

## COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE MÓDULOS ELÁSTICOS RETROANALISADOS POR DIFERENTES SOFTWARES EM PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS INVERTIDOS

**Damires Cristovão de Almeida**

Desenvolvimento Tecnológico – CCR Engelog

**Luis Miguel Gutierrez Klinsky**

Centro de Pesquisa Rodoviária – CCR NovaDutra

**Ana Elisabete P. G. A. Jacintho**

Universidade Católica de Campinas – PUC

**Paulo Ricardo Freitas Vicente**

Dynatest Engenharia Ltda.

### RESUMO

No Brasil, a evolução do processo de avaliação estrutural com a utilização do equipamento *Falling Weigh Deflectometer* (FWD) tem possibilitado uma melhor compreensão e caracterização do comportamento elástico *in situ* dos pavimentos semirrígidos invertidos através da obtenção de módulos de elasticidade retroanalizados. Neste trabalho é desenvolvida uma análise comparativa entre os valores de módulos retroanalizados obtidos com diferentes *softwares* Evercalc®, Elsym-5, BakFAA e BackMeDiNa a partir das medidas de deflexões realizadas em duas seções-teste em pavimento semirrígido invertido que apresentam desempenhos estruturais distintos desde da época da implantação em 2001. Os módulos retroanalizados da camada cimentada também foram comparados com os valores de módulo obtidos em laboratório, possibilitando a indicação dos *softwares* mais adequados para a realização de retroanálises das camadas dos pavimentos semirrígidos invertidos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pavimento semirrígido invertido; desempenho; módulo, retroanálise.

### ABSTRACT

In Brazil, the evolution of the structural assessment process with the use of the Falling Weigh Deflectometer (FWD) equipment has enabled better understanding and characterization of the *in situ* elastic behavior of inverted semi-rigid pavements by obtaining backcalculated elastic modulus. In this work a comparative analysis is developed between the values of backcalculated moduli obtained with Evercalc ©, Elsym, BakFAA and BackMeDiNa software from the deflection measurements performed in two inverted semi-rigid pavement test sections that have different structural performances since their construction in 2001. The backcalculated cemented layers' moduli were compared with values obtained in laboratory, making it possible to recommend the most suitable software for backcalculation of inverted semi-rigid pavement layers.

**KEY WORDS:** Semirigid inverted pavement, performance, modulus, backcalculation.

### 1. INTRODUÇÃO

A evolução do processo de avaliação estrutural com a utilização do equipamento *Falling Weigh Deflectometer* (FWD) tem possibilitado uma melhor compreensão e caracterização do comportamento elástico *in situ* dos pavimentos semirrígidos invertidos através da obtenção de módulos de elasticidade retroanalizados.

Embora o conceito de retroanálise seja conhecido entre os projetistas, o processo da obtenção de módulos de elasticidade para as camadas dos pavimentos é complicado, uma vez que este processo envolve várias incógnitas, além dos módulos das várias camadas de pavimento e sua interação entre si, que influenciam na deflexão central  $D_0$  medida na superfície do pavimento.

De acordo com Smith, Bruinsma e Wade (2017) pesquisadores e profissionais tem desenvolvido ao longo dos anos inúmeras abordagens para calcular os módulos de elasticidade das camadas dos pavimentos, bem como diversos programa para realizar os cálculos. Todavia, ainda existem várias dúvidas no processo de obtenção de módulos e quais são *softwares* que fornecem respostas adequadas de acordo com o tipo de pavimento.

A obtenção de módulos elásticos retroanalizados da camada cimentada nos pavimentos invertidos tem sido a maior dificuldade relatada pelos analistas, uma vez que a rigidez das camadas do pavimento tende a diminuir com a profundidade, não ocorrendo no pavimento invertido. O termo ‘invertido’ é usado porque a resistência do pavimento não diminui com a profundidade, deixando-o em desequilíbrio por causa da camada cimentada rígida que se encontra na sub-base. (SANRAL, 2014).

Diante do exposto, neste trabalho foi desenvolvida uma comparação entre os valores de módulos de elasticidade retroanalizados obtidos com os *softwares* Evercalc®, Elsym-5, BakFAA e BackMeDiNa, e os módulos obtidos em laboratórios para camada cimentada em duas seções-teste em pavimento semirrígido invertido.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DAS SEÇÕES-TESTES

Para a análise dos módulos retroanalizados optou-se por selecionar duas seções-teste em pavimento semirrígido invertido, ambas localizadas ao longo do Prolongamento da Rodovia dos Bandeirantes (SP-348), com extensão de 320 metros cada. As seções-teste foram implantadas em 2001, mas desde o 1º monitoramento deflectométrico realizado em 2003, verifica-se uma grande diferença de desempenho estrutural, com deflexões médias de  $15 \times 10^{-2}$  mm e  $35 \times 10^{-2}$  mm, nas seções-teste I e II, respectivamente. As características dos pavimentos das seções-teste são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1:** Características dos pavimentos das seções-teste I e II.

Camada	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessura de Projeto (cm)
<b>Revestimento</b>			
Concreto Betuminoso Usinado à Quente	4.000	0,30	12,0
<b>Base</b>			
Brita Graduada Simples	300	0,35	15,0
<b>Sub-base</b>			
Brita Graduada Tratada com Cimento	12.000	0,25	18,0
<b>Reforço do Subleito</b>			
Solo	150	0,40	15,0
<b>Subleito</b>			
	80	0,40	-

Os levantamentos deflectométricos foram realizados nas faixas de tráfego mais carregadas (Faixa 2) com espaçamento entre as estações de 40 metros, obtendo para cada levantamento realizado oito bacias de deflexões.

Devido à grande quantidade de dados, optou-se por escolher uma bacia de deflexão representativa para cada ano de levantamento. O processo de escolha foi realizado pela diferença da média das bacias de deflexões e das bacias de individuais de ensaio. Essa diferença foi medida pelo *Root Mean Square Error* (RMSE), cuja Equação (1) é mostrada a seguir:

$$RMSE (\%) = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{100 \times (D_{média} - D_{pontual})}{D_{pontual}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Onde:

$D_{média}$ : Bacia de deflexões média anual;

$D_{Pontual}$ : Bacia de deflexões individual.

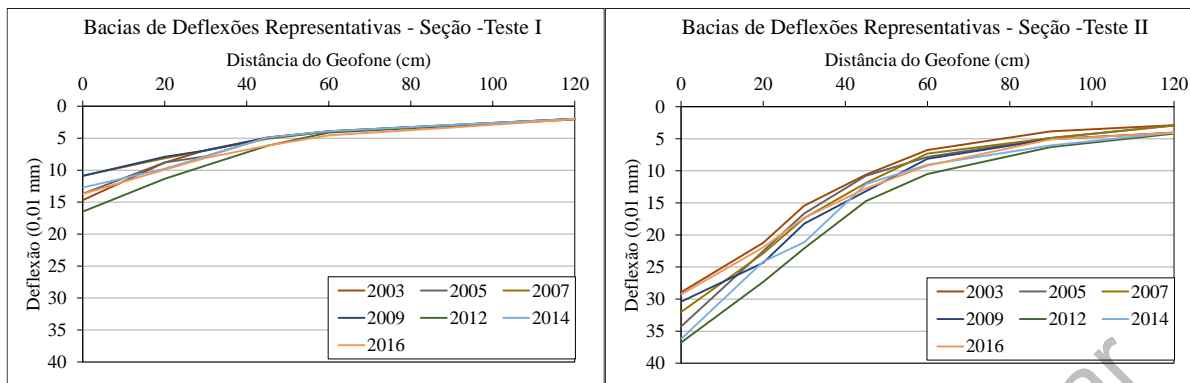


Figura 1: Bacias de Deflexões Representativas.

### 3. PROCESSO DE RETROANÁLISE

A retroanálise é um processo que permite a obtenção dos módulos das camadas do pavimento e do subleito nas condições que se encontram em campo, contribuindo na verificação de deformabilidade e integridade de cada camada.

Conceitualmente, a retroanálise é um processo de aproximação de bacias de deflexões medidas e calculadas. Os valores dos módulos resultantes representam os módulos do material *in situ*. Em outras palavras, um conjunto único de módulos das camadas existentes é calculado de tal forma que a bacia calculada é equivalente à bacia medida. Nos ensaios deflectométricos, o número de leituras medidas deve pelo menos ser igual ao número de módulos que estão sendo retroanalisados, devido aos erros de arredondamento e truncamento introduzidos durante a retroanálise. (CHOU; LYTTON, 1991).

De acordo com o *ISBN South African Pavement Engineering Manual* (2014, apud Rubicon Solutions, 2005) o processo de obtenção de módulos elásticos requer habilidade e experiência. É importante entender como as mudanças nas características das camadas afetam a bacia de deflexão. Sem habilidades básicas, os resultados das retroanálises podem se imprecisos e não confiáveis, mesmo quando existe uma combinação aparentemente boa entre as bacias de deflexão medidas e calculadas.

Ao longo dos anos, vários pesquisadores desenvolveram métodos para determinação dos módulos elásticos das camadas do pavimento e do subleito a partir de retroanálises, bem como numerosos programas para execução do processo. A Tabela 2 resume as principais características dos *softwares* utilizados neste estudo.

**Tabela 2:** Características dos *softwares* de retroanálise. **Fonte:** <sup>1</sup>Adaptado de Everseries User Guide (2005); <sup>2</sup>Smith et al. (2017), <sup>2</sup>Junior et al. (2002); <sup>3</sup>FAA (2011); <sup>4</sup>Júnior (2018)<sup>4</sup>.

Nome do Programa	Última versão	Desenvolvedor	Domínio Público	Tipo de Pavimento	Método de Cálculo	Método de Retroanalisar	Número Máximo de Camadas	Cálculo do Erro
Evercalc	5.0	Washington State Department of Transportation	sim	Flexível	Teoria das Multicamadas Elásticas	Otimizador	5 (incluindo o subleito)	Sim
Elsym	5.0	University of California, Berkeley <sup>1</sup>	sim	Flexível	Teoria das Multicamadas Elásticas	Iterativo	5 (incluindo o subleito)	Sim
BakFAA	2.0	Federal Aviation Administration (FAA)	sim	Flexível   Rígido	Teoria das Multicamadas Elásticas	Iterativo	10 (incluindo o subleito)	Sim
BackMeDiNa	v.1.1.0	Filipe Augusto Cinque de Proença Franco, D.C	sim	Flexível	Teoria das Multicamadas Elásticas	Iterativo	6 (incluindo o subleito)	Sim

Nos quatro *softwares* é necessária a entrada de módulos de partida para iniciar o processo de retroanálise, e estes módulos influenciam diretamente nos resultados obtidos. Assim, visando obter resultados mais próximos da realidade, realizou-se uma pesquisa bibliográfica na literatura nacional e internacional para a determinação das faixas de módulos para os materiais.

Suzuki (1992) realizou um estudo paramétrico em pavimentos semirrígidos invertidos, onde foram adotadas características elásticas para cada uma das camadas, envolvendo os tipos de materiais e espessuras, módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson, conforme Tabela 3.

**Tabela 3:** Características elásticas dos materiais. **Fonte:** Adaptado de Suzuki (1992)

Camada	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessura (cm)
<b>Revestimento</b> Concreto Betuminoso Usinado à Quente	3.000 - 5.000	0,30	7,0 - 15,0
<b>Base</b> Brita Graduada Simples	100 - 750	0,40	15,0 - 25,0
<b>Sub-base</b> Brita Graduada Tratada com Cimento	5.000 - 15.000	0,35	15,0 - 25,0
<b>Subleito</b>	50 - 200	0,40	-

Balbo (1993) e Alves (2010) adotam em seus estudos o valor de 15.000 MPa para módulo de elasticidade de BGTC. A Instrução de Projeto (IP-DE-P00/001) do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP, 2006) que descreve numa tabela intervalos de valores de módulo de resiliência entre 7.000 MPa e 18.000 MPa para BGTC. O *Everseries User Guide* (2005) recomenda valores de módulo entre 1.400 MPa e 20.000 MPa para a camada cimentada.

Frente ao exposto, os módulos utilizados na entrada no processo de retroanálise são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4:** Módulos iniciais utilizados nos processos de retroanálise (Unidades em MPa).

Software	Revestimento			Base			Sub-base cimentada			Ref. do subleito + subleito		
	Módulo Mínimo	Módulo Máximo	Módulo Partida	Módulo Mínimo	Módulo Máximo	Módulo Partida	Módulo Mínimo	Módulo Máximo	Módulo Partida	Módulo Mínimo	Módulo Máximo	Módulo Partida
Evercalc 5.0	1.000	7.000	3.000	80	700	100	1.400	20.000	7.000	100	500	100
Elsym - 5	1.000	7.000	-	80	700	-	1.400	20.000	-	100	500	-
BakFAA	-	-	3.000	-	-	100	-	-	7.000	-	-	100
BackMeDiNa	-	-	3.000	-	-	100	-	-	7.000	-	-	100

As retroanálises foram realizadas de forma que o erro entre as bacias de deflexões medidas e calculadas não ultrapassassem o limite de 10%, buscando-se assim, minimizar as diferenças dos módulos obtidos pelos diferentes *softwares*. De acordo com BackMeDiNa (2018) quando o erro for inferior a 10%, tem-se uma correlação razoável entre as medidas de deflexões medidas e calculadas no processo de retroanálise.

Os módulos elásticos retroanalizados de todas as camadas foram corrigidos para uma carga de aplicação de 4,1 KN. O Evercalc® e o BackMeDiNa são os únicos *softwares* entre os abordados neste estudo que apresentam uma funcionalidade para correção de temperatura, por isso, optou-se por não corrigir os módulos retroanalizados das camadas asfálticas. Os levantamentos foram realizados entre julho e agosto de cada ano, e as temperaturas do revestimento asfáltico das seções-teste não ultrapassaram 35°C.

De acordo com Júnior (2018, apud MOTTA e MEDINA, 1988) a correção em função da temperatura deve ser variável em relação ao tipo de estrutura do pavimento e ao clima da região, não sendo considerada de grande relevância para casos como o Brasil com clima tropical característico e com estruturas com revestimento em geral de pequena espessura.

De acordo com Chou e Lytton (1991), diferentes *softwares* de retroanálises muitas vezes dão resultados diferentes pelas seguintes razões:

- A rotina numérica usada para calcular as deflexões superficiais do pavimento pode ser diferente;
- O método de busca dos valores dos módulos elásticos pode ser diferente;
- Os critérios para determinar a convergência (por exemplo, minimizar o erro de correspondência de deflexão da superfície) podem ser diferentes;
- Os módulos de partida definidos pelos analistas podem ser diferentes.

#### 4. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS ELÁSTICOS RETROANALISADOS

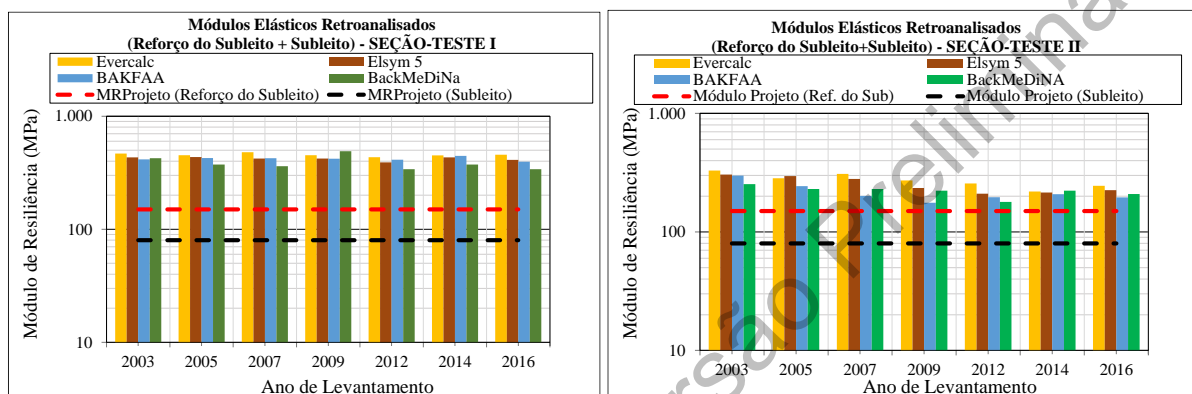
Nos processos de retroanálises, em especial na obtenção dos módulos de elasticidade com o Elsym-5, em que foram simuladas centenas de estruturas variando os intervalos de módulos até encontrar o melhor ajuste entre as bacias de deflexões, observou-se que os módulos do revestimento asfáltico e da BGS quase não influenciam na obtenção do módulo da camada de infraestrutura (reforço do subleito + subleito); que o módulo da camada de BGTC varia em função da camada subjacente; e que o módulo de elasticidade da camada de BGS varia em função dos módulos da camada de BGTC e do revestimento; e por fim, o módulo do revestimento asfáltico varia diretamente em função do módulo da BGS.

As comparações entre os valores dos módulos elásticos retroanalizados iniciarão pelos módulos obtidos para as camadas de infraestruturas, vista a influência dessa camada no desempenho do pavimento como um todo. Segundo Chou e Lytton (1991) o subleito contribui entre 60% e 80%



na determinação da deflexão central. Um pequeno erro na obtenção do módulo elásticos do subleito poderá ocasionar grandes erros nos módulos das demais camadas do pavimento.

Os módulos elásticos obtidos pelos diferentes *softwares* (Figura 2) para as camadas de infraestrutura (reforço do subleito + subleito) de ambas as seções-teste são homogêneos e convergentes. Na seção-teste I o módulo de elasticidade médio é igual a 421 MPa e desvio padrão de 38 MPa, com coeficiente de variação menor que 10%. Os módulos obtidos para a seção-teste II apresentam um comportamento ligeiramente mais heterogêneo do que os resultados da seção-teste I, mas ainda assim, o coeficiente de variação é inferior a 17%, com módulo elástico médio igual a 241 MPa e desvio padrão de 42 MPa.



**Figura 2:** Módulos elásticos da infraestrutura (reforço do subleito + subleito).

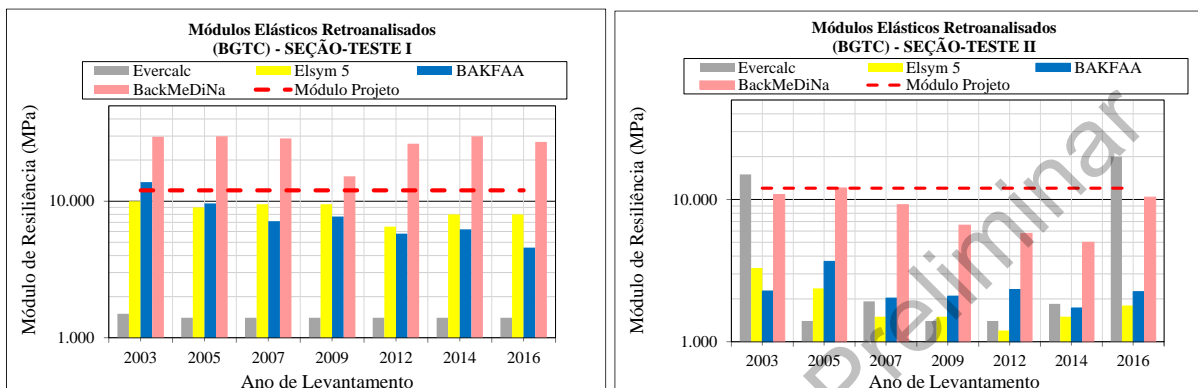
Na Seção-teste I os módulos obtidos com o Evercalc® (Figura 3) foram iguais aos módulos mínimos de entrada do *software* (Tabela 4), indicando que talvez a rotina para obtenção dos módulos da camada cimentada de pavimentos semirrígidos invertidos com este *software* não seja adequada, pelo menos, quando as deflexões centrais são baixas, que pode indicar a existência de uma camada cimentada íntegra. Ainda na seção-teste I os módulos elásticos obtidos com o Elsym-5 e com o BakFAA apresentaram similaridades e ficaram próximos dos valores indicados quando da elaboração do projeto.

De acordo com o Everseries User Guide (2005) se a estrutura de pavimento apresentar uma camada rígida entre duas camadas mais fracas, bem como uma camada asfáltica sobre uma base tratada com cimento, a obtenção de módulos realistas calculados com o Evercalc® poderá ser difícil.

Os módulos obtidos com o BackMeDiNa se mostraram divergentes em relação aos demais resultados da seção-teste I, com os maiores valores de forma geral. Não foi encontrada na literatura ou na função “ajuda” disponível no próprio *software* alguma informação referente a retroanálise de pavimento semirrígido invertido, porém o cálculo do módulo de elasticidade é realizado em função da variação de uma faixa de módulo que depende do módulo de entrada e do erro da retroanálise.

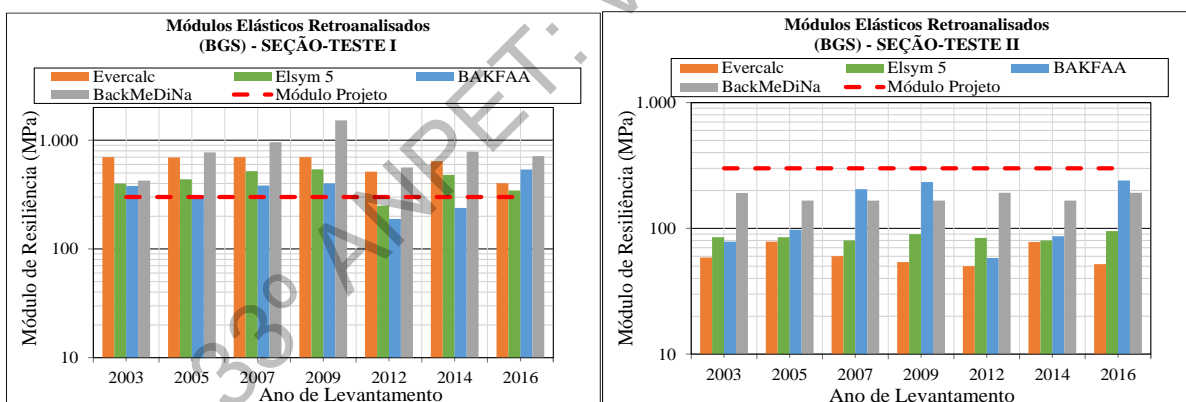
Por outro lado, os módulos obtidos com o Elsym-5, com o BakFAA e com o Evercalc® na ST-II apresentam, de certa forma, similaridade. Constatando-se que devido a camada cimentada apresentar um comportamento menos rígido, o *software* Evercalc® conseguiu realizar as interações necessárias para obtenção dos módulos, mesmo que de forma reversa. O BackMeDiNa forneceu módulos inferiores aos módulos da seção-teste I, mas ainda assim, apresentou os maiores valores de módulos.

A partir das várias simulações para obtenção dos módulos da BGTC com o Elsym-5, constatou-se que quando o módulo obtido para a camada de BGTC é superior a 5.000 MPa o acréscimo de 100 MPa no módulo da camada cimentada, resulta em uma diminuição da deflexão central ( $D_0$ ) de apenas  $0,1 \times 10^{-2}$  mm, talvez esse mesmo conceito se aplique para os demais *softwares*, justificando a dificuldade para a obtenção de módulos da camada cimentada quando em seu estado íntegro.



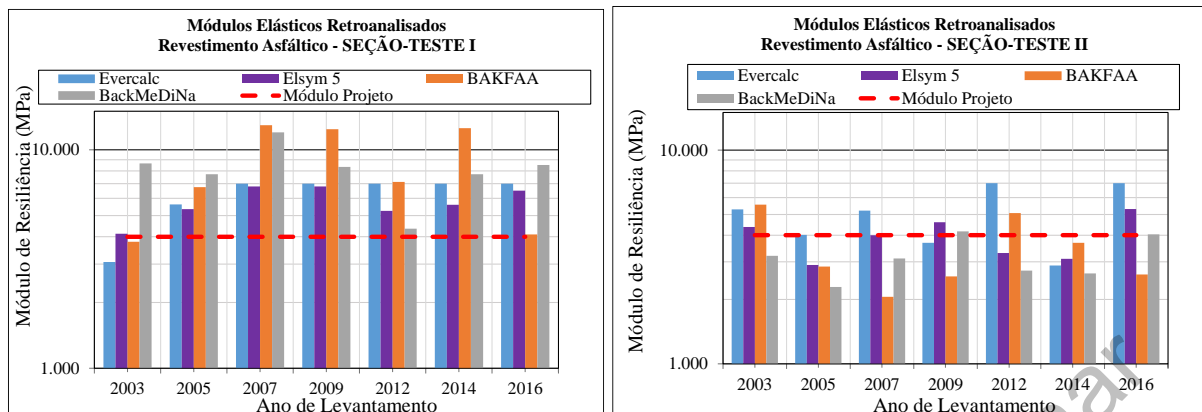
**Figura 3:** Módulos elásticos da camada de sub-base (BGTC)

Os módulos elásticos obtidos para as camadas de BGS (Figura 4) por meio dos *softwares* Evercalc©, Elsym-5 e BakFAA em ambas as seções-teste apresentaram similaridade. Os valores dos módulos obtidos com o BackMeDiNa são de forma geral maiores e existe uma tendência de aproximação com os módulos obtidos com o BakFAA.



**Figura 4:** Módulos elásticos da camada de base (BGS)

Os valores dos módulos elásticos (Figura 5) obtidos para as camadas de revestimento com o Evercalc© e com o Elsym-5 apresentaram maiores concordâncias em ambas as seções-teste, com coeficiente de variação de 21% e 30% para as seções-teste I e II, respectivamente. Também foi possível observar uma proximidade razoável entre os módulos obtidos com o BakFAA e com BackMeDiNa, com coeficiente de variação de 38% e 31% para as seções-teste I e II, respectivamente.



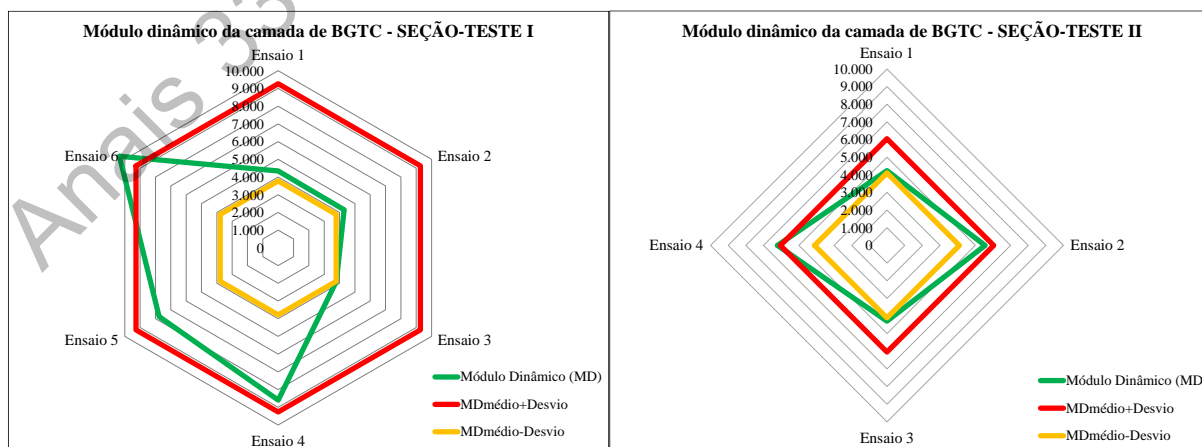
**Figura 5:** Módulos elásticos da camada asfáltica (CBUQ)

Salienta-se que os módulos elásticos retroanalizados não representam necessariamente os módulos reais dos materiais, e sim um indicativo dos valores dos módulos de trabalho. Mesmo observada as diferenças entre os resultados obtidos é difícil indicar o módulo exato de cada material, no entanto, diante da quantidade de resultados, talvez seja interessante buscar uma faixa de trabalho de módulo para os materiais das camadas.

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a melhor avaliação dos módulos de elasticidade das camadas cimentadas obtidos por retroanálises, foram abertos dois poços de inspeção em cada uma das seções-teste. As amostras das camadas de BGTC foram coletadas *in situ*, e posteriormente foram encaminhadas para o laboratório para a realização dos ensaios.

Foram realizados seis ensaios de módulo dinâmico em cada uma das seções-teste. O módulo dinâmico médio, considerando frequência reduzida de 1 Hz, obtido para a seção-teste I foi igual a 9.300 MPa e desvio padrão de 3.800 MPa. Na seção-teste II, dois dos seis corpos-de-prova se romperam durante a realização dos ensaios, mas foi possível, a partir das quatro amostras de BGTC obter o módulo dinâmico médio igual a 5.072 MPa e desvio padrão de 970 MPa. A Figura 6 apresenta os resultados obtidos em cada um dos ensaios e as médias com a adição e subtração do desvio padrão.

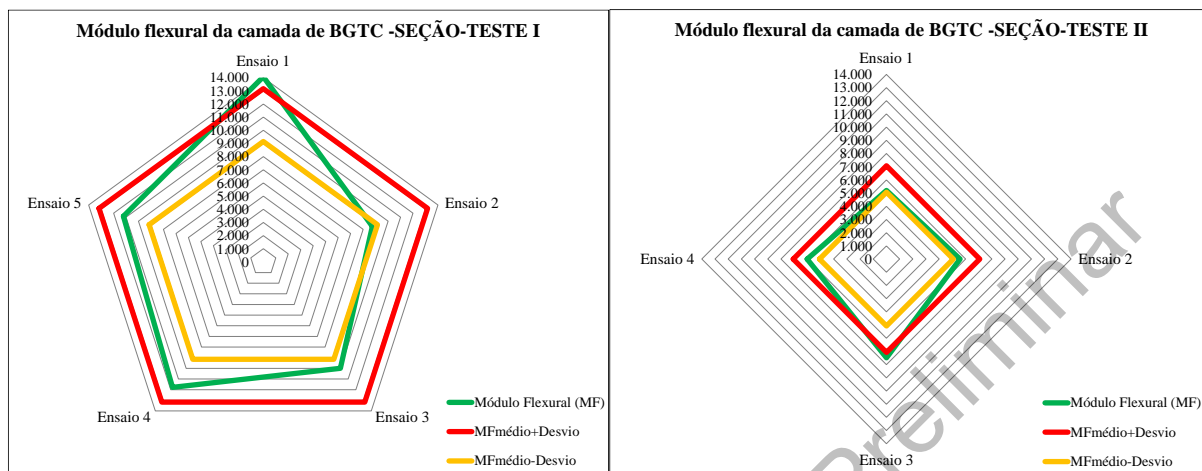


**Figura 6:** Módulos dinâmicos das camadas de BGTC

Ainda nas camadas da BGTC das seções-teste foram realizados ensaios para obtenção dos módulos flexurais. Na seção-teste I foram realizados cinco ensaios, obtendo média de



11.158°MPa e desvio padrão de 2.004 MPa. Na seção-teste II foram realizados quatro ensaios, obtendo média de 6.072 MPa e desvio padrão de 998 MPa. A Figura 7 apresenta os resultados obtidos em cada um dos ensaios e as médias com a adição e subtração do desvio padrão.

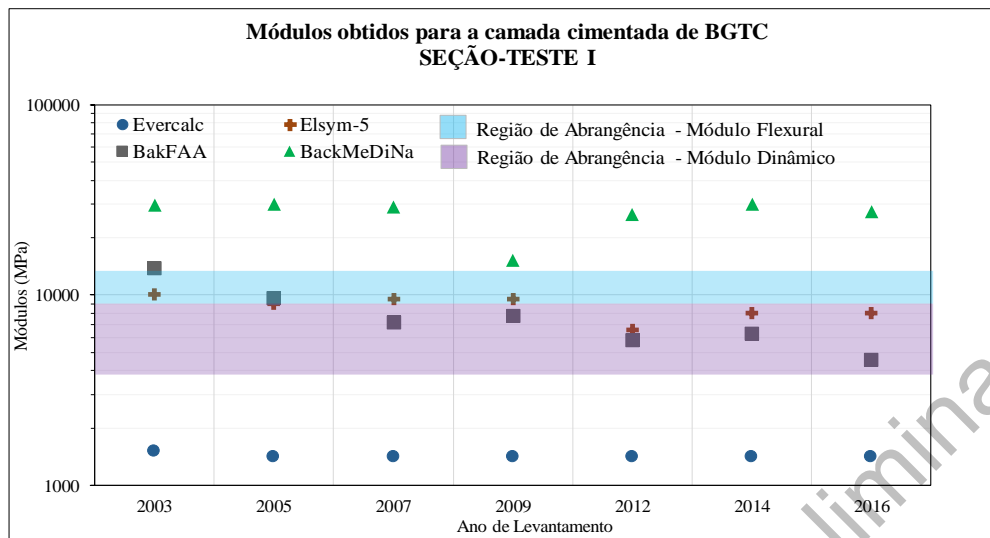


**Figura 7:** Módulos flexurais das camadas de BGTC

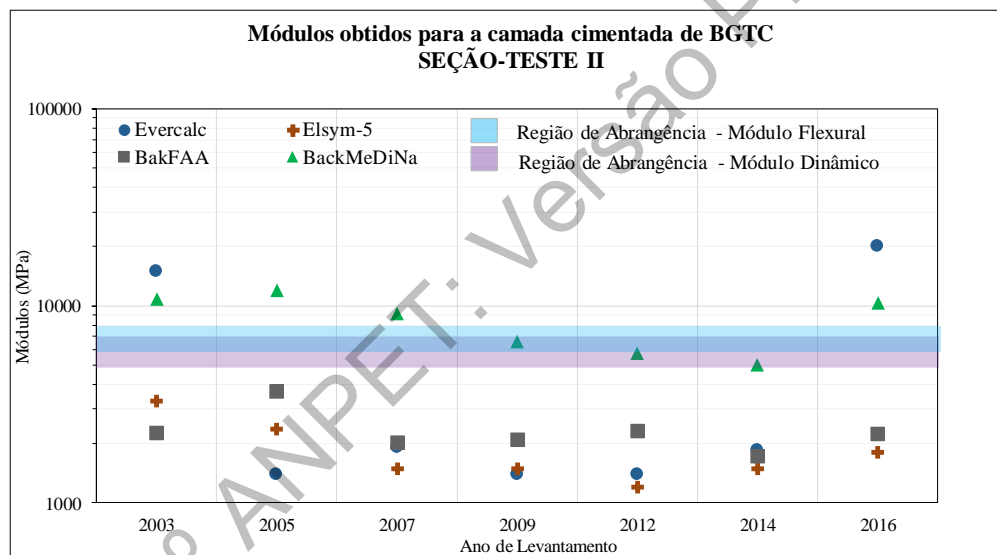
As Figuras 8 e 9 apresentam os módulos retroanalizados pelos diferentes *softwares* e as áreas de abrangência dos módulos dinâmicos e flexurais para as seções-teste I e II. Os limites superiores e inferiores das regiões de abrang foram definidos a partir da adição e subtração do respectivo desvio padrão (Figuras 6 e 7).

Os módulos elásticos retroanalizados para a camada cimentada da seção-teste I com o BakFAA e com o Elsym-5 apresentam convergência, e se encontram dentro das regiões de abrangência destacadas (Figura 8). Os módulos retroanalizados com o Evercalc© e com o BackMeDiNa não apresentaram convergência os demais módulos obtidos.

Na seção-teste II (Figura 9), os módulos obtidos com BakFAA, Elsym-5 e Evercalc© se mostraram convergentes, mas destoaram dos módulos dinâmicos e flexurais. Por outro lado, os módulos obtidos com o BackMeDiNa, ainda que sejam muito superiores aos demais módulos retroanalizados, se encontram próximos ou dentro das regiões de abrangência modular destacadas.



**Figura 8:** Seção-Teste I - Módulos obtidos para a camada cimentada (BGTC).



**Figura 9:** Seção-Teste II - Módulos obtidos para a camada cimentada (BGTC).

Os valores dos módulos dinâmicos e flexurais obtidos para a camada cimentada da seção-teste II (Figura 9) podem não representar a condição de desempenho da camada de BGTC em toda a sua espessura, uma vez que as amostras extraídas apresentaram desagregação nos 3,0 cm inferiores. No entanto, os módulos dinâmicos e flexurais foram obtidos a partir de ensaios de corpos de prova de uma fração íntegra das amostras da camada cimentada. Os corpos de prova extraídos na seção-teste I estavam íntegros em sua totalidade, então, possivelmente os resultados dos ensaios representam a condição de desempenho da camada cimentada.

## 6. CONCLUSÕES

A escolha adequada do *software* pode contribuir para definição de estratégias de conservação adequadas, evitando tomadas de decisões desastrosas ao nível de gestão de conservação. Neste estudo, os módulos obtidos com o Elsym-5 e com o BakFAA apresentaram uma tendência estrutural que melhor se assemelha as bacias de deflexão medidas, ensaios realizados em laboratório e a análise visual das camadas cimentadas de ambas as seções-teste.

Os módulos obtidos com o Evercalc® para as camadas cimentadas não se mostraram adequados. Percebeu-se que quando a camada cimento apresenta comportamento íntegro, com elevada rigidez, o *software* não consegue realizar as interações suficientes para obtenção dos módulos retroanalisados, dando como resposta o próprio módulo de entrada. Neste sentido, não se recomenda a execução de retroanálises da camada cimentada posicionada como camada de sub-base com o Evercalc®, evitando assim, possíveis resultados controversos.

Os valores dos módulos de elasticidade da camada cimentada obtidos com o BackMeDiNa se mostraram elevados em ambas as seções-teste, mesmo com diferentes níveis de deflexões;  $15 \times 10^{-2}$  mm e  $35 \times 10^{-2}$  mm, nas seções-teste I e II, respectivamente. A comparação entre valores dos módulos retroanalisados e obtidos em laboratórios sugere que este *software* pode indicar resultados que não representam a realidade do comportamento *in situ* da camada cimentada dos pavimentos invertidos.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, João Nogueira (2010). *Avaliação de dimensionamento da subestrutura ferroviária de linhas de alta velocidade*. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- BACKMEDINA (2018). *Versão 1\_1\_1*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR/DNIT.
- BALBO, José Tadeu (1993) *Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos*. Tese (Doutorado), Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CHOU, Y. J.; LYTTON, Robert L. (1991) *Accuracy and Consistency of Backcalculated Pavement Layer Moduli*. Transportation Research Record 1293, Texas, p.72-85.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. (2006) IP-DE-P00/001: *Projeto de Pavimentação*. São Paulo: Secretaria de Transportes, 53 p.
- EVERSERIES USER'S GUIDE (2005): *Pavement Analysis Computer Software and Case Studies*. Washington State Department of Transportation, Olympia. Disponível em: <[www.wsdot.wa.gov/biz/mats/pavement/EVERSERS/Everseries/UserGuide.pdf](http://www.wsdot.wa.gov/biz/mats/pavement/EVERSERS/Everseries/UserGuide.pdf)>. Acessado em: 12 nov. 2017.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (2011), *150/5370-11B: Advisory Circular*. B ed. United States: U.s. Department Of Transportation. 86 p.
- FERNANDES JÚNIOR, JOSÉ LEOMAR et al. (2002) *Efeitos dos pneus trelleborg sobre pavimentos asfálticos*. Pesquisa e Tecnologia Minerva, São Carlos, p.13-34.
- SANRAL, T. S. (2014). *Pavement Design*. Republic of South Africa: The South African National Road Agency.
- SMITH, Kurt D.; BRUINSMA, James E.; WADE, Monty J. (2017) *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic- Empirical Design and Analysis, Volume I: Final Report*. Washington: Fhwa-hrt-16-009.
- SOUTH AFRICAN PAVEMENT ENGINEERING MANUAL. (2014) *Chapter 6: Road Prism and Pavement Investigations*, África, 2. ed.
- SOUZA JÚNIOR, José Geraldo de.(2018). *Aplicação do Novo Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos a Trechos de Uma Rodovia Federal*. 2018. 236 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Engenharia Civil, Ufrj/coppe, Rio de Janeiro, 201.
- SUZUKI, Carlos Yukio. (1992) *Contribuição ao estudo de pavimentos rodoviários com estrutura invertida (sub-base cimentada)*. 432 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.