

---

## INFLUÊNCIA ESTRUTURAL DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO PÓS-RECONSTRUÇÃO

### *STRUCTURAL INFLUENCE OF POST-RECONSTRUCTION ROAD PAVEMENT*

*Antonia Fabiana Marques Almeida*<sup>1,2</sup>

*Lucas Cavalcante de Almeida*<sup>1,3</sup>

*Francisco Heber Lacerda de Oliveira*<sup>1,4</sup>

#### **Resumo**

O levantamento estrutural de uma rodovia avalia a capacidade de carga do pavimento e, a partir dos seus resultados, podem ser indicadas as medidas de manutenção ou reabilitação para garantia da sua vida útil. Esses levantamentos também podem ser utilizados para estimar, por meio de retroanálises, parâmetros dos materiais constituintes das camadas do pavimento. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo analisar os dados oriundos de levantamento deflectométrico de um trecho de rodovia em pavimentação flexível para verificar a eficácia da sua reconstrução e as informações de módulo de resiliência obtidas por retroanálises. Os resultados mostraram que, de maneira global, a reconstrução foi adequada para a capacidade estrutural da rodovia, com exceção de alguns segmentos, e que a análise deflectométrica e a retroanálise podem ser alternativas viáveis se comparadas aos ensaios destrutivos.

**Palavras-chave:** Pavimento, Avaliação, Retroanálise, Deflectometria, Módulo, Deflexão.

#### **Abstract**

The structural evaluation of flexible pavement is a crucial procedure for assessing the pavement's load capacity and adopting maintenance or rehabilitation strategies to guarantee its useful life. These evaluations estimate, using backcalculation, theoretical parameters of the constituent layers materials. This work aims to analyze the data from the deflectometric assessment of a highway stretch to verify the effectiveness of its reconstruction and verify the calculated module and deflection information. The estimated errors of the deflections calculated compared to those obtained in the field were lower for the knowledge of the module information of the layers and higher when the data were not available. Even so, when the modulus values are not available, it can be a viable alternative when compared to destructive tests.

**Keywords:** Pavement, Evaluation, Backcalculation, Deflectometry, Modulus, Deflection.

## 1 INTRODUÇÃO

Obras de manutenção e reabilitação (M&R) de pavimentos rodoviários destinam-se a assegurar-lhes uma vida útil necessária à garantia de um desempenho satisfatório para a segurança, o conforto e o custo operacional veicular. Para que isso ocorra da maneira mais racional possível, são necessárias avaliações periódicas das suas condições funcionais e estruturais.

Considerando especificamente as avaliações estruturais, tem-se que as deflexões de campo e os raios de curvatura das bacias de deformação, obtidos dos levantamentos deflectométricos, são os principais parâmetros que caracterizam a capacidade estrutural dos pavimentos rodoviários no Brasil (DNER, 1979). A depender do comportamento desses parâmetros e fundamentados nos critérios de viabilidade técnica e econômica, podem ser indicadas múltiplas estratégias de M&R nos segmentos avaliados.

---

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – Brasil.

<sup>2</sup>fabiana@det.ufc.br

<sup>3</sup>lucascavalcante@det.ufc.br

<sup>4</sup>heber@det.ufc.br

Ocorre que, na maioria dos casos, não são selecionadas as estratégias de M&R mais viáveis e, sim, uma estratégia única para todo o segmento a ser reabilitado, considerando apenas o critério econômico. Essa tomada de decisão é adotada, sobretudo, devido às restrições orçamentárias e à ausência de estudos mais detalhados das estratégias que possam garantir um maior incremento da capacidade de carga dos pavimentos durante sua vida de projeto. Assim, é comum que pavimentos recém-reabilitados apresentem uma baixa capacidade estrutural, proporcionando o surgimento de defeitos precoces e, por consequência, reduzindo sua vida útil.

Diante do exposto, este artigo tem o objetivo de analisar o desempenho estrutural de um trecho rodoviário de pavimentação flexível antes e após solução única de reconstrução de toda sua extensão (23,53 km), cuja estratégia não foi efetivamente para alguns segmentos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com CNT (2017), em um estudo realizado para avaliações de obras rodoviárias recém-concluídas sob jurisdição federal, verificou-se que 82% das obras auditadas apresentavam problemas de caráter estrutural. Foi verificado o surgimento precoce de defeitos relacionados à estrutura, em média, sete meses após o término da obra, inferindo que não há correlação entre a quantidade de defeitos verificados e o intervalo de tempo entre recebimento da obra e a execução dos testes. Os defeitos de caráter precoce ocorreram em função, sobretudo, da má qualidade na execução da obra, podendo ter outras causas e consequências (Quadro 1).

**Quadro 1** - Causas e consequências para ocorrência de defeitos em pavimentos.

Causa	Consequência
Método de dimensionamento	Método empírico; Condições climáticas diferentes; Estudo dos materiais; Não incorporação de novos tipos de veículos.
Tecnologias e processo construtivo	Priorização do custo em detrimento da técnica; Falta de rigor técnico quanto à execução dos ensaios de materiais.
Manutenção e gerenciamento	Falta de manutenção preventiva; Inexistência de um sistema de gerência de pavimentos; Realização de manutenção inadequada.
Fiscalização	Insuficiência de recursos para fiscalizar a execução da obra; Implementação recente de parâmetros de aceitação; Pouco controle de pesagem nas rodovias.

Fonte: Adaptado de CNT (2017).

Assim, o que se observa, de maneira geral, é a baixa durabilidade dos pavimentos rodoviários no Brasil, chegando a atingir os limites de fadiga antes do seu prazo de vida útil. Com isso, levantamentos da condição estrutural devem ser realizados periodicamente, com o objetivo de verificar quais medidas adotar para solução dos problemas encontrados. A depender do dano existente, pode ser necessária, inclusive, a reconstrução do pavimento.

### 2.1 Avaliação estrutural

O pavimento flexível pode ser avaliado do ponto de vista estrutural, com base no critério de deformabilidade, expressos pelas medidas de deflexões recuperáveis (DNER, 1979) obtidas em levantamentos deflectométricos. O objetivo é analisar o desempenho estrutural do pavimento, o que permite conhecer sua integridade estrutural (DER/SP, 2006a).

Essa avaliação ocorre quando se objetiva determinar o grau de deterioração do pavimento, para que estratégias de manutenção e reabilitação (M&R) adequadas possam ser

adotadas. Para tanto, podem ser realizados levantamentos destrutivos ou não-destrutivos, sendo os últimos os mais utilizados (BERNUCCI *et al.*, 2010), principalmente por permitirem ensaios em grandes extensões e várias medições no mesmo ponto, inclusive em períodos distintos com a verificação do comportamento da estrutura ao longo do tempo.

Assim, os levantamentos não-destrutivos, como os que utilizam a aplicação de carga estática por meio da Viga Benkelman ou os de impacto, como o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), permitem a obtenção de leituras dos deslocamentos com a aplicação de cargas espaçadas a partir dos pontos de carregamento, gerando as respectivas bacias de deflexão. Esse levantamento é normalizado por DNIT (2010), para rodovias federais brasileiras, e nas rodovias sob jurisdição estadual, como em São Paulo, por DER/SP (2006a), por exemplo, que recomenda a aplicação de normas do órgão federal. Esses levantamentos permitem avaliar a condição estrutural dos pavimentos e prever os módulos elásticos ou resilientes das camadas. Ressalte-se que os módulos de resiliência das camadas do pavimento podem não ser precisos, mesmo que a bacia de deflexão calculada esteja dentro dos limites toleráveis (NEGA, NIKRAZ e AL-QADI, 2016).

As deflexões, por sua vez, representam, o deslocamento vertical na superfície. É uma forma de controle, em campo, da deformabilidade elástica da superfície do pavimento, como método indireto de verificação da sua rigidez. As deflexões são ocasionadas pela ação do tráfego, e tendem a aumentar com o tempo e com o surgimento de outros defeitos, como as trincas (MARTINS *et al.*, 2018). As deflexões são utilizadas por DNIT (2013) como medida de aceitação para obras rodoviárias novas ou restauradas.

A análise das deflexões com seus respectivos raios de curvatura das bacias de deformação são parâmetros que DNER (1979) leva em consideração na adoção da técnica a ser escolhida para solução dos problemas existentes. Esse método, porém, baseia-se em informações empíricas, e deve ter como complemento uma análise mecanístico-empírica para embasar tecnicamente a melhor estratégia de M&R, geralmente desenvolvida por meio de técnicas de retroanálise.

## 2.2 Retroanálise

Para fins de projeto de pavimentação, é necessário conhecer os módulos elásticos ou resilientes dos materiais. Todavia, em pavimentos que tenham sido dimensionados pelo método empírico, nos quais o CBR (*California Bearing Ratio*) é a principal característica a considerar para os materiais constituintes das camadas, o conhecimento desses parâmetros pode não existir. Para tanto, pode-se utilizar a retroanálise como um processo que permite a obtenção dos módulos de resiliência das camadas do pavimento e do subleito, a partir da interpretação da forma e da magnitude das bacias deflectométricas que um pavimento apresenta quando submetido a um carregamento externo (BERNUCCI *et al.*, 2010). Um exemplo de carregamento externo que permite a obtenção dessas bacias é por meio da avaliação estrutural.

Os dados obtidos dos levantamentos realizados na avaliação estrutural permitem, por meio de um processo (simplificado ou iterativo), normalmente auxiliado por *softwares* específicos, a obtenção de bacias deflectométricas teóricas semelhantes às medidas em campo e, conseqüentemente, os valores de módulo de resiliência das camadas da estrutura avaliada, seja pelo método tradicional ou com a utilização de Redes Neurais Artificiais (CELESTE e OLIVEIRA, 2019). Esse processo pode representar um auxílio em projetos de reforço, já que não seriam, inicialmente, necessárias a coleta de amostras em campo (COSTA *et al.*, 2017).

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), a justificativa no emprego da retroanálise ocorre pela determinação dos módulos de resiliência nas condições reais de campo, redução

(ou até eliminação) de sondagens para coleta de amostras que seriam utilizadas para determinar os parâmetros desejados em laboratório, redução de custos e aumento na produtividade de coleta de informações, quando comparados aos ensaios destrutivos.

Segundo Albernaz (1997), a obtenção dos módulos de resiliência por retroanálise pode gerar valores equivalentes, que dependem de diversos fatores como a qualidade e a homogeneidade dos materiais, a regularidade das espessuras das camadas, a umidade, dentre outros. Também dependem de verificação contínua dos instrumentos empregados no levantamento e da sensibilidade do cálculo, que podem acarretar imprecisão. Entretanto, em casos de infraestruturas rodoviárias para as quais não se tem disponíveis os parâmetros necessários, as retroanálises proporcionam informações adequadas para a análise das estratégias de M&R a serem adotadas.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Foram utilizadas, as informações referentes a uma determinada rodovia estadual de São Paulo, nos trechos compreendidos entre os km 454,62 e 463 (trecho duplicado) e do 463 ao 478,15 (trecho de pista simples), totalizando 23,53 km. A estrutura do pavimento antes da intervenção (2016) era variável ao longo do trecho (principalmente no que se refere às espessuras das camadas), a saber:

- a. Reforço do subleito com areia argilosa-espessuras entre 20 cm a 70 cm;
- b. Base composta por solo-brita na maioria dos locais investigados, com seis pontos identificados como solo-cimento-espessuras entre 10 cm a 30 cm;
- c. Revestimento em concreto asfáltico- espessuras entre 3 cm a 12 cm.

A partir do levantamento deflectométrico realizado em 2016 foi dimensionado o reforço da estrutura. Porém, ao realizar a análise mecanístico-empírica, constatou-se que esse reforço não seria adequado para suportar as cargas provenientes do tráfego para o restante da vida útil. Como em levantamentos e análises realizados no ano de 2013 já havia sido verificada a necessidade de correção geométrica de todo o trecho, foi indicada a demolição de todas as camadas existentes e posterior reconstrução com a seguinte estrutura (das pistas principais e paradas de ônibus, do topo do subleito até o revestimento):

- a. Reforço de subleito com aproveitamento do material oriundo da demolição, com CBR maior que 20% - espessura de 20 cm;
- b. Base com Solo-Brita Tratado com Cimento (SBTC), com 70% de solo, 30% de brita 2 e 4% de cimento - espessura de 18 cm;
- c. Imprimação betuminosa impermeabilizante e ligante;
- d. Binder em concreto asfáltico com Faixa II (DER/SP, 2006b) - espessura de 4,5 cm;
- e. Binder em concreto asfáltico com Faixa II (DER/SP, 2006b)- espessura de 4 cm;
- f. Revestimento em concreto asfáltico modificado por polímeros com Faixa III (DER/SP, 2006b)- espessura de 4 cm.

O trecho de pista simples, além da reconstrução, também foi contemplado com duplicação. Foi realizada uma avaliação estrutural dos trechos da rodovia em estudo em fevereiro de 2016, compreendidos entre os quilômetros 454,62 e 478,15, portanto antes da sua reconstrução. A obra foi finalizada em abril de 2019, e nesse mesmo mês foi realizada outra avaliação estrutural, por meio do levantamento deflectométrico com o uso do *Falling Weight Deflectometer* (FWD), que, também, foi empregado em 2016. Foram levantados os dados das bacias deflectométricas – deflexão característica máxima e raio de curvatura – em todo o trecho, conforme indicado em DNER (1979) e DER/SP (2006a). A Tabela 1 apresenta a

quantidade de pontos que foram analisados nas trilhas de roda interna e externa dos lados direito e esquerdo, em 2016 e 2019.

**Tabela 1** - Quantidade de pontos levantados no trecho analisado em 2016 e 2019.

Posição	2016	2019
Lado direito interna (LDI)	613	590
Lado direito externa (LDE)	494	590
Lado esquerdo interna (LEI)	610	590
Lado esquerdo externa (LEE)	580	590
Total	2.297	2.360

Fonte: Os autores, 2020.

Além disso, foram calculados os valores de deflexão admissível ( $D_{adm}$ ), e verificado quantos segmentos homogêneos apresentaram deflexões máximas ( $D_0$ ) acima do valor estabelecido como limite, calculada a partir do número de repetições do eixo-padrão de 8,2 tf previsto durante o período de projeto da rodovia (correspondente ao Número  $N$ ), conforme Equação (1).

$$\log(D_{adm}) = 3,01 - 0,176 \log N \quad (1)$$

Para a análise dos valores médios de deflexão máxima, foi utilizada a estatística descritiva, por meio de gráficos de dispersão para os dois anos de dados. O intuito é avaliar se houve redução dos valores médios de deflexão em 2019, quando comparados a 2016 em todo o trecho.

Para os valores dos raios de curvatura das bacias de deformação, foi realizada a mesma análise, porém, espera-se que os valores de 2019 sejam superiores aos de 2016, e que sejam, também, maiores que 100 m. Raios inferiores a 100 m em estruturas de pavimentos flexíveis com revestimento em concreto asfáltico sobre bases granulares são considerados críticos (DNIT, 2006).

Além disso, foram elaborados *boxplots* dos dados de deflexão e dos raios de curvatura das bacias de deformação para os cenários antes e após a reconstrução, para investigar se houve redução da variabilidade dos dados e da existência de *outliers*. Também foi verificado se os valores médios de deflexão em cada trilha de roda analisada em cada pista de rolamento estavam compreendidos entre  $30.10^{-2}$  mm e  $50.10^{-2}$  mm, como recomendado por Bernucci *et al.* (2010).

O teste *t* pareado foi realizado para avaliar a melhoria (ou não) encontrada da análise descritiva com as informações amostrais dos pontos coletados, por se tratar de uma análise do mesmo local, porém, em anos distintos (2016 e 2019). No caso das deflexões máximas, o teste teve como hipótese nula ( $H_0$ ) a diferença das médias dos conjuntos amostrais seja igual a zero, ou seja, que as médias sejam iguais. Isso implica dizer que não houve melhoria ou piora. Por sua vez, a hipótese alternativa ( $H_1$ ) é que a diferença das médias dos valores de 2016 e 2019 seja maior que zero, ou seja, que os valores de 2019 sejam inferiores que os valores de 2016, que é o resultado esperado. Para os raios de curvatura das bacias de deformação,  $H_0$  é a mesma das deflexões, porém,  $H_1$  é que a diferença entre as médias de 2016 e 2019 seja menor que zero, ou seja, os valores de 2019 sejam superiores aos de 2016, e que sejam, preferencialmente, maiores que 100 m.

De posse dos dados de campo, foi realizada uma retroanálise das bacias deflectométricas, com o *software* BackMeDiNa, versão 1.1.0 (de abril/2018). Esses dados obtidos foram comparados com os do levantamento de campo e com o cálculo realizado no *software* de cálculo de tensões e deformações AEMC (versão 2.4.1 de janeiro/2019). Para o

cálculo dos valores dos módulos de resiliência (MR), foram inseridas as informações da estrutura existente (2016) e da projetada (2019). O *software* BackMeDiNa inicia os cálculos dos módulos de resiliência com os valores indicados na estrutura do pavimento, e varia os valores de acordo com o erro da retroanálise: quanto maiores os erros, maior a faixa de variação, da ordem de 80%.

Os conjuntos de dados oriundos da retroanálise foram apresentados em formato gráfico, para visualização do comportamento, desde o cálculo no dimensionamento (AEMC) até o comparativo do levantamento de campo e verificado na retroanálise. A partir dessa etapa, pôde-se também obter os valores dos módulos de resiliência dos materiais constituintes da estrutura, calculados pelo *software*, além dos erros oriundos das diferenças entre as deflexões encontradas e as calculadas.

De acordo com Franco (2018), o erro da retroanálise (dado em  $\mu\text{m}$ ) é calculado pelo método da raiz do valor quadrático médio ou RMS (*root mean square*). O RMS é calculado a partir das diferenças encontradas entre as deflexões calculadas ( $d_{calc}$ ) e as deflexões medidas ( $d_{medida}$ ), segundo a Equação (2).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (d_{calc} - d_{medida})^2} \quad (2)$$

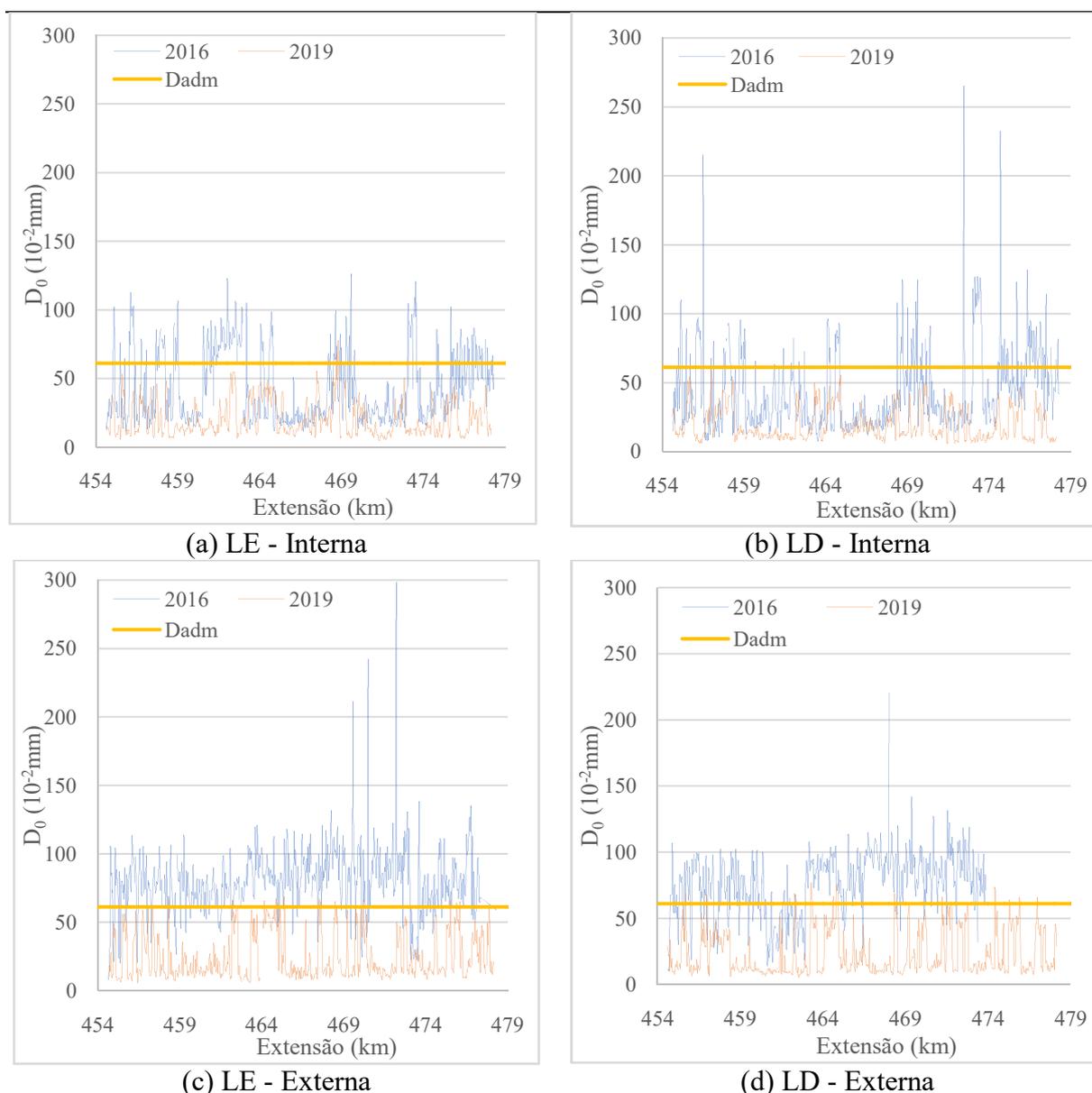
Quando RMS for inferior a  $5\mu\text{m}$  há um indicativo que a retroanálise conseguiu uma correlação satisfatória; se RMS for inferior a  $10\mu\text{m}$ , mas superior a  $5\mu\text{m}$ , a retroanálise conseguiu uma correlação razoável; quando RMS for superior a  $10\mu\text{m}$ , a retroanálise não conseguiu uma correlação satisfatória. A retroanálise realizada pelo *software* BackMeDiNa permite simular novos módulos de resiliência tantas vezes forem necessárias, até que se consiga obter os menores erros possíveis.

#### 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados nos subitens a seguir descrevem as deflexões máximas ( $D_0$ ), os raios de curvatura das bacias de deformação e as retroanálises antes (em 2016) e após (em 2019) a reconstrução do pavimento rodoviário estudado.

##### 4.1 Deflexões máximas ( $D_0$ )

A Figura 1 apresenta os gráficos de distribuição das deflexões máximas ( $D_0$ , em  $10^{-2}\text{mm}$ ) por sentido (lado esquerdo – E e lado direito – D) e por trilha de roda analisada (interna ou externa), nos anos de 2016 e 2019.

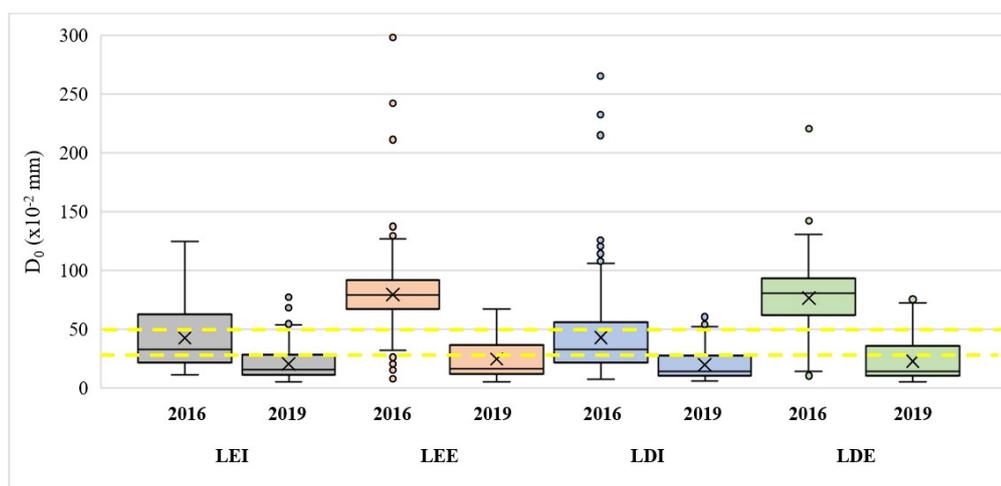


**Figura 1.** Distribuição das medidas de deflexões máximas ( $D_0$ ).

Fonte: Os autores, 2020.

Por meio da Figura 1, verifica-se que em 2019 a maioria dos pontos levantados ao longo da extensão do trecho foi inferior à  $D_{adm}$  (igual a  $61,2 \cdot 10^{-2}$  mm). Além disso, pode-se notar que, de maneira global, a distribuição das deflexões máximas de 2019 tem valores menores quando comparados a de 2016. Todavia, alguns pontos de 2019 apresentaram valores individuais maiores, quando comparados a 2016, tais como, no km 465,41 da Figura 1(b), o valor de deflexão máxima ( $D_0$ ) medido em 2019 foi de  $40,6 \cdot 10^{-2}$  mm e em 2016 foi  $23,2 \cdot 10^{-2}$  mm.

Verificam-se, na Figura 1, a presença de picos de deflexão máxima, que podem ocorrer devido à variabilidade dos dados obtidos ou à presença de *outliers*. Nesse sentido, a Figura 2 apresenta um *boxplot* com informações por trilha de roda analisada e a identificação dos valores limites de  $30 \cdot 10^{-2}$  mm e  $50 \cdot 10^{-2}$  mm (recomendado por Bernucci *et al.*, 2010). Pelos gráficos de dispersão de  $D_0$ , percebe-se que há redução da média dos valores em 2019, quando comparados a 2016, com alguns pontos específicos que mostram que não ocorreu redução.



**Figura 2.** Boxplot das deflexões máximas ( $D_0$ ).

Fonte: Os autores, 2020.

Ainda com relação aos dados da Figura 2, verifica-se que, em 2016, as variações eram superiores quando comparados aos de 2019, dadas as indicações de existência de *outliers*. Quanto aos limites recomendados (indicados pela linha tracejada amarela), para 2016, as trilhas de rodas internas do lado direito e esquerdo atenderam com relação aos seus valores médios, e para os dados de 2019, todas as médias estavam abaixo do valor mínimo. A redução média dos valores verificados em 2019 foi de 61%. Também foi realizada uma inferência estatística com base nas amostras dos pontos coletados no levantamento (Tabela 2).

**Tabela 2** - Resultados dos testes de inferência estatística das deflexões (*t* pareado).

Parâmetros da inferência estatística	LE - Interna		LE - Externa		LD - Interna		LD - Externa	
	2016	2019	2016	2019	2016	2019	2016	2019
Nº de observações	573		558		582		477	
Média ( $10^{-2}$ mm)	42,5	20,7	79,7	24,4	42,7	19,8	76,6	22,2
Variância ( $10^{-2}$ mm)	679,1	157,7	588,9	284,4	888,1	140,4	570,6	270,2
Correlação de Pearson	0,067		0,028		-0,016		0,101	
$t_{crítico}$	1,648		1,648		1,647		1,648	
$t_{observado}$	18,525		44,801		17,185		43,074	
p-valor	1,15E-60		4,11E-19		3,99E-54		1,23E-17	

Fonte: Os autores, 2020.

Pelos resultados do p-valor da Tabela 2, observa-se que para os quatro conjuntos amostrais, a hipótese nula foi rejeitada e, conseqüentemente, pode-se afirmar que as deflexões de 2019 são inferiores às de 2016, a um nível de significância de 5%. A redução também é verificada ao analisar os valores da média e da variância, de, aproximadamente, 39%.

Foram, então, analisados os segmentos homogêneos (SH) considerando os dados de 2016 e de 2019, nos quais se pode aplicar a  $D_{adm}$  calculada. Para o caso de 2016, foi adotada a mesma  $D_{adm}$ , considerando uma análise para o caso de a reabilitação não ter sido executada, e essa estrutura estar recebendo o Número N projetado. A Tabela 3 apresenta a quantidade de SH definidos por trilha de roda analisada e a quantidade  $D_0$  superior à  $D_{adm}$ .

**Tabela 3** - Segmentos homogêneos (SH) totais e com  $D_0 > D_{adm}$ , em 2016 e 2019.

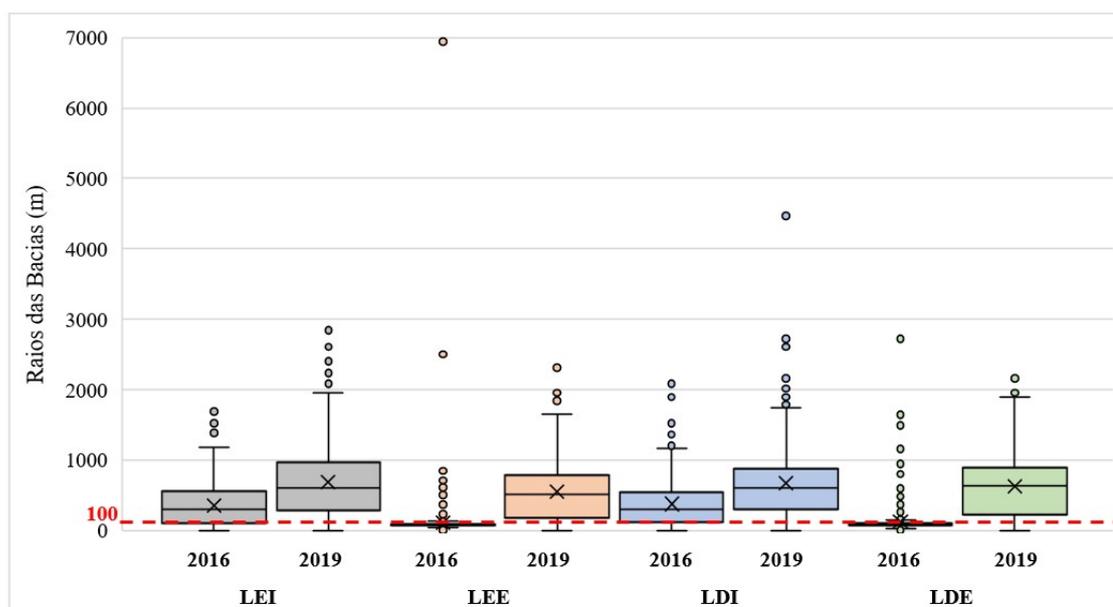
Local	2016		2019	
	SH <sub>Totais</sub>	SH ( $D_0 > D_{adm}$ )	SH <sub>Totais</sub>	SH ( $D_0 > D_{adm}$ )
LD-Interna	13	7(53,8%)	27	0 (0,0%)
LD-Externa	17	17 (100,0%)	26	4 (15,4%)
LE-Interna	16	8 (50,0%)	34	1 (2,90%)
LE-Externa	28	28 (100,0%)	33	4 (12,1%)

Fonte: Os autores, 2020.

Conforme a Tabela 3, constata-se que as trilhas de roda externas apresentaram maior quantidade de SH com valores de  $D_0$  superiores à  $D_{adm}$ , quando comparados às quantidades nas trilhas de roda internas. Vale ressaltar que, para os dados de 2016, todos os segmentos homogêneos das trilhas de roda externas apresentaram  $D_0$  superior à  $D_{adm}$ .

#### 4.2 Raios de Curvatura das Bacias de Deformação

A Figura 3 mostra o *boxplot* dos raios de curvatura das bacias de deformação para o trecho em análise para os anos de 2016 e 2019, antes e após a reconstrução, respectivamente.

**Figura 3.** Boxplot dos raios de curvatura das bacias de deformação.

Fonte: Os autores, 2020.

Nota-se, a partir da Figura 3, que LEE, ano 2016, possui raio de curvatura da bacia de deformação médio de 96,3 m, menor que 100 m, indicando uma qualidade estrutural inadequada. Esses valores para as faixas externas podem ser justificados devido ao fato de ser uma zona preferencial de passagem de veículos pesados, o que pode contribuir para que a fase de fadiga do pavimento seja atingida antes das demais faixas como consequência da perda de rigidez do pavimento. Verificou-se, também, que a reabilitação do pavimento foi benéfica, haja vista que as médias dos raios de curvatura das bacias de deformação apresentaram melhora em 2019 quando comparadas a 2016, como pode ser verificada na Tabela 4.

**Tabela 4** - Resultados dos testes de inferência estatística dos raios de curvatura (*t* pareado).

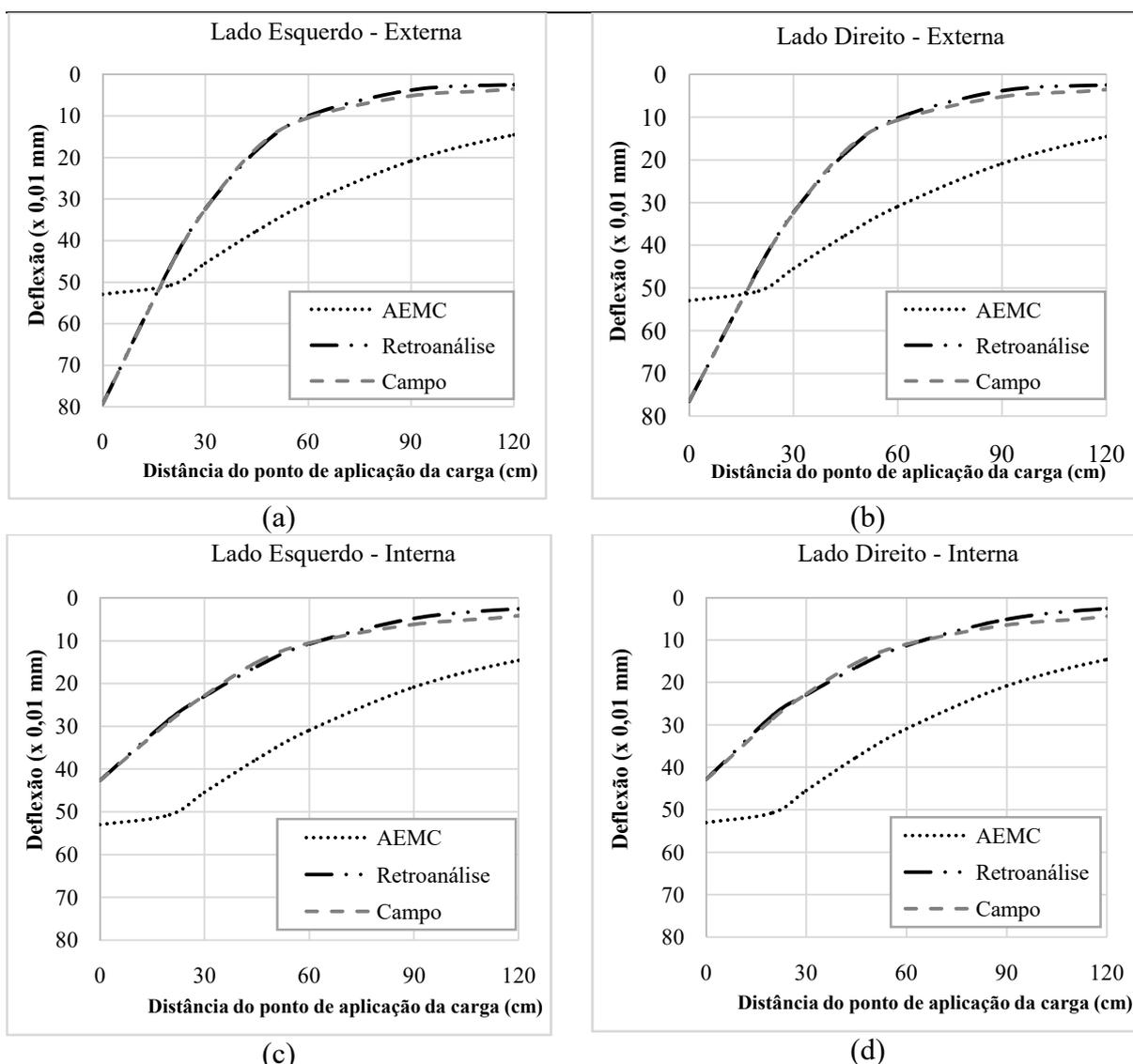
Parâmetros da infer. estatística	LE - Interna		LE - Externa		LD - Interna		LD - Externa	
	2016	2019	2016	2019	2016	2019	2016	2019
Nº de observações	573		554		584		475	
Média (m)	372,2	702,6	96,3	553,0	389,6	671,9	119,8	660,4
Variância (m)	74696,0	235766,5	14759,9	139449,7	96953,3	208530,8	33994,6	173392,4
Correl. de Pearson	0,03		-0,02		-0,14		0,10	
$t_{crítico}$	1,648		1,648		1,647		1,648	
$t_{observado}$	-14,13		-27,20		-11,63		-26,86	
p-valor	2,01E-40		2,33E-104		1,52E-28		1,49E-97	

Fonte: Os autores, 2020.

O aumento percentual médio de todas as faixas analisadas foi de, aproximadamente, 370% no que se refere aos raios de curvatura das bacias de deformação. Esse ganho percentual elevado deve-se, principalmente, às faixas externas, cujos raios em 2016 estavam próximos de 100 m (96,3 m no LE e 119,9 m no LD). Assim como ocorreu nas deflexões, a hipótese nula foi rejeitada a um nível de significância de 5% e, portanto, a média dos valores de raio de 2019 é superior quando comparado a 2016.

#### 4.3 Retroanálise deflectométrica antes da reconstrução (em 2016)

Os gráficos da Figura 4 apresentam as informações de deflexão máxima, obtidas pelo levantamento de campo, da simulação no *software* de dimensionamento AEMC e da retroanálise com o uso do BackMeDiNa.



**Figura 4.** Retroanálise com os Dados das Bacias de Deflexão de 2016.

Fonte: Os autores, 2020.

Pode-se notar, pela Figura 4, que as deflexões calculadas no BackMeDiNa (Retroanálise) são similares às obtidas em campo, com as curvas sobrepostas. Por sua vez, as deflexões calculadas pelo AEMC são diferentes das demais, com predominância de maiores previsões, exceto nas trilhas de rodas externas, no ponto de aplicação da carga até cerca de 20 cm de distância a esse ponto (figuras 4(a) e 4(b)), cuja deflexão prevista é inferior à real medida em campo e à calculada na retroanálise. Nas trilhas de roda internas, figuras 4(c) e 4(d), a deflexão calculada pelo AEMC é sempre superior à medida em campo e calculada pela retroanálise.

Outros dados obtidos do *software* BackMeDiNa são os módulos de resiliência calculados a partir dos valores oriundos de informações do projeto. A Tabela 5 apresenta os dados da estrutura do pavimento, bem como os valores de módulo de resiliência de projeto e o calculado para cada uma das trilhas analisadas. Vale ressaltar que os dados de espessura das camadas inseridos se referem às médias do trecho analisado. Os módulos de resiliência e os coeficientes de Poisson foram utilizados conforme previsto no projeto de restauração executado após 2016.

**Tabela 5** - Módulos de Resiliência (MR) calculados pelo BackMeDiNa das deflexões de 2016.

Camada	Dados de projeto			Módulos de Resiliência calculados (MPa)			
	Espessura (cm)	MR (MPa)	Poisson	LEE	LEI	LDI	LDE
Revestimento	5,6	4.000	0,30	359	446	275	332
Base	15,0	4.000	0,20	4644	3902	958	1005
Reforço	29,8	200	0,40	63	71	63	63
Subleito	-	70	0,45	346	333	284	282

Fonte: Os autores, 2020.

Como pode ser observado na Tabela 5, a variação dos módulos de resiliência foi superior a 80%, e, conforme indicado por Franco (2018), caso a retroanálise não seja satisfatória, devem ser alterados os valores de módulo inseridos inicialmente. Porém, como foram utilizados os dados do projeto, não foi realizada essa alteração.

Também foram calculados os erros pelo *software* BackMeDiNa, considerando as diferenças entre os valores medidos em campo e os calculados. A Tabela 6 apresenta esses erros para os dados de 2016, que foram bem próximos quando comparados entre si.

**Tabela 6** - Erros obtidos da retroanálise deflectométrica de 2016.

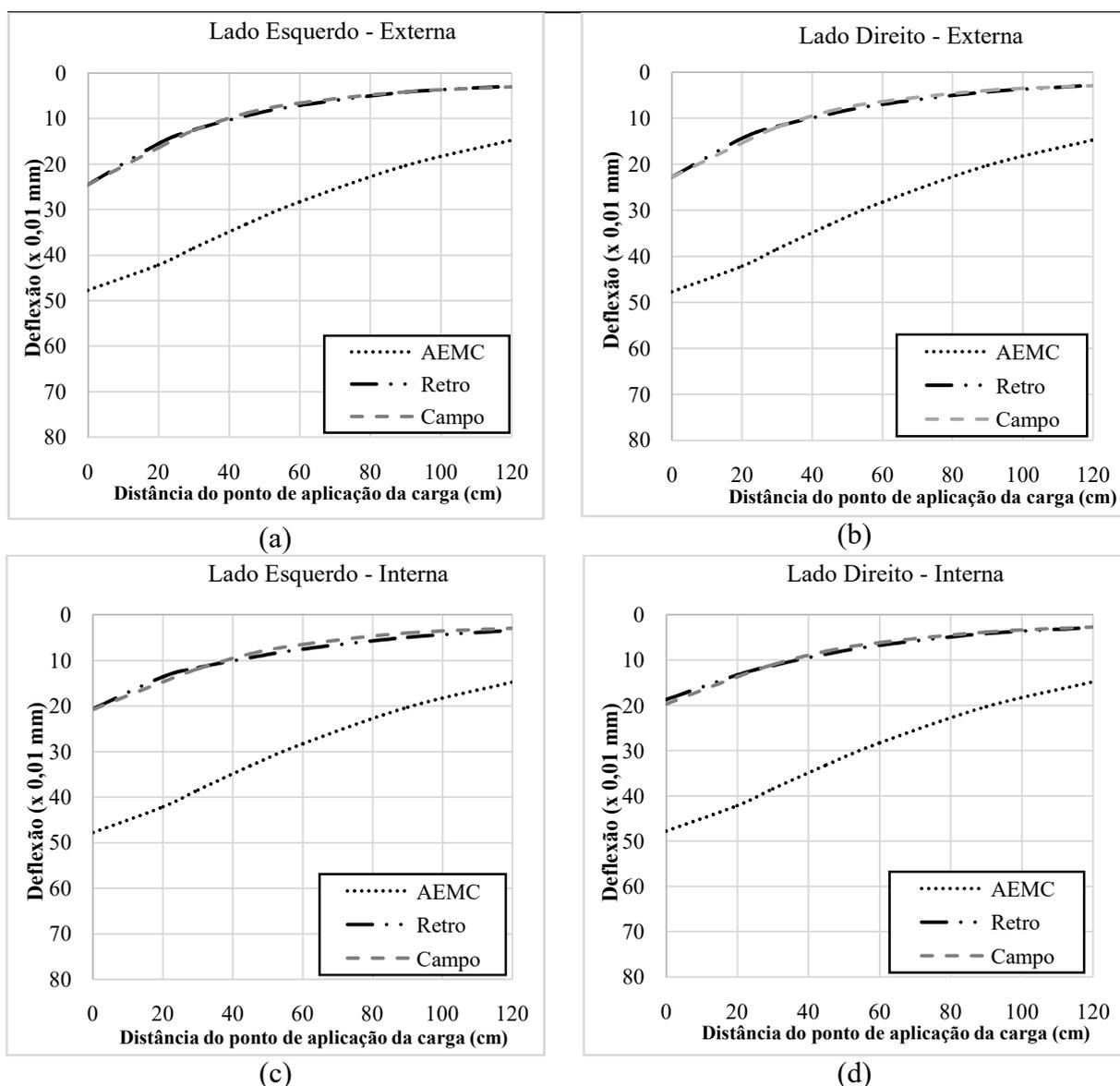
Trilha de roda	Erro – BackMeDiNa ( $\mu\text{m}$ )
LD - Externa	11,588
LD - Interna	11,513
LE - Externa	11,488
LE - Interna	11,322

Fonte: Os autores, 2020.

Os erros apresentados na Tabela 6 diferem mais que o esperado, não obtendo, portanto, uma correlação satisfatória. Essa diferença pode ocorrer devido aos valores de MR terem sido baseados em informações do projeto ou de especificações do órgão rodoviário gestor, sem ensaios de laboratório, não correspondendo aos valores reais dos materiais das camadas existentes em 2016.

#### 4.4 Retroanálise deflectométrica após a reconstrução (em 2019)

A Figura 5 apresenta os gráficos com as informações de deflexão obtidas do campo, da simulação no *software* de dimensionamento AEMC e pela retroanálise com o uso do BackMeDiNa, para 2019.



**Figura 5.** Retroanálise com os Dados das Bacias de Deflexão de 2016.

Fonte: Os autores, 2020.

Observa-se pelas linhas deflectométricas da Figura 5, que as bacias obtidas no processo de retroanálise pelo *software* BackMeDiNa seguem a tendência das bacias obtidas a partir dos módulos das bacias obtidas em campo em todas as faixas analisadas. Vale ressaltar que os dados do AEMC são para os módulos de resiliência definidos em projeto. Foram também, obtidos os módulos de resiliência na etapa de retroanálise, apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7** - Módulos de Resiliência (MR) calculados pelo BackMeDiNa das deflexões de 2019.

Camada	Dados de projeto			Módulos de Resiliência calculados (MPa)			
	Espessura (cm)	MR (MPa)	Poisson	LEE	LEI	LDI	LDE
Revestimento	12,5	4.000	0,30	1132	1306	2236	1132
Base	18,0	4.000	0,20	4890	9345	7019	6193
Reforço	20,0	200	0,40	386	517	367	411
Subleito	-	70	0,45	325	295	347	325

Fonte: Os autores, 2020.

Para o revestimento asfáltico houve uma variação nos valores de módulo entre as trilhas de 1132 a 2236 MPa, de 4890 a 9345 MPa para a base, de 367 a 517 MPa para a sub-base e de 295 a 347 MPa para o subleito. Observa-se que o módulo de resiliência inserido a partir de informações do projeto tem valor elevado para a camada de base, igual ao do revestimento asfáltico, pois o material trata-se de uma mistura estabilizada com cimento. A Tabela 8 apresenta os erros oriundos do cálculo no BackMeDiNa.

**Tabela 8** - Erros obtidos da retroanálise deflectométrica de 2019.

Trilha de roda	Erro – BackMeDiNa ( $\mu\text{m}$ )
LD – Externa	5,160
LD – Interna	5,637
LE – Externa	4,663
LE – Interna	7,341

Fonte: Os autores, 2020.

Pela Tabela 8, os erros obtidos da retroanálise de 2019 foram menores que os de 2016, obtendo-se, na trilha de roda externa do lado esquerdo, um valor inferior a 5  $\mu\text{m}$ , considerado de correlação satisfatória. Para as demais, a correlação foi razoável, pois estão abaixo de 10  $\mu\text{m}$ . Assim, a retroanálise, considerando os dados de projeto e levantamento de 2019, gera uma estimativa de deflexão e de otimização do módulo de resiliência com maior precisão e confiança aceitável, embora a mistura da camada de base empregada neste projeto não esteja disponível no banco de dados do *software*, sendo, neste caso, utilizado material com características técnicas equivalentes.

## 5 CONCLUSÕES

O presente artigo analisou, por meio de dados de levantamentos deflectométricos e retroanálises, o desempenho estrutural de um pavimento flexível rodoviário antes e após sua reconstrução. A análise dos resultados indicou que a reconstrução, como solução única de reabilitação do pavimento, promoveu uma melhoria na sua capacidade de carga, embora alguns segmentos não tenham atendido aos critérios estruturais de projeto.

O estudo demonstrou que não se deve restringir a análise das soluções de manutenção e reabilitação de pavimentos rodoviários ao disposto rigorosamente nas normas existentes. O recomendado é a realização de análises estatísticas, a partir de dados mecânicos, sobretudo quando obtidos por levantamentos deflectométricos que são úteis nas retroanálises, pois, como nem sempre há disponibilidade dos parâmetros estruturais, é possível a sua obtenção pela utilização de *softwares* específicos, evitando ensaios destrutivos no pavimento. Esses *softwares* realizam o dimensionamento considerando a influência estrutural de maneira global, a partir do desempenho e dos limites de fadiga dos materiais empregados.

Por fim, tem-se que esta pesquisa é necessária, no contexto dos pavimentos flexíveis rodoviários, com intuito de apresentar resultados que, posteriormente, possam estruturar um banco de dados robusto acerca de dimensionamento por modelos empírico-mecanicistas e a tomada de decisão em projetos futuros.

---

## Referências

ALBERNAZ, C. A. V. **Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão**. Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro, 1997.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Ed. ABEDA/PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 2010.

CELESTE, A. B.; OLIVEIRA, F. H. L. Study of retroanalysis of asphaltic pavements resilience modules with the use of artificial neural networks. **Transportes**, v. 27, n. 4, p. 123-133, 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** – Brasília: CNT, 2017.

COSTA, T. C.; PEREIRA, D. A.; DEON, K. C. A. Retroanálise das bacias deflectométricas para obtenção dos módulos de resiliência das camadas de pavimentação da rodovia BR-163/PABrasil. In: 8º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia / V Congresso de Engenharia de Moçambique Maputo, 4-8 setembro, 2017.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO – DER/SP. **Avaliação funcional e estrutural de pavimento**. Instrução de projeto. IP-DE-P00/003. São Paulo. DER/SP, 2006a.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO – DER/SP. **Concreto asfáltico reciclado a quente em usina**. Especificação técnica. ET-DE-P00/032. São Paulo. DER/SP, 2006b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. Norma rodoviária DNER 011/1979 – PRO: **Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro. DNER, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2ª ed. Rio de Janeiro. DNIT, 2006.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. INSTRUÇÃO DE SERVIÇO/DG Nº 13, de 04 de novembro de 2013. **Procedimentos técnicos e administrativos para recebimento de obras rodoviárias de pavimentação de pavimentos novos e restaurados**. Brasília. DNIT, 2013.

---

FRANCO, F. A. C. P. BackMeDiNa – Módulo de Retroanálise do MeDiNa – versão 1.1.0 (abril/2018). Programa para retroanálise de bacias deflectométricas. 2018.

MARTINS, M. F.; BUENO, L. D.; SPECHT, L. P.; HALLAL, R. R.; COELHO, H. O.; PEREIRA, D. S. Avaliação da não linearidade de módulos de resiliência retroanalizados de materiais granulares de base de pavimentos obtidos durante o controle tecnológico da duplicação de uma rodovia no RS. **Revista CIATEC** – UPF, vol.10 (1), p.p.31-42, 2018. doi.org/10.5335/ciatec.v10i1.7860.

NEGA, A.; NIKRAZ, H.; AL-QADI, I. L. Dynamic analysis of falling weight deflectometer. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 3, n. 5, p. 427-437, 2016.