

ARTIGO REF: 7027

RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS PARA OBTENÇÃO DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO DA RODOVIA BR-163/PA BRASIL

Talita Carvalho Costa^(*), Diêgo de Almeida Pereira, Kaio César Arnaud Deon

Centro Universitário do Distrito Federal, Depart. Eng^a Civil (UDF) - Brasília, Brasil

^(*)*Email: talitacarcosta@gmail.com*

RESUMO

O sistema estrutural de um pavimento é caracterizado por sofrer rupturas devido às cargas externas que se acumulam ao longo de sua vida útil. No entanto, muitos pavimentos não atingem o tempo de vida útil desejado para o qual foram dimensionados, tais danos, são relacionados à capacidade de carga do pavimento. Desta forma, pode ser necessário realizar projeto de reforços no pavimento, tendo como base ensaios de campo para a avaliação da estrutura, sendo estes indispensáveis. Assim sendo, com o auxílio do programa Retroanálise/Sispav e seguindo os conceitos mecanísticos-empíricos por meio de levantamentos deflectométricos, que avaliam a condição estrutural do pavimento medindo as deflexões reversíveis que ocorrem na superfície submetida à aplicação de cargas repetidas, foi medido a capacidade estrutural do pavimento flexível de um dos maiores corredores de cargas do Brasil, a rodovia BR-163/PA, localizada no Pará, que apresenta grandes índices de pluviosidade e é solicitada por tráfego pesado.

INTRODUÇÃO

O sistema estrutural de um pavimento é caracterizado por sofrer rupturas devido às cargas externas que se acumulam ao longo de sua vida útil, a partir do momento da abertura ao tráfego. No entanto, muitos pavimentos sofrem danos em sua estrutura antecipadamente, não atingindo o tempo de vida útil desejado para o qual foram dimensionados, tais danos, são relacionados à capacidade de carga do pavimento.

Como consequência, se faz necessário, por vezes, realizar intervenções no pavimento por meio de projeto de reforços. Para a elaboração desse tipo de projeto deve-se realizar uma avaliação estrutural no estado de degradação atual do pavimento e compreender o comportamento estrutural dele. Sendo assim, os ensaios em campo são de extrema importância e indispensáveis nesse tipo de avaliação. No que diz respeito à avaliação estrutural a não destrutiva é a mais adequada, além do levantamento da situação estrutural do pavimento em grandes extensões da pista, por meio da avaliação da deflexão recuperável máxima na superfície do revestimento, permite avaliar, de maneira apropriada a capacidade de suporte por meio de equipamentos estáticos ou dinâmicos e possibilita várias repetições no mesmo ponto [DNIT-IPR-720, 2006b].

Uma das principais utilizações dos dados, obtidos na avaliação estrutural não destrutiva, é a possibilidade de realizar a retroanálise, que tem como objetivo principal obter os módulos elásticos das camadas do pavimento e do subleito *in situ*. Ou seja, a retroanálise consiste em encontrar, por meio de um processo interativo otimizado, uma bacia deflectométrica teórica semelhante à bacia medida em campo. Onde é necessário utilizar software auxiliar, capaz de

calcular essa bacia deflectométrica teórica, com estrutura e carregamento pré-definidos. Por meio deste processo, é possível obter o módulo de rigidez e módulo de resiliência das camadas granulares e do solo da fundação. Assim como, saber a influência em porcentagem, de cada camada na deformação elástica que ocorre na superfície do pavimento [Medina & Motta, 2015].

Os dados obtidos, pela retroanálise, representam um ganho de tempo nos projetos e minimizam a coleta de amostras, contribuindo significativamente para a concepção de projetos de pavimentos mais confiáveis e com maior durabilidade. Considerando o procedimento de projeto de reforços que mais tem evoluído no mundo todo atualmente [Bernucci *et al.*, 2010].

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é medir a capacidade estrutural do pavimento flexível de um dos maiores corredores de cargas do Brasil, a rodovia BR-163/PA, localizada no Estado do Pará, que apresenta grandes índices de pluviosidade durante o ano e é solicitada por tráfego pesado, seguindo os conceitos mecanísticos-empíricos por meio de levantamentos deflectométricos, que avaliam a condição estrutural do pavimento medindo as deflexões reversíveis que ocorrem na superfície submetida à aplicação de cargas repetidas. O estudo está dividido em duas partes, interpretação e análise estatística das bacias de deflexões medidas e a segunda parte da análise é avaliar as condições das camadas do pavimento e terreno de fundação, estimando por meio da retroanálise os módulos elásticos *in situ*.

CONCEITUAÇÃO

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessura finita, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada a resistir aos esforços oriundos dos tráfegos de veículos e ações climáticas, de forma econômica e técnica, com o objetivo de proporcionar melhores condições de rolamento aos usuários, com conforto, economia e segurança [Bernucci *et al.*, 2010].

A estrutura do pavimento flexível é composta por camada superficial (revestimento), Base, Sub-base e Reforço do subleito, constituintes por materiais granulares, solos ou misturas asfálticas. Cujas funções são de proteger tanto a estrutura em si, como o terreno de fundação, limitando os esforços consequentes de cargas aplicadas no pavimento evitando os danos que estas solicitações podem causar. O comportamento da estrutura do pavimento depende das espessuras das camadas, do material e da interação entre as diferentes camadas. Onde cada camada tem uma relação complexa, no entanto a harmonia do comportamento estrutural está relacionada à dependência entre elas [Bernucci *et al.*, 2010; Balbo, 2007].

A avaliação estrutural não destrutiva avalia as condições de deformabilidade dos pavimentos asfálticos, este estudo é fundamental para compreender o comportamento da estrutura. Quando se aplica uma carga no pavimento, tanto as camadas da estrutura como o subleito respondem essa ação, essas respostas são chamadas de deflexões, que varia de camada para camada, dependendo do módulo de elasticidade. Sendo assim, o desempenho de uma estrutura de pavimento está diretamente ligado com as deflexões, quanto maior o valor, menor será o desempenho do pavimento quando solicitado [DNIT, IPR-720, 2006].

No entanto, pavimentos com estruturas distintas, podem apresentar o mesmo valor de deflexão recuperável máxima, variando o arqueamento na deformada. Sendo assim, analisar a estrutura observando apenas a deflexão recuperável máxima pode não representar de forma correta o comportamento estrutural de um pavimento. O mais indicado é levar a deformada em consideração na avaliação estrutural [DNIT-IPR-720, 2006].

Os equipamentos mais utilizados para medir as deflexões podem ser divididos em: Vigas de deflexão; equipamentos dinâmicos de vibração e equipamentos dinâmicos de impacto. Dentre esses, o segundo mais usado no Brasil é o *falling weight deflectometer* (FWD), criado na década de 1980 e introduzido no Brasil em 1994. É um dos equipamentos mais atuais que medem o deslocamento elástico de um pavimento transferindo ao pavimento uma carga dinâmica de impacto.

De forma resumida, o deflectômetro de impacto (FWD) é um equipamento destinado a avaliar a capacidade estrutural de um pavimento, através da medição da sua resposta a uma carga de impacto. O carregamento é resultado da queda de massas a partir de alturas conhecidas, sobre um sistema de amortecedores.

Em resposta a essa força externa, gera uma força interna que vem da natureza dos materiais. Essa força causa deformações nos materiais, fazendo com que as camadas se desloquem. Os deslocamentos são medidos através de geofones ou sensores de deflexão, e o conjunto desses deslocamentos, referente a essa carga aplicada, forma a bacia de deformação. Onde seu formato diz muito a respeito da resistência de um pavimento, quanto mais uniforme for o formato da bacia, mais resistente é a sua estrutura.

Dentre as vantagens de se utilizar o FWD, a maior seria a capacidade que o equipamento tem de simular de forma aproximada, a magnitude e frequência das cargas referente ao tráfego. Além disso, o equipamento permite medir a temperatura do pavimento em campo, apresenta pouca margem de erro, devido o ensaio não ser influenciado pelo operador, e possui maior produtividade [Bernucci *et al.*, 2010].

A retroanálise tem como objetivo principal, obter os módulos elásticos das camadas do pavimento e do subleito, a partir da análise, do formato e magnitude, das bacias de deformações obtidas em ensaios não destrutivos na avaliação estrutural de um determinado pavimento. Sendo que, os módulos elásticos obtidos em campo tem uma acurácia maior, do que aqueles que são obtidos em laboratórios.

De acordo com Pinto [1991], os módulos de elasticidade *in situ* das camadas do pavimento, podem ser obtidos através da retroanálise, a partir do conhecimento das espessuras das camadas e da deformada de superfície para a condição de solitação imposta. Sendo assim, os módulos obtidos representam os módulos resilientes de condições em campo.

Os materiais granulares, por serem mais deformáveis, são responsáveis pelo comportamento elástico do pavimento. Devido esse comportamento, as deflexões que ocorrem em sua superfície, refletem em toda a estrutura do pavimento e subleito. Segundo Medina & Motta [2015], essa contribuição que ocorre em todas as camadas do pavimento, referente à deflexão que é medida em certo ponto do pavimento, está ligada aos módulos de elasticidades das mesmas. Dessa forma, a retroanálise é uma forma inversa de se resolver os problemas relacionados ao dimensionamento de um pavimento novo. Onde, ao medir as deformações resultantes de um carregamento conhecido, possibilita conhecer os módulos que conduziram tais deformações.

Basicamente, os dados de entrada do processo de retroanálise são: a forma do carregamento, a bacia deflectométrica medida em campo, seção-tipo do pavimento, coeficientes de Poisson e faixas de valores modulares para cada camada da estrutura.

O programa Retroanálise é uma ferramenta de rotina do programa Sispav, desenvolvido na tese de doutorado de Franco [2007]. O programa permite retroanalisar bacias deflectométricas obtidas por FWD com objetivo de inferir o módulo de resiliência *in situ* das camadas do pavimento. Os dados necessários para realizar a retroanálise, são inseridos no

programa por meio de um arquivo de dados em formato.txt, contendo os seguintes itens: Número de camadas do pavimento, características das camadas do pavimento, características do carregamento, características das bacias de deflexões medidas que serão analisadas. O programa fornece o módulo de elasticidade através da comparação que é feita entre a bacia do seu banco de dados e o percentual de erro da bacia retroanalisada. Ou seja, através dos intervalos dos módulos de resiliência inferidos em cada camada da estrutura, calcula-se uma bacia de deflexão, essa bacia retroanalisada é comparada com a bacia medida em campo, através dos erros percentuais os valores de módulo de elasticidade são determinados. O usuário tem a opção de assinalar uma bacia específica para retroanalisá-la, ou todas às bacias que constam no arquivo. Na Figura 1 mostra a tela do programa ao fim de uma retroanálise, a curva da bacia medida é representada graficamente em vermelho, e a curva da bacia calculada em azul.

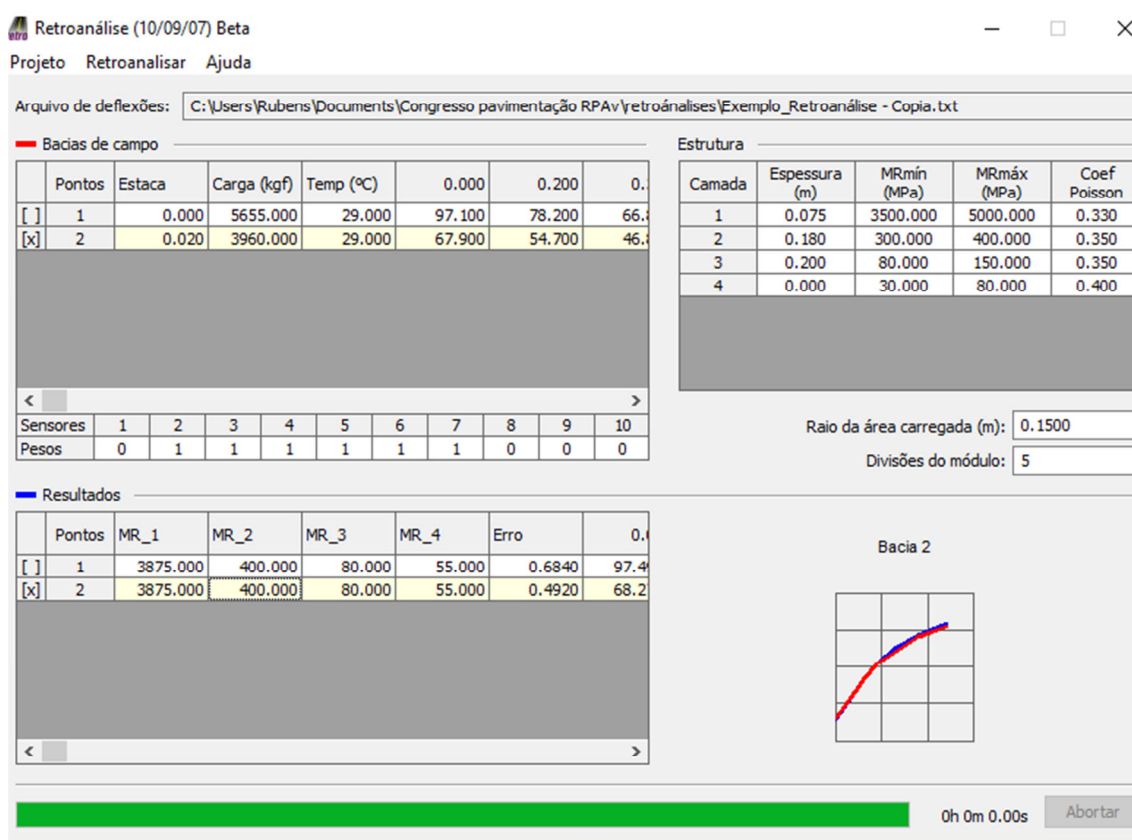


Fig. 1 - Tela do programa retroanálise ao fim do processo de retroanálise.

MATERIAIS E MÉTODOS

A malha rodoviária analisada neste trabalho, foi o pavimento da BR-163/PA Brasil, trecho conhecido como Cuiabá - Santarém. Possui extensão de 879,30 Km, dividido em onze lotes. No entanto, por se tratar de um trecho extenso, a análise será realizada apenas no lote 0.1, que tem uma extensão de 102,30 Km e é localizado no início da Rodovia, Figura 2.

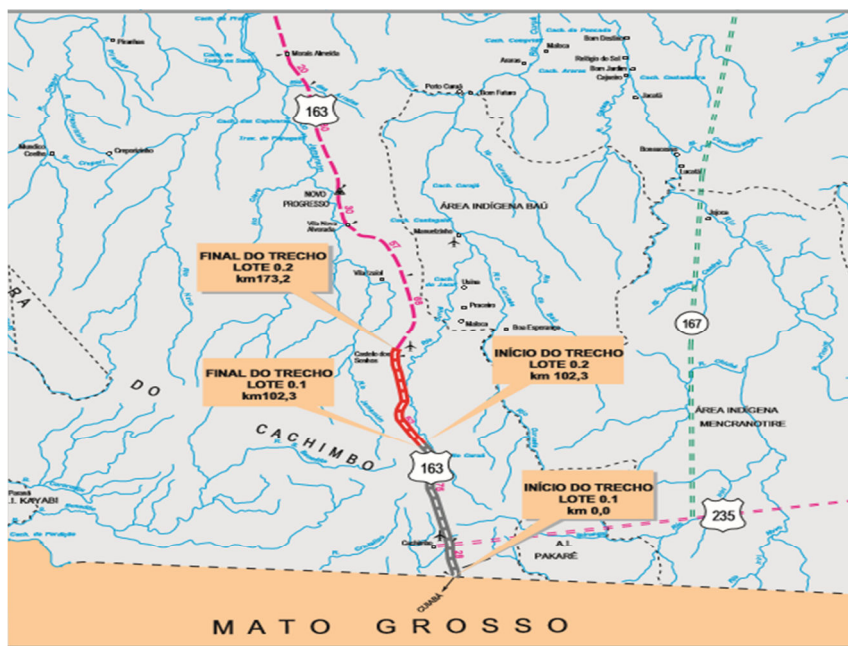


Fig. 2 - Mapa de Situação da BR-163/PA Brasil.

De acordo com os dados do projeto de engenharia de pavimentação do lote 0.1, BR-163/PA [2007], o pavimento foi dimensionado utilizando o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, versão 1996, de autoria do Eng.º Murillo Lopes de Souza. O período de projeto utilizado no dimensionamento do pavimento foi de 10 anos. No entanto, por orientação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), considerou-se no projeto de pavimentação a execução do revestimento em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) em duas etapas: a primeira camada para um período de 2 anos ($N_2 = 7,7 \times 10^6$), com início em 2007, e a segunda camada, a partir de 2009, para suportar a vida de serviço restante do pavimento, considerada de 10 anos ($N_{10} = 6,0 \times 10^7$).

Para realizar a avaliação estrutural do pavimento asfáltico, utilizou-se os dados de uma pesquisa de controle tecnológico realizada na BR-163/PA, que teve início em abril de 2011, para obter as informações da situação do pavimento, antes da execução da segunda camada de revestimento. Para o desenvolvimento dessa pesquisa, foram feitos levantamentos da realidade atual da rodovia, em visita em campo. Ao se realizar a coleta de informações referentes à execução das obras, constatou-se que em sua extensão, existem dois trechos que não foram executadas a camada final de CBUQ, primeiro trecho do Km 0,00 ao Km 12,50 e o segundo trecho do Km 71,30 ao Km 72,20 Figura 3.

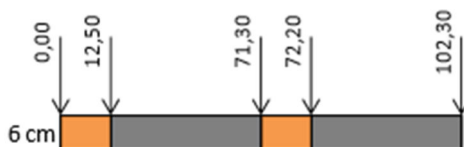


Fig. 3 - Unifilar de camada final executada da primeira etapa.

Os trechos pavimentados apresentaram boas condições, com defeitos não prejudiciais à segurança do usuário, conforme mostram as imagens na Figura 4.



Fig. 4 - Condições do pavimento no Km 13,00 e Km 72,20 respectivamente.

Levantamentos Deflectométricos com o *Falling Weight deflectometer*

Foram realizados ensaios não destrutivos, para medir a capacidade de carga do pavimento. Os levantamentos deflectométricos foram obtidos em junho de 2014, em 1 km de cada trecho destacado em amarelo na Figura 5, no primeiro trecho da estaca 12,500 à estaca 13,520 e no segundo trecho da estaca 72,220 à estaca 73,220, ambas com espaçamento de 20 m entre as estações de ensaio. O equipamento utilizado foi o *Falling Weight Deflectometer Dyantest 8000*. Os deslocamentos foram medidos por sete geofones espaçados de 0, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 cm. Foram empregados cargas de 4,1 e 8,2 t, no entanto, foram utilizados apenas os levantamentos obtidos por 4,1t, por ser essa a carga equivalente ao semi-eixo padrão. Além do carregamento aplicado e dos deslocamentos, o levantamento apresenta as temperaturas do ar e da superfície pavimento e as posições das estacas de ensaio.

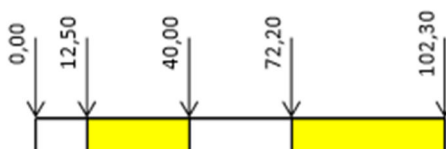


Fig. 5 - Trecho para execução do ensaio deflectométrico

Retroanálise das bacias deflectométricas

Utilizando o programa Retroanálise, calculou-se uma bacia de deflexão semelhante à bacia medida em campo, com o intuito de traduzir o comportamento real da estrutura do pavimento e do terreno de fundação, e assim obter os módulos elásticos das camadas estruturais do pavimento e terreno de fundação analisados.

Para cada bacia de deflexão foram modelados arquivos em formato.txt, utilizados para carregar os dados de entrada no programa Retroanálise. Contendo os seguintes parâmetros: Características das estruturas obtidas por meio de ensaios destrutivos. O primeiro ensaio destrutivo foi realizado em 02 de junho de 2014, através da abertura do poço de inspeção na pista simples, localizado na faixa da direita, do km 30,00, Figura 6. O segundo ensaio destrutivo foi realizado em 03 de junho de 2014, através da abertura do poço de inspeção na pista simples, localizado na faixa esquerda, do km 80,40, Figura 7.

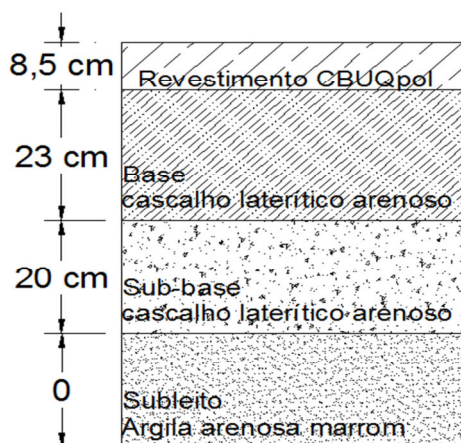


Fig. 6 - Estrutura Km 30,00

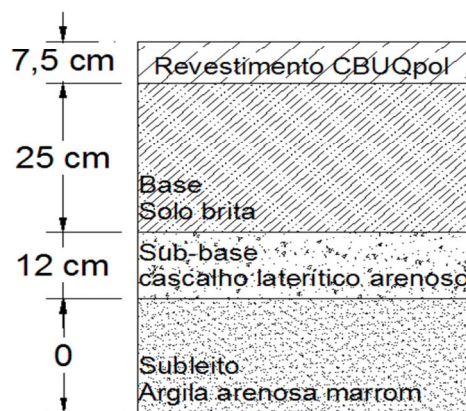


Fig. 7 - Estrutura Km 80,40

Módulo de resiliência mínimo e máximo, onde os valores de intervalo utilizados são os recomendados na instrução de projeto de pavimentação do Departamento de Estradas de Rodagens de São Paulo (DER-SP) demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Intervalo dos módulos de resiliência para retroanálise

Camada	Módulo de Resiliência (MPa)	
	Mínimo	Máximo
Revestimento	2000	5000
Base	150	300
Sub-base	150	300
Subleito	25	75

Coefficiente de Poisson, para misturas asfálticas o valor recomendado é 0,30, Materiais granulares 0,35 e Solos do subleito 0,40.

Além das características e os parâmetros mecânicos dos materiais da estrutura, o arquivo contém o raio da área carregada que é 0,15m, a estaca no qual se obteve a bacia de deflexão, a carga utilizada no ensaio, a temperatura do pavimento medida pelo FWD e os dados da bacia de deflexão obtida através de geofones posicionados em 0, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 cm de distância.

Individualmente, a retroanálise foi feita para todas as bacias deflectométricas, com o objetivo de obter uma acurácia maior nos resultados dos módulos elásticos. Ao todo foram feitas a retroanálise de 51 bacias deflectométricas, obtidas no levantamento do primeiro trecho (Km 30,00), da estaca 12,500 à estaca 13,520, e retroanálise de 51 bacias deflectométricas obtidas no levantamento do segundo trecho (Km 80,40), da estaca 72,200 à estaca 73,220.

Em seguida, em cada trecho obteve-se a média das bacias calculadas e a média das bacias medidas, no qual foram modeladas e representadas graficamente, com o objetivo de verificar se os módulos obtidos a partir da retroanálise correspondem ao comportamento real em cada estrutura analisada.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Observou-se a uma grande variação espacial das deflexões obtidas em ambos os trechos. Parte dessa variação pode ser atribuída ao equipamento, onde a precisão e acurácia dos levantamentos dependem de uma devida calibração e outra parte atribuída à variabilidade das espessuras das camadas durante o processo construtivo como também a heterogeneidade dos materiais que constituem as camadas do pavimento. Nas Figuras 8 e 9 é apresentada a variabilidade da resposta do pavimento em relação às cargas dinâmicas aplicadas pelo FWD.

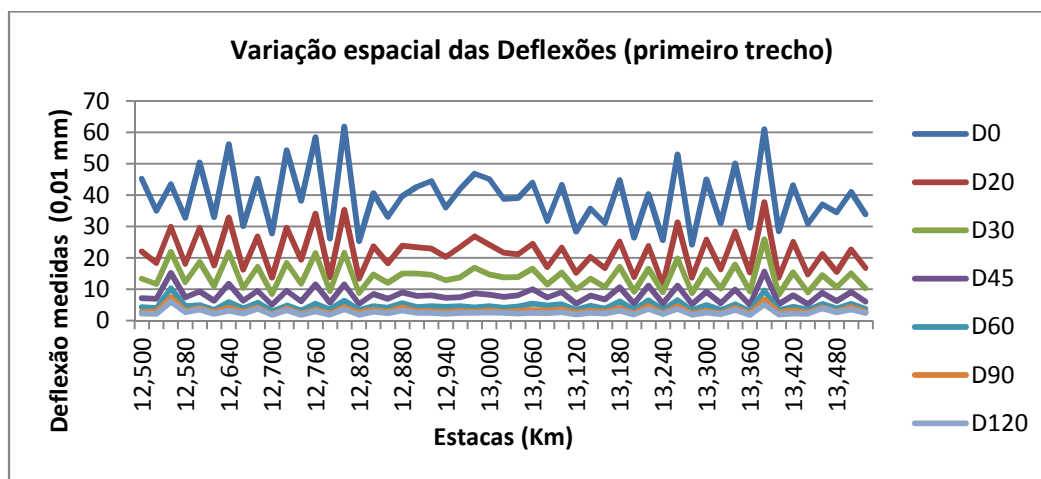


Fig. 8 - Variação espacial das deflexões obtidas com o FWD no primeiro trecho

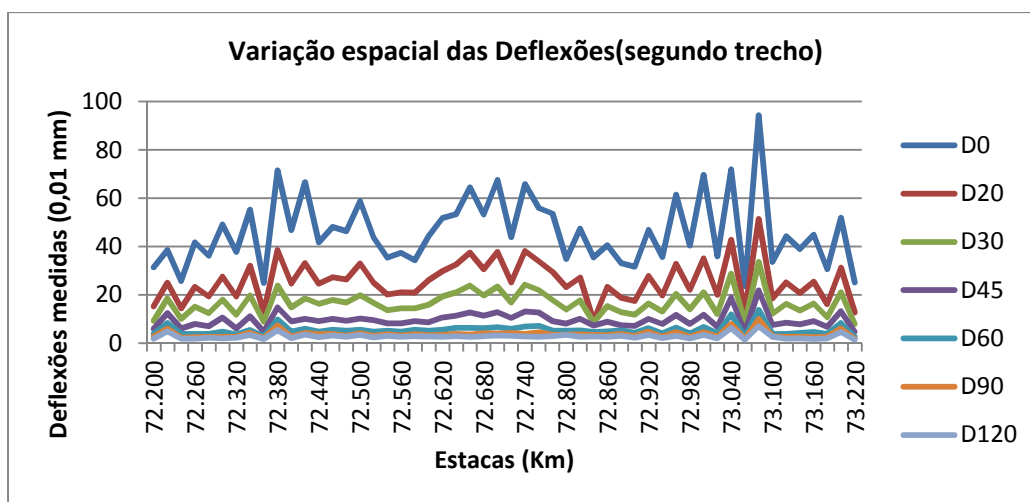


Fig. 9 - Variação espacial das deflexões obtidas com o FWD no segundo trecho

Observa-se que no primeiro trecho as deflexões obtidas são menores dos que do segundo trecho, isso pode ocorrer devido à diferença do tráfego em ambas as faixas. Sabe-se que a BR-163/PA é solicitada por tráfego pesado, por ser pista simples, a hipótese a ser considerada é que a pista da esquerda circule veículos mais pesados do que a pista da direita. O primeiro trecho analisado apresentou uma Deflexão máxima média de $39,4 \times 10^{-2}$ mm, mínima de $24,2 \times 10^{-2}$ mm e máxima de $61,9 \times 10^{-2}$ mm. Já para o segundo trecho analisado, apresentou uma Deflexão máxima média de $46,12 \times 10^{-2}$ mm, mínima de $23,61 \times 10^{-2}$ mm e máxima de $94,3 \times 10^{-2}$ mm.

Devido à variabilidade espacial das deflexões, julgou-se necessário realizar uma análise estatística nos levantamentos deflectométricos em ambos os trechos. Sendo assim, calculou-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV), apresentados nas Tabelas 2 e 3, cujo objetivo é demonstrar que os segmentos apresentados nos levantamentos deflectométricos não são homogêneos e considerá-los com tal, influenciam nos resultados das análises realizadas pavimento e as considerações a respeito deste.

Tabela 2 - Análise estatística das bacias de deflexões medidas da estaca 12,500á estaca 13,520.

Deflexão medida (0,01 mm)							
Distância de carga (cm)	0	20	30	45	60	90	120
Deflexão média	39,37	21,80	14,08	8,12	4,69	3,34	2,73
Desvio padrão	9,61	6,38	4,18	2,43	1,45	1,04	0,83
CV(%)	24,40	29,26	29,71	29,94	30,89	31,08	30,57

Tabela 3 - Análise estatística das bacias de deflexões medidas da estaca 72,220 à estaca 73,220.

Deflexão medida (0,01 mm)							
Distância de carga (cm)	0	20	30	45	60	90	120
Deflexão média	46,12	25,77	16,57	9,63	5,48	3,70	2,85
Desvio padrão	14,26	8,27	5,12	3,16	2,04	1,50	1,10
CV(%)	30,93	32,09	30,89	32,78	37,21	40,53	38,41

De acordo com os resultados mostrados, verifica-se que o coeficiente de variação (CV), no primeiro trecho analisado, variou de 24,40% a 31,08% e no segundo trecho houve uma variação de 30,93% a 40,53%, com maiores valores, em ambos os trechos, sendo verificados nos geofones mais afastados da placa de carga. Estatisticamente, os resultados que apresentam valores acima de 15% já não podem ser considerados homogêneos, entre 15 a 30% apresentam média dispersão e acima de 30% alta dispersão o que implica em dados heterogêneos. Observa-se que o primeiro trecho não apresentou em nenhum ponto um CV menor que 30%. Diferente do segundo trecho em que todos os pontos apresentaram um CV maior que 30%. Além da hipótese desse trecho ser o mais solicitado, os resultados de controle de compactação, apresentaram valores de Grau de compactação igual a 94,1%, com energia Proctor modificada, na camada de base e 93,5%, com energia Proctor intermediária, na camada de sub-base. Os valores de Grau de compactação estão abaixo do valor ideal que é 100% do Proctor modificado e intermediário, podendo apresentar uma variação aceitável +-3%, resultando em densidades máximas específicas menores que as do primeiro trecho e consequentemente apresentando valores de deflexões mais elevadas.

Percebeu-se que além da variabilidade, os valores das Deflexões estão bem elevados, segundo Bernucci *et al.*, [2010] vários fatores influenciam na resposta elástica das camadas dos pavimentos asfálticos, como por exemplo o tipo de revestimento, nível de trincamento, condições climáticas etc. No entanto, é possível indicar um valor típico de Deflexão, um pavimento com revestimento de concreto asfáltico e base granular em boa condição estrutural, deve apresentar Deflexões entre $30 \text{ a } 50 * 10^{-2} \text{ mm}$. Todavia, no primeiro trecho (Km 30,00), 17,6% dos valores das Deflexões foram menores que $30 * 10^{-2} \text{ mm}$, 15,7% apresentaram valores maiores que $50 * 10^{-2} \text{ mm}$ e 66,7% apresentaram valores dentro do intervalo de $30 \text{ a } 50 * 10^{-2} \text{ mm}$. No segundo trecho, 7,8% dos valores de Deflexão apresentaram valores

abaixo de 30×10^{-2} mm, 33,3% apresentaram valores maiores que 50×10^{-2} mm e 60,8% valores dentro do intervalo de 30 a 50×10^{-2} mm. Os valores das Deflexões, no primeiro trecho e principalmente no segundo trecho, não indicam uma boa condição estrutural.

De acordo com a representação gráfica da bacia média medida e bacia média calculada, observou-se a semelhança entre as curvas das bacias apresentando um formato quase aproximado, indicando que a análise foi bem efetuada e os módulos obtidos são satisfatórios, conforme Figuras 10 e 11.

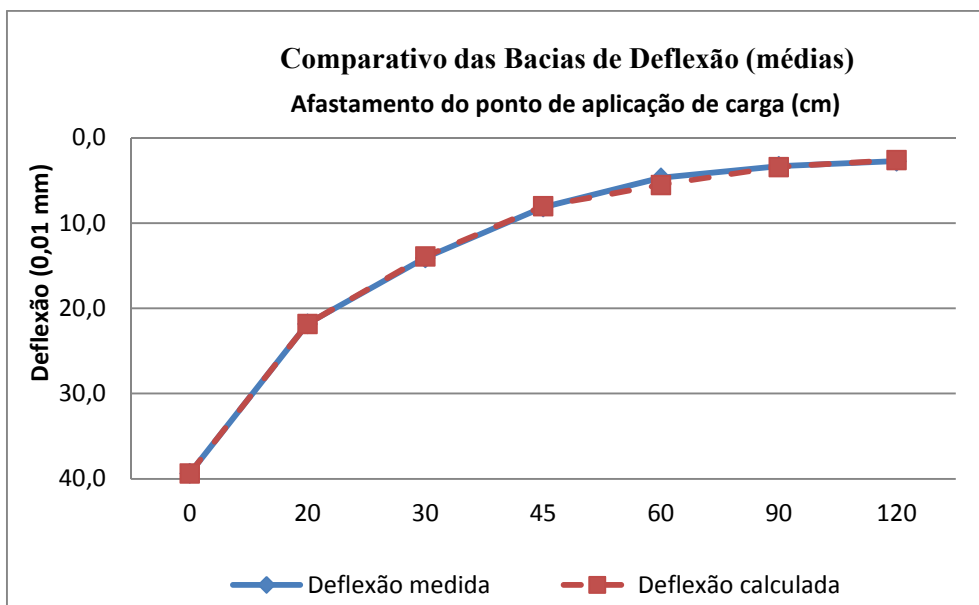


Fig. 10 - Comparativo entre bacia medida e calculada no Km 30,00.

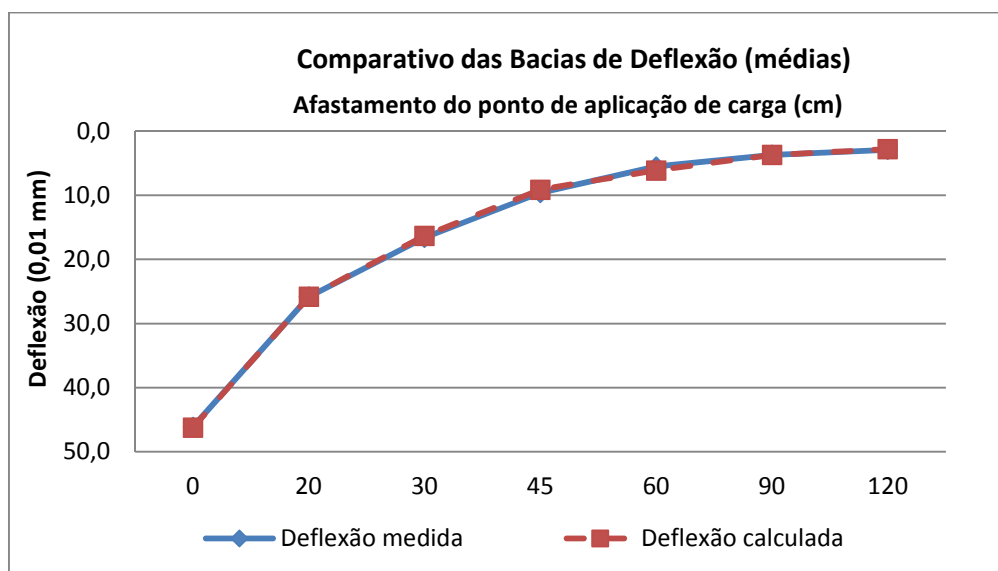


Fig. 11 - Comparativo entre bacia medida e calculada no Km 80,40.

Os módulos elásticos da estaca 12,500 a 13,520 estão apresentados na Figura 12, e na Tabela 4 a análise estatística realizada no Km 30,00.

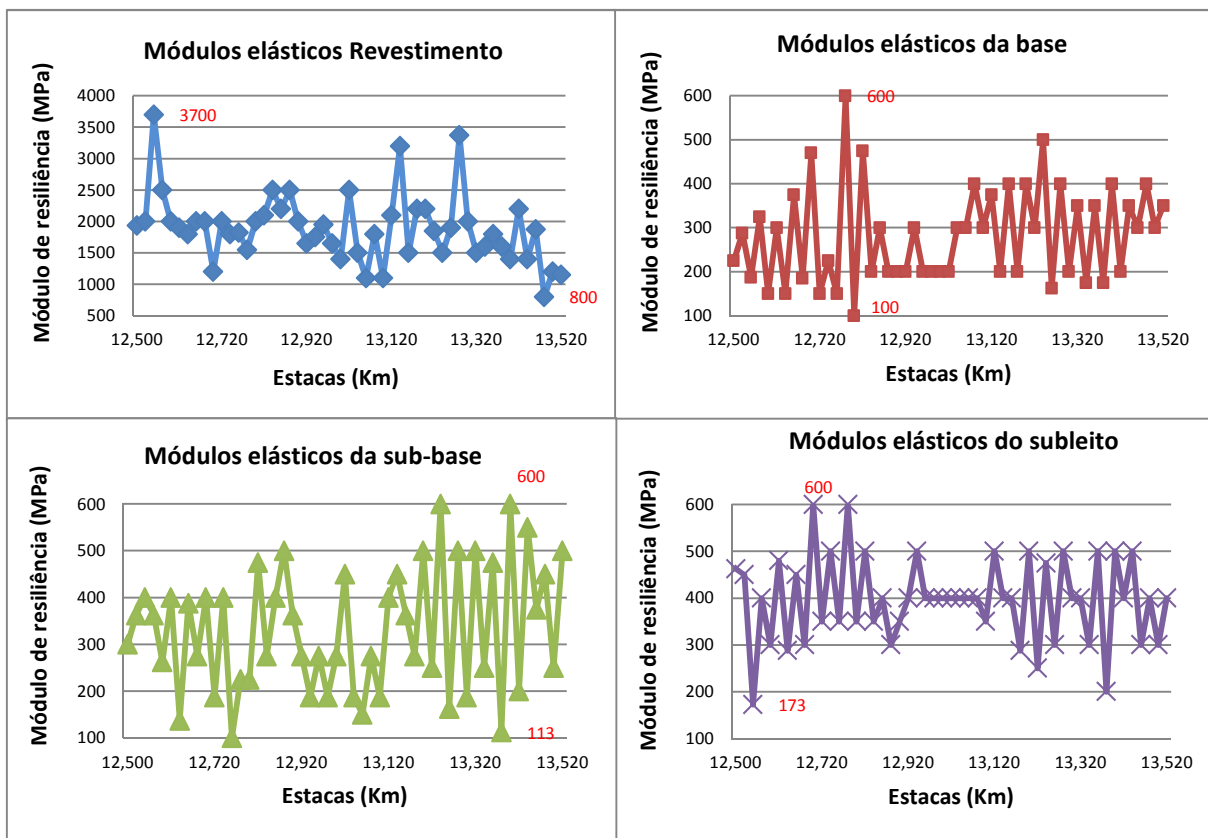


Fig. 12 - Valores de módulos da estaca 12,500 a 13,520.

Tabela 4 - Análise estatística dos módulos elásticos obtidos no Km 30,00

Módulo de resiliência (MPa) Km 30,00				
Camadas	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
Média	1888	281	330	396
Desvio padrão	547	109	132	91
CV(%)	29	39	40	23

Da mesma forma, os módulos de resiliência obtidos na estaca 72,220 a 73,220 representados na Figura 13 e a análise estatística na Tabela 5.

Tabela 5 - Análise estatística dos módulos elásticos obtidos no Km 80,40.

Módulo de resiliência (MPa) Km 80,40				
Camadas	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
Média	2438	246	216	373
Desvio padrão	1044	101	125	121
CV(%)	43	41	58	33

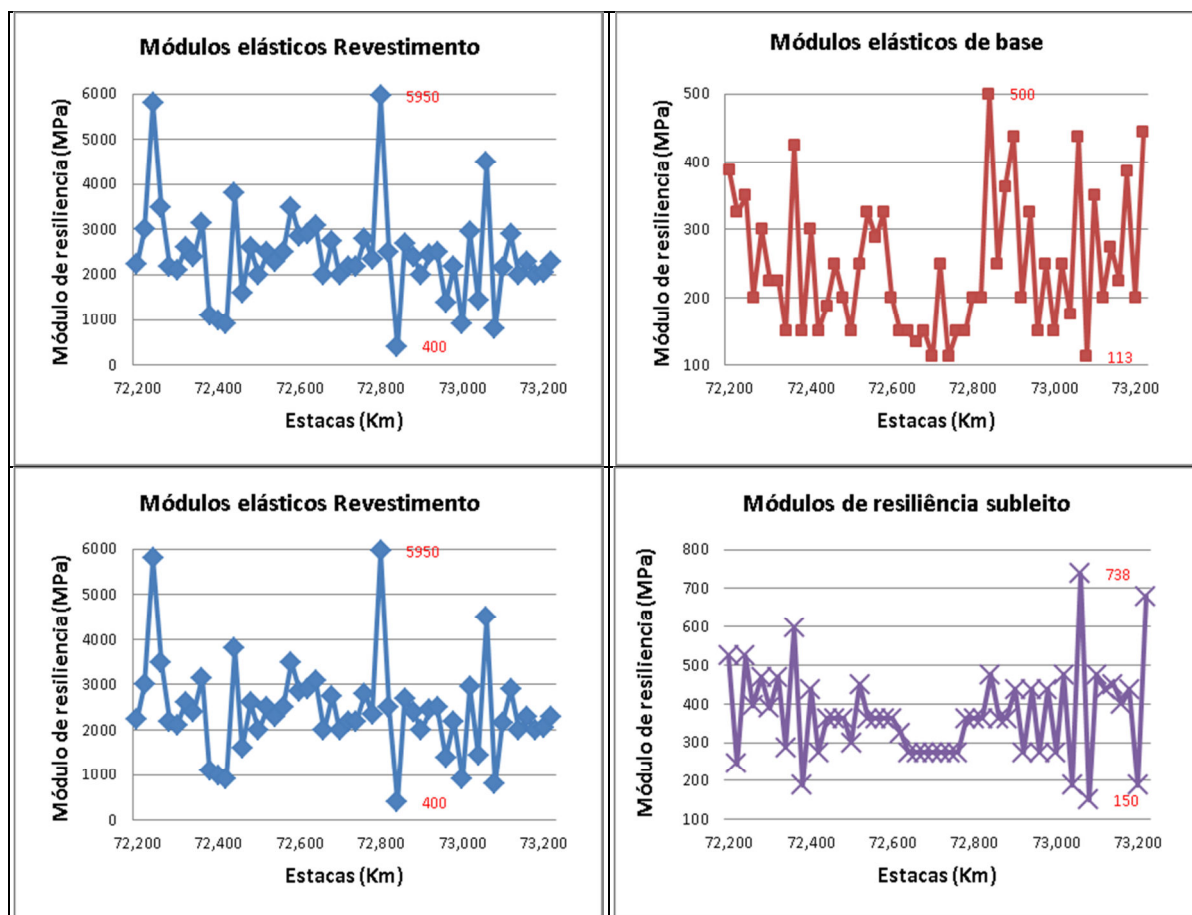


Fig. 13 - Valores de módulos da estaca 72,200 a 73,220.

Verifica-se que na análise estatística realizada no primeiro trecho, a camada de revestimento apresentou módulo de resiliência médio igual a 1.888 MPa com desvio padrão de 547 MPa e CV igual a 29%, indicando alta dispersão nos resultados. O módulo máximo obtido nesse trecho foi igual a 3.700 MPa e o mínimo igual a 800 MPa. Verifica-se também que 25,5% dos módulos apresentaram valores entre 500 a 1.500 MPa, 68,6% apresentaram valores entre 1500 a 2500 MPa e apenas 5,9% dos módulos apresentaram valores acima de 2.500 MPa.

A camada de base apresentou um valor de módulo de resiliência médio de 281 MPa, com um desvio padrão de 109 MPa e CV igual a 39%, indicando alta dispersão nos resultados. O módulo máximo obtido foi igual a 600 MPa e o módulo mínimo foi igual a 100 MPa. Verificou-se também que 47,1% dos módulos apresentaram valores menores que 250 MPa, 45,1% apresentaram valores entre 250 a 450 MPa e 7,8% valores maiores que 450 MPa.

A camada de sub-base apresentou um valor de módulo de resiliência médio de 330 MPa, desvio padrão de 132 MPa e CV igual a 40%, indicando alta dispersão nos resultados. O módulo máximo obtido nesse trecho foi igual a 600 MPa e o mínimo 100 MPa. Verificou-se também que 33,3% dos módulos obtidos nesse trecho apresentaram valores menores que 250 MPa, 47,1% apresentaram valores entre 250 a 450 MPa e 19,6% dos módulos apresentaram valores maiores que 450 MPa.

Por fim, os valores dos módulos de resiliência obtidos no subleito apresentaram um valor médio igual a 396 MPa com desvio padrão de 91 MPa e CV igual a 23%, indicando média

dispersão. O módulo de resiliência máximo obtido nesse trecho foi igual a 600 MPa e o mínimo igual a 173 MPa. Verificou-se que 5,9% dos módulos de resiliência apresentaram valores menores que 250 MPa, 66,7% apresentaram valores entre 250 a 450 MPa e 27,5% apresentaram valores de módulos de resiliência maiores que 450 MPa.

Verifica-se que na análise estatística realizada no segundo trecho, a camada de revestimento apresentou módulo de resiliência médio igual a 2.438 MPa, com desvio padrão de 1044 MPa e CV igual a 43%, indicando alta dispersão nos resultados. O módulo máximo obtido nesse trecho foi igual a 5.950 MPa e o mínimo igual a 400 MPa. Verifica-se também que 15,7% dos módulos apresentaram valores entre 400 a 1.500 MPa, 42,1% apresentaram valores entre 1500 a 2500 MPa, 35,3% dos módulos apresentaram valores entre 2.500 a 3.500 MPa e 7,8% dos módulos apresentaram valores maiores que 3.500 MPa.

A camada de base apresentou um valor de módulo de resiliência médio de 246 MPa, com um desvio padrão de 101 MPa e CV igual a 41%, indicando alta dispersão nos resultados. O módulo máximo obtido foi igual a 500 MPa e o módulo mínimo foi igual a 113 MPa. Verificou-se também que 66,7% dos módulos apresentaram valores menores que 250 MPa, 31,3% apresentaram valores entre 250 a 450 MPa e 2% valores maiores que 450 MPa.

A camada de sub-base apresentou um valor de módulo de resiliência médio de 216 MPa, desvio padrão de 125 MPa e CV igual a 58%, indicando alta dispersão nos resultados. O módulo máximo obtido nesse trecho foi igual a 600 MPa e o mínimo 50 MPa. Verificou-se também que 74,5% dos módulos obtidos nesse trecho apresentaram valores entre 50 a 250 MPa, 17,6% apresentaram valores entre 250 a 450 MPa e 7,8% dos módulos apresentaram valores maiores que 450 MPa.

Por fim, os valores dos módulos de resiliência obtidos no subleito apresentaram um valor médio igual a 373 MPa com desvio padrão de 121 MPa e CV igual a 33%, indicando alta dispersão. O módulo de resiliência máximo obtido nesse trecho foi igual a 738 MPa e o mínimo igual a 150 MPa. Verificou-se que 9,8% dos módulos de resiliência apresentaram valores entre 100 a 250 MPa, 56,9% apresentaram valores entre 250 a 400 MPa, 27,4% apresentaram valores entre 400 a 550 MPa e 5,9% de módulos de resiliência maiores que 550 MPa.

Os valores de módulo de resiliência obtidos, tanto no primeiro trecho quanto no segundo, apresentaram valores com alta dispersão, indicando grande variabilidade dos módulos em cada camada. Esses valores já eram esperados, diante da elevada variação espacial de deflexões que foram obtidas nos dois trechos. O que se espera de um pavimento flexível em relação às suas camadas estruturais é que, o revestimento seja a camada com maior rigidez por ser a camada da estrutura responsável por absorver as maiores tensões atuantes no pavimento e distribuir em seguida para a camada de base que pode apresentar uma rigidez menor que a camada de revestimento, no entanto maior que a camada inferior e assim sucessivamente com as camadas de sub-base e o terreno de fundação que é o subleito. Sendo assim, o subleito seria a parte estrutural do pavimento mais sensível e o mais sujeito a deformações, de acordo com o método de dimensionamento empírico do DNIT, que foi concebido com o objetivo exclusivo de protegê-lo.

No entanto, verifica-se diante dos valores de módulos de elasticidade obtidos através da retroanálise nos dois trechos, que os módulos médios do subleito no primeiro trecho apresentaram valores cerca de 20% maiores que os módulos da camada de sub-base e 41% maiores que os valores obtidos na base. Já no segundo trecho, os módulos médios do subleito aumentaram 72% em relação à camada de sub-base e 51% em relação à camada de base. Os resultados indicam que a parte mais sensível do conjunto estrutural de um pavimento, não é o

subleito. Esse fato vem sendo observado em análises realizadas em subleitos brasileiros, que diferente dos subleitos americanos, apresenta módulos maiores que os de sub-base e base, quando bem compactados.

CONCLUSÃO

As deflexões obtidas pelo FWD apresentaram uma variação espacial elevada nos dois trechos analisados. O primeiro trecho apresentou um coeficiente de variação (CV) de 24,40% a 31,08% e no segundo trecho apresentou um (CV) de 30,93% a 40,53%, com maiores valores, em ambos os trechos, sendo verificados nos geofones mais afastados da placa de carga. Além de variação espacial elevada, ambos os trechos apresentaram Deflexões máximas elevadas indicando uma condição estrutural ruim.

A retroanálise interativa, realizada pelo programa Retroanálise/Sispav a partir das bacias de deflexões levantadas nos trechos (Km 30,00 e Km 80,40) apresentou como resultados, valores dos módulos do subleito (Argila arenosa marrom) substancialmente superiores aos módulos da sub-base (Solo laterítico arenoso) e superiores aos módulos da base (Solo laterítico arenoso e solo brita) em toda a extensão dos trechos analisados.

REFERÊNCIAS

- [1]-Balbo, José Tadeu. Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- [2]-Bernucci, L.B., Motta L.M.G., Ceratti J.A.P., Soares J.B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 3ª ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2010.
- [3]-DER/SP, Instrução de Projeto de Pavimento, Anexo A. São Paulo. 53 pp. (Publ, IP., DE 000/001). Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. Janeiro de 2006.
- [4]-DNIT, Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. 2ª ed. Rio de Janeiro. 310 pp. (Publ, IPR., 720). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2006b.
- [5]-Franco, F.A.C.P., 2007 Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos - SisPav. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [6]-Medina, J., Motta, L.M.G., Mecânica dos Pavimentos, 3ª ed, Isbn, 978-85-7193-366-8.2015.
- [7]-Pinto, S., Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimento, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 1991.