonçalves, J.F.P. (2002) Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Disponível em: < <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2300/000367657.pdf> > (acesso em 13/06/2024).
- Nascimento, L.A.H. (2015) *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. Tese (doutorado). Faculty of North Carolina State University, Raleigh, North Carolina. Disponível em: < <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015PhDT.....129N/abstract> > (acesso em 13/06/2024).
- Sanchez, A.S.V. e V.A. Cancian (2012) *Características do Whitetopping e seu Emprego nas Rodovias Brasileiras: Um estudo de Revisão*. Monografia (graduação). Universidade Paranaense, Toledo, PR. Disponível em: < <https://www.confex.org.br/midias/uploads-imce/Contecc2021/Civil/APLICA%C3%87%C3%83O%20DE%20WHITETOPPING%20PARA%20RECUPERA%C3%87%C3%83O%20RODOVI%C3%81RIA%20DE%20PAVIMENTOS%20FLEX%C3%8DVEIS.pdf> > (acesso em 13/06/2024).
- Silva, A.J. (2006) *Estudo da Viabilidade de Utilização da Cinza Pesada em Adição ao Concreto Compactado com Rolo (CCR) Destinado a Camada de Base de Pavimentos Híbridos*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Disponível em: < <https://rodoviasverdes.ufsc.br/files/2010/03/alexandre.pdf> > (acesso em 13/06/2024).
- Silva, J.E.G. (2018) *Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos - Medina, Avaliação da Duplicação da AL-145*. Projeto (graduação). Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, AL. Disponível em: < > (acesso em 13/06/2024). Disponível em: < <https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/4810/1/M%C3%A9todo%20nacional%20de%20dimensionamento%20de%20pavimentos%20-%20medina,%20avalia%C3%A7%C3%A3o%20da%20duplica%C3%A7%C3%A3o%20da%20AL-145.pdf> > (acesso em 13/06/2024).
- Silva, P. D. E. A. e L. M. G. Motta (1999) Instrumentação da pista circular experimental do IPR/DNER, *Transportes*, v. 7, n. 2, p. 30-46. DOI: 10.14295/transportes.v7i2.227.