

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CAMADAS DE BASES GRANULAR E TRATADA COM CIMENTO EM RODOVIA DE TRÁFEGO MUITO PESADO

Lucas Rodrigues de Andrade

André Kazuo Kuchiishi

Iuri Sidney Bessa

Kamilla L. Vasconcelos

Liedi Légi Bariani Bernucci

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Igor Amorim Beja

José Mário Chaves

Centro de Desenvolvimento Tecnológico – Arteris

RESUMO

É uma tendência atual a utilização de pistas-testes para avaliação de materiais e métodos usados na execução de pavimentos, sob condições reais de clima e tráfego. Há no mundo inúmeros programas de monitoramento de pistas-testes que vem contribuindo significativamente para o avanço da tecnologia dos pavimentos. Seguindo esta corrente, o presente artigo se propõe a avaliar o desempenho de dois segmentos de um trecho experimental executado na Rodovia Fernão Dias (BR-381). Através do monitoramento usando *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e execução de retroanálises, buscou-se avaliar o comportamento mecânico de um pavimento flexível executado com base de Brita Graduada Simples (BGS), e um pavimento semirrígido executado com Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC). A influência do tráfego relativa ao dano causado sobre o pavimento foi avaliada comparativamente entre os segmentos de pavimento flexível e semirrígido.

Palavras-chave: Trecho experimental, camada de base, Brita Graduada Simples, Brita Graduada Tratada com Cimento, retroanálise.

ABSTRACT

The use of test roads is a current tendency to evaluate materials and methods applied in pavement construction, under weather and traffic real conditions. There are worldwide several test roads monitoring softwares, which significantly contribute to pavement technology development. Therefore, this paper goal is to evaluate the performance of two sections located at a test road in Fernão Dias Highway (BR-381). Through Falling Weight Deflectometer (FWD) monitoring and backcalculation methods, the main purpose was to evaluate the mechanical performance of a flexible pavement, built with base of crushed stone, and a semi-rigid pavement, built with base of cement-treated Crushed Stone. The traffic influence related to the pavement damage was comparatively evaluated between the flexible and semi-rigid pavement sections.

Keywords: Road test, base layer, Crushed Stone, Cement-Treated Crushed Stone, backcalculation.

1. INTRODUÇÃO

Por mais que os avanços tecnológicos da área de infraestrutura de pavimentos permitam reproduzir em laboratório fenômenos cada vez mais condizentes com a realidade, ainda há inúmeras variáveis envolvidas que são desconhecidas, ou difíceis de manipular. Assim, a utilização de pistas testes torna-se cada vez mais recorrente, pois permite avaliar em escala e em condições reais de clima e de tráfego os materiais e métodos usados para execução dos pavimentos. Atualmente, há, na Europa (Leandri *et al.*, 2013), nos Estados Unidos (Timm, 2009) e inclusive no Brasil, inúmeros programas de monitoramento de pavimentos, que desenvolvem métodos de dimensionamento, modelos de previsão de vida útil, além de testarem novos produtos.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), os pavimentos são estruturas constituídas de múltiplas camadas com espessuras finitas, construídas sobre a terraplanagem, que devem possuir a capacidade de resistir e distribuir os esforços horizontais e verticais oriundos do tráfego. A camada de base, que é o objeto de estudo deste artigo, é a camada situada imediatamente abaixo da camada de revestimento e possui a função de minimizar ou eliminar as deformações de consolidação e esforços cisalhantes devido ao tráfego para as camadas de sub-base ou subleito. Para a camada de revestimento, a mesma deve garantir que a magnitude das tensões de flexão não cause a fadiga por trincamento prematuro (Pinto e Preussler, 2002). Dessa forma, as camadas constituintes dos pavimentos podem ser compostas de diferentes materiais.

As bases granulares são comumente aplicadas nos pavimentos de comportamento flexível, e sua utilização remonta o desenvolvimento das primeiras cidades e o surgimento das primeiras estradas. Há registros de sua utilização nas estradas do Império Romano (Lay, 1992). E desde então, observou-se que a adição de materiais hidráulicos nas camadas de base conferia melhor desempenho para a mesma. Pode-se citar, como exemplo, a cal e as cinzas pozolânicas utilizadas em Roma para estabilização de materiais granulares (Balbo, 2007).

No Brasil, os materiais granulares graduados começaram a ser adotados na construção da Rodovia Presidente Dutra (BR-116), no ano de 1951. Atualmente, uma parcela muito elevada de projetos de pavimentos asfálticos ainda indica o uso de Brita Graduada Simples (BGS) em camadas de base e sub-base. A estabilização de materiais granulares com cimento começou na década de 70, a partir de obras no estado de São Paulo, como: Rodovia dos Imigrantes (1974), Rodovia dos Bandeirantes (1978) e Rodovia dos Trabalhadores (1982) (Balbo, 2003).

O presente estudo visa a comparar o comportamento da BGS e da Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) em campo através de levantamentos deflectométricos e retroanálise. O trecho experimental em estudo foi executado na Rodovia Fernão Dias, que é caracterizada por tráfego muito pesado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Base de Brita Graduada Simples

Classificada como base granular, a BGS é comumente aplicada nos pavimentos de comportamento flexível, que quando bem compactados possuem elevada resistência aos esforços verticais gerados pela atuação das cargas e boa capacidade drenante. Tais pavimentos são caracterizados pelas camadas de revestimento, compostas por materiais asfálticos, e pelas bases granulares estabilizadas granulometricamente.

A mistura de BGS é utilizada em diversos tipos de pavimentos e em diferentes camadas, seja de base ou sub-base, cuja utilização no Brasil é normatizada pela DNIT 141/2010-ES. A adequada resistência da BGS, quando bem graduada e compactada, se deve à formação de um esqueleto mineral intertravado, que trabalha à compressão por confinamento, e possui *California Bearing Ratio* (CBR) variando entre 60 e 120%, e com módulo de resiliência (MR) entre 100 a 400MPa. Bernucci *et al.* (2007) e Suzuki (1992) demonstraram que o estado de tensões influencia significativamente no módulo da BGS.

2.2. Base de Brita Graduada Tratada com Cimento

Um pavimento semirrígido é aquele que possui camada de revestimento asfáltico com a camada de base composta de material estabilizado com aglomerante hidráulico. A estabilização da camada de base com ligante hidráulico faz com que a camada de base passe a resistir a maiores níveis de tensões de tração e de compressão mudando a linha neutra da estrutura. A camada de revestimento, que nos pavimentos flexíveis é submetida à tração na fibra inferior, nos pavimentos semirrígidos íntegros encontram-se, quando bem dimensionadas, com tensões principais apenas de compressão (Balbo, 2007).

A BGTC é composta por uma mistura de material britado com granulometria contínua e bem-graduada semelhante a uma BGS em que se adiciona de 3 a 5%, em peso, de cimento Portland. A água acrescentada a mistura além de ter a função de facilitar a compactação, tem a função de hidratar o cimento que se mistura à fração granular fina. Dessa forma, origina-se uma pasta que se liga pontualmente aos agregados graúdos, formando assim ligações pontuais entre os agregados e não os envolvendo como ocorre no concreto.

2.3. Levantamento Deflectométrico

O conhecimento das medidas de deflexão na superfície do pavimento é a principal forma de execução da avaliação estrutural por meio não destrutivo, e está associado à capacidade de suporte de cargas dos pavimentos. Os primeiros estudos acerca da deformabilidade dos pavimentos datam de 1938 com Francis Hveem, e nesta época já se estabeleceram limites para as deflexões admissíveis dos pavimentos usados na Califórnia para uma vida de útil satisfatória (Medina, 1997).

Atualmente, são utilizados primordialmente no Brasil dois equipamentos para efetuar o levantamento deflectométricos, a Viga Benkelman (DNER-ME 24/1994) e o deflectômetro de impacto *Falling Weight Deflectometer* (FWD) (DNER-PRO 273/1996), que determinam os deslocamentos verticais na superfície do pavimento, e que são chamadas de medidas de deflexão. Estes equipamentos submetem o pavimento a uma determinada carga conhecida e faz-se a determinação das deflexões ocorridas. Estas deflexões, por sua vez, são utilizadas para avaliar estruturalmente o pavimento em um processo chamado de retroanálise (Balbo, 2007), conforme abordado no subitem a seguir.

2.4. Processo de Retroanálise

O processo de retroanálise é o método que permite inferir os módulos de elasticidade das camadas do pavimento e do subleito por interpretação das bacias de deflexões (Bernucci *et al*, 2008). Este procedimento é feito por meio de softwares capazes de formular análises mecanicistas que modelam as cargas e as estruturas, determinando assim as deformações e tensões com a aplicação da Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE), proposta por Burmister no ano de 1945, e desenvolvida através das ideias de Boussinesq em 1885 (Balbo, 2007).

Para se realizar retroanálises das bacias deflectométricas levantadas usando FWD, vem se utilizando o software BAKFAA 2.0 (Gopalakrishnan e Manik, 2010), que é o programa desenvolvido pela FAA (*Federal Aviation Administration*) para realizar retroanálises em pavimentos aeroportuários norte americanos, mas que tem sua aplicação com mesma precisão em pavimentos rodoviários. O BAKFAA se baseia na TSCE e utiliza a função de mínimos

quadrados para diminuir os desvios entre as bacias mensuradas e as calculadas, visando minimizar os erros do processo de retroanálise.

3. TRECHO EXPERIMENTAL

O trecho experimental abordado nesse estudo foi executado na Rodovia Fernão Dias (BR-381), que liga os municípios de Guarulhos-SP, na região metropolitana de São Paulo-SP, e Confins-MG, na região metropolitana de Belo Horizonte-MG. Com 561,1km de extensão, essa rodovia é um importante corredor rodoviário que interliga os dois grandes polos industriais do Brasil. No trecho analisado, o volume de tráfego anual é de aproximadamente $1,1 \times 10^7$ veículos, dos quais 26% correspondem aos veículos comerciais para o primeiro ano e N de projeto de $1,36 \times 10^8$ para um período de 10 anos. O trecho pertence a um projeto em andamento com os Recursos de Desenvolvimento Tecnológico (RDT) da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) junto a Autopista Fernão Dias do Grupo Arteris, a qual é responsável pela administração e manutenção da rodovia.

3.1. Concepção do Trecho Experimental

O trecho experimental foi executado na faixa da direita, entre os km 948+800 e 949+200 da pista sul da BR-381, no sentido Belo Horizonte - São Paulo, no município de Extrema-MG, onde a pista é composta de duas faixas de rolamento por sentido. O trecho em questão é constituído de quatro segmentos de 100,0 m cada e com diferentes materiais de base: (i) BGS, (ii) BGTC, (iii) *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) com emulsão e (iv) RAP com espuma. O presente artigo aborda os segmentos de BGS e BGTC.

Na Figura 1, encontram-se ilustrados os segmentos 1 e 2 correspondentes às camadas de base de BGS e BGTC, ambas com uma camada de revestimento asfáltico de CBUQ, faixa III-SPV 19,0 mm com CAP 30-45, e as respectivas dimensões adotadas para a construção do trecho experimental, em que foi feito projeto e análise mecanicista. Ambos os segmentos foram construídos sobre uma infraestrutura remanescente de solo.

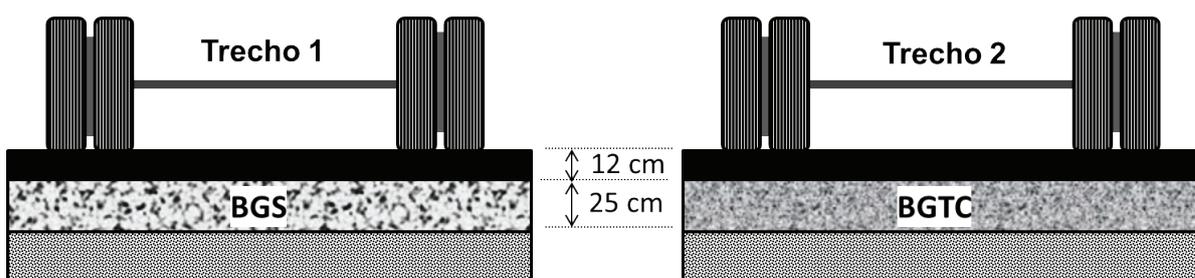


Figura 1: Seções transversais dos segmentos de BGS e BGTC

3.2. Estrutura dos segmentos

A execução do trecho experimental procedeu com a fresagem do pavimento existente. Dessa forma, retirou-se 37,0 cm de profundidade de material, obtendo assim uma estrutura em solo remanescente, sobre a qual foram executadas as bases de BGS e BGTC. Para ambos os casos, foram construídos 25,0 cm de camada de base e 12 cm de camada de revestimento.

3.3. Segmento 1 – BGS

A mistura da BGS utilizada para compor a base do segmento 1 foi enquadrada na faixa C da norma do DER-SP ET-DE-P00/008 - 2005. Na Figura 2, tem-se a granulometria da amostra coletada em campo e o enquadramento nos limites da faixa de trabalho. Observa-se que a granulometria executada apresenta dois pontos fora da faixa de trabalho, que podem ser explicados a partir do método de composição da mistura em usina. A usina, localizada no município de Bragança Paulista - SP, possui 3 silos, onde são adicionados os materiais agregados em categorias comerciais em termos granulométricos. O teor de umidade verificado por meio do método da estufa (DNER-ME 196/98) foi de 5,2%. A Figura 3 ilustra a execução do segmento - 1 de BGS.

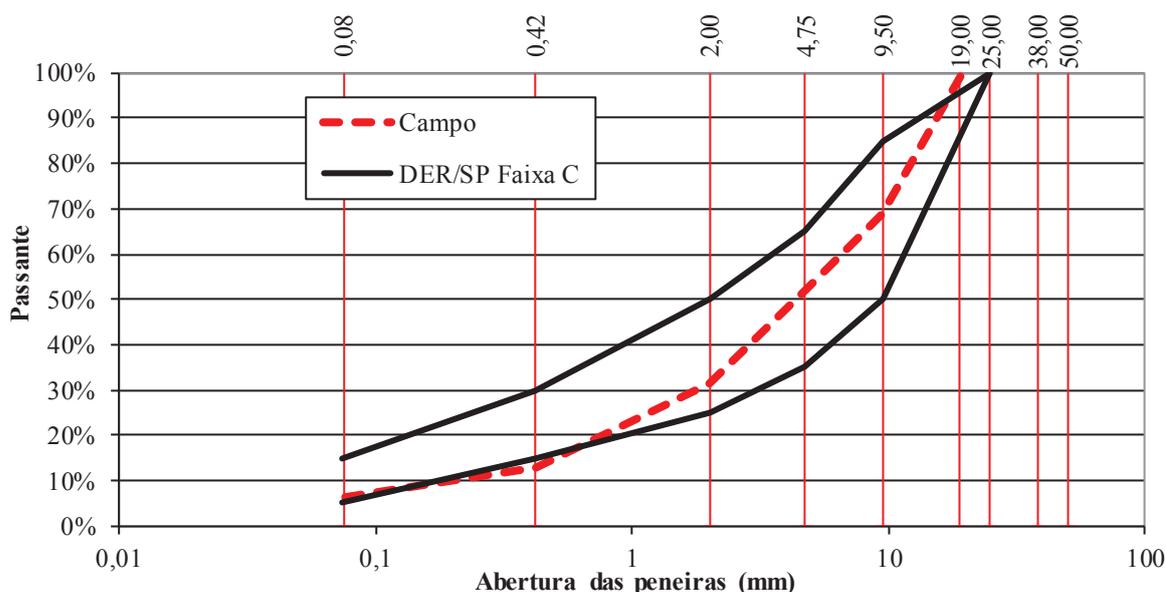


Figura 2: Granulometria da base de BGS



Figura 3: Execução do segmento 1 (BGS)

3.4. Segmento 2 – BGTC

A mistura de BGTC utilizada no segmento 2 foi executada com a adição de 4% de cimento e a granulometria se enquadrada na faixa B da norma ABNT NBR 11803-2013. Observa-se na Figura 4 que a curva da BGTC executada em campo possui um ponto fora da faixa, estando à

curva dentro da faixa de trabalho. O teor de umidade verificado por meio do método da estufa (DNER-ME 196/98) foi de 6,0%. A Figura 5 ilustra a execução do segmento 2 - BGTC.

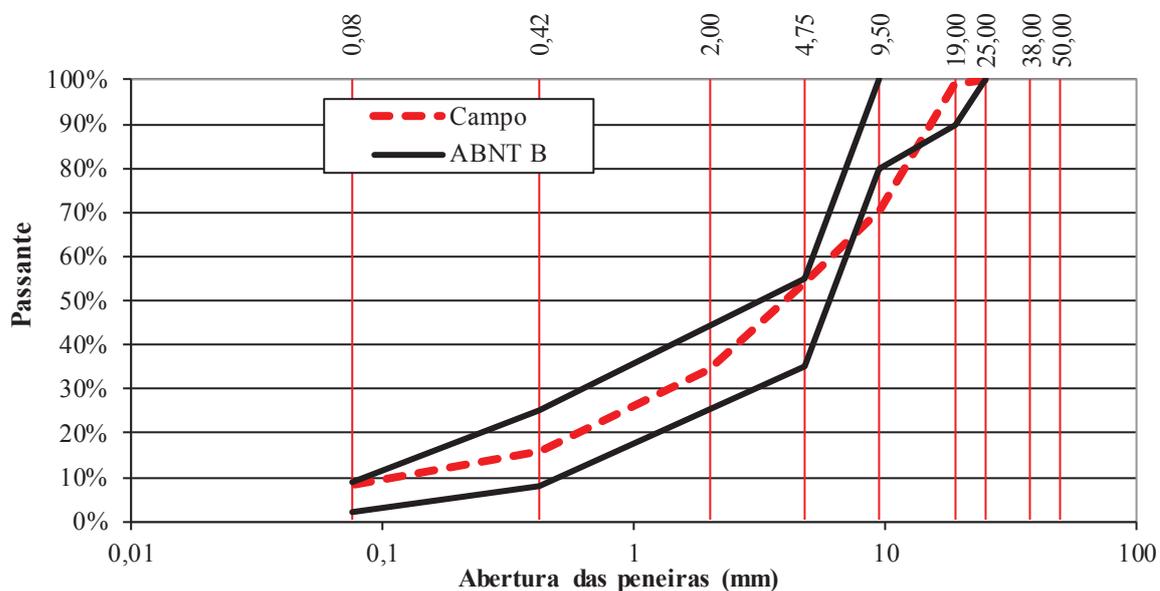


Figura 4: Granulometria da base de BGTC



Figura 5: Execução do segmento 2 (BGTC)

4. MONITORAMENTO DO TRECHO EXPERIMENTAL

4.1. Levantamento por FWD

Com o objetivo de realizar o acompanhamento das respostas estruturais dos pavimentos no trecho experimental, foram executados ensaios de FWD em três momentos distintos: (i) ao final da construção do trecho experimental, em Dezembro/2014, (ii) após 3 meses, em Março/2015 e (iii) após 7 meses da construção, em Julho/2015. Na Figura 6, é apresentado o equipamento utilizado nos levantamentos de FWD.



Figura 6: Equipamento utilizado nos levantamentos de FWD

Os dados de deflexões máximas (D_0), apresentados na Figura 7, representam as médias entre os valores de Trilha de Roda Externa (TRE) e Eixo da Faixa de Rolamento (EIXO). Todos os valores foram normalizados em função da carga (4.100kgf) e da temperatura de referência (25°C) de acordo com a norma do DER-SP IP-DE-P00/003-2006. O primeiro levantamento de FWD foi realizado somente no trecho experimental, enquanto que os demais levantamentos foram realizados também nos 100 metros antes do trecho, que possui aproximadamente 37 cm de revestimento asfáltico de possíveis sucessivos recapamentos. Esses levantamentos permitiram verificar comportamentos distintos para os diferentes tipos de bases usadas no trecho experimental.

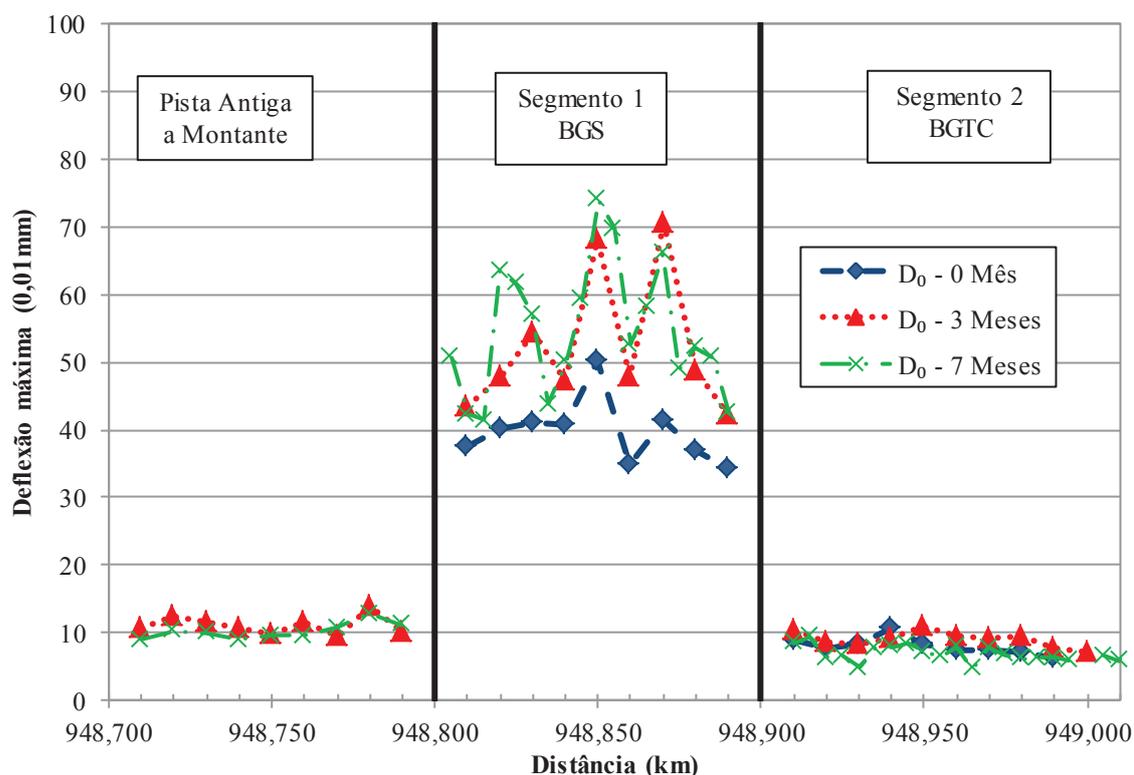


Figura 7: Valores médios dos levantamentos deflectométricos para as idades zero, três e sete meses

O segmento 1, com BGS, apresenta os maiores valores de D_0 (deflexão máxima) já no momento da construção (idade 0). Isto se dá pelo comportamento de pavimento flexível que esta base confere. Os valores de D_0 médio se elevaram consideravelmente de $39,7 \times 10^{-2} \text{mm}$

para $52,2 \times 10^{-2}$ mm em 3 meses, o que corresponde a um aumento de 32%, demonstrando assim a influência do tráfego nesse pavimento em um primeiro momento. Para a idade de 7 meses houve um aumento do valor de D_0 para $54,7 \times 10^{-2}$ mm, o que corresponde a uma alteração de 5% do valor anterior. Observa-se na Figura 8, as bacias médias com os levantamentos do TRE e EIXO para o segmento 1 de BGS, para as diferentes idades.

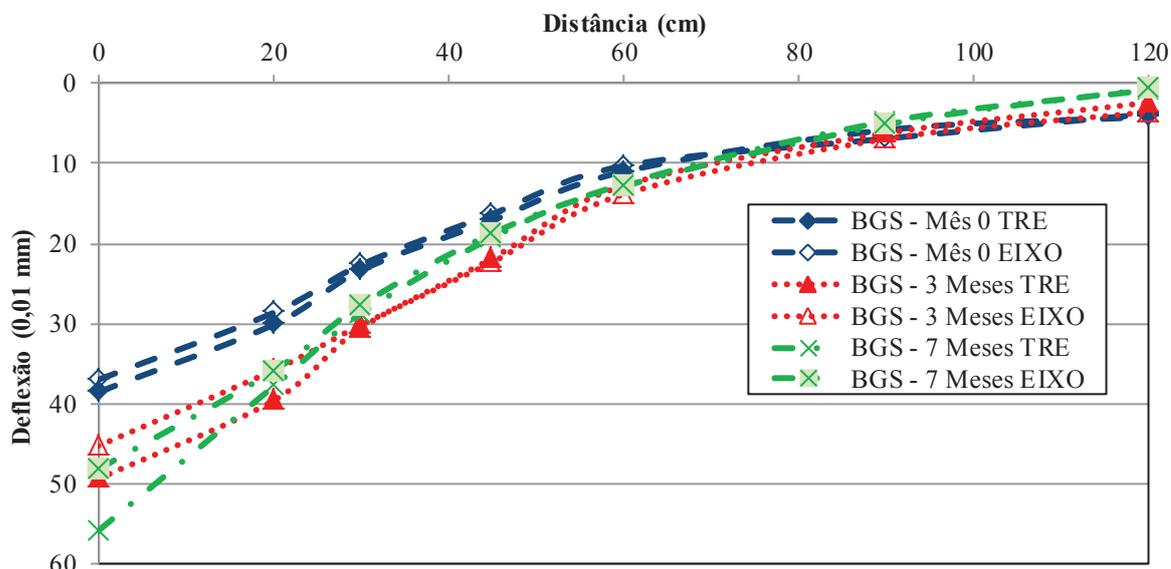


Figura 8: Bacias de deflexões médias do segmento 1 (BGS)

A análise das bacias de deflexões médias demonstra a influência do tráfego no aumento da deflexão e na mudança da bacia. Na idade zero, as bacias da TRE são muito próximas às bacias do EIXO. Uma distinção mais considerável foi observada na idade de 3 meses, na qual o valor de D_0 entre TRE e EIXO foi maior que 10%, e na idade de 7 meses, cuja diferença foi superior a 15%. Por outro lado, os valores de deflexão dos últimos geofones, D_{90} (deflexão a 90 cm do ponto de aplicação da carga) e D_{120} (deflexão a 120 cm do ponto de aplicação da carga), são similares, indicando o comportamento das camadas inferiores, com valores médios de $6,0 \times 10^{-2}$ e $2,6 \times 10^{-2}$ mm, respectivamente, para todas as três idades. Dessa forma, é possível concluir que a estrutura remanescente está trabalhando de forma semelhante, e não está sendo afetada pelo tráfego, ou pelas mudanças climáticas.

No segmento 2, no qual foi executado a base estabilizada (BGTC), os níveis de D_0 são bem inferiores aos valores do segmento de BGS e não se alteraram consideravelmente no período analisado. Foram observados valores de deflexão iguais a $7,7 \times 10^{-2}$, $9,2 \times 10^{-2}$ e $6,8 \times 10^{-2}$ mm, referentes às idades 0, 3 e 7 meses, respectivamente. Na Figura 9, onde se apresentam as bacias médias para TRE e EIXO, observa-se um comportamento distinto para o pavimento com base estabilizada com cimento que ainda não sofreu influência visível do tráfego. As pequenas diferenças existentes entre as bacias levantadas pelo FWD provavelmente se deram por acomodação, ou mesmo certa variabilidade, dos materiais.

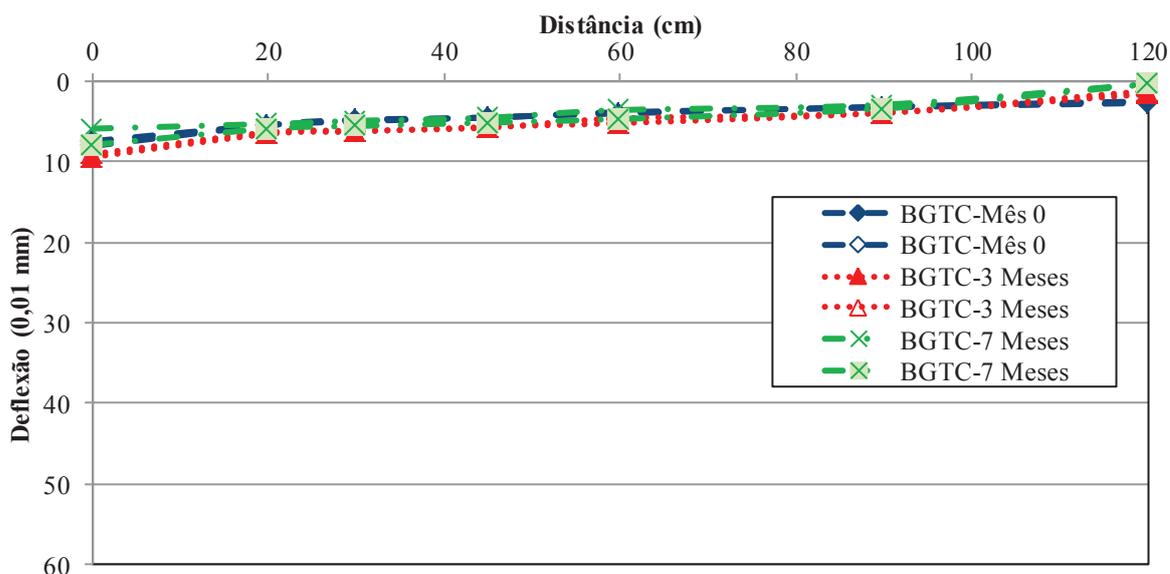


Figura 9: Bacia de deflexões do segmento 2 (BGTC)

Ao se comparar as bacias do segmento 1 com as bacias do segmento 2, é evidente a diferença do formato entre as bacias do pavimento flexível e o pavimento semirrígido. Segundo Yoder e Witczak (1975), o comportamento flexível do pavimento se caracteriza pela distribuição concentrada da carga na proximidade do local de aplicação, enquanto que o comportamento do pavimento semirrígido se aproxima ao comportamento do pavimento rígido, e possui o efeito de placa que se caracteriza por não haver um ponto definido de inflexão na bacia (Balbo, 2007).

4.2. Retroanálises

A Figura 10 e a Figura 11 mostram, respectivamente, os módulos médios retroanalizados dos segmentos 1 e 2 para os levantamentos de FWD nas idades de 0, 3 e 7 meses. O gráfico em barras apresenta os valores médios retroanalizados entre bacias de TRE e EIXO por camada, bem como a barra de variação dos respectivos módulos destacada em vermelho. Nos módulos apresentados por segmento é possível constatar: (i) um módulo inicial coerente para a capa asfáltica de aproximadamente 4.500MPa, conforme ensaios realizados em laboratório; (ii) uma disparidade da rigidez entre as bases empregadas, uma vez que a rigidez da base em BGTC é quase 100 vezes maior que a da BGS; e (iii) um valor médio de 125MPa para a estrutura remanescente no segmento 1 e de 350MPa no segmento 2, essa diferença de módulos retroanalizados se deve ao comportamento coesivo dessa camada, e o baixo nível de tensões que chega no segmento 2 de BGTC.

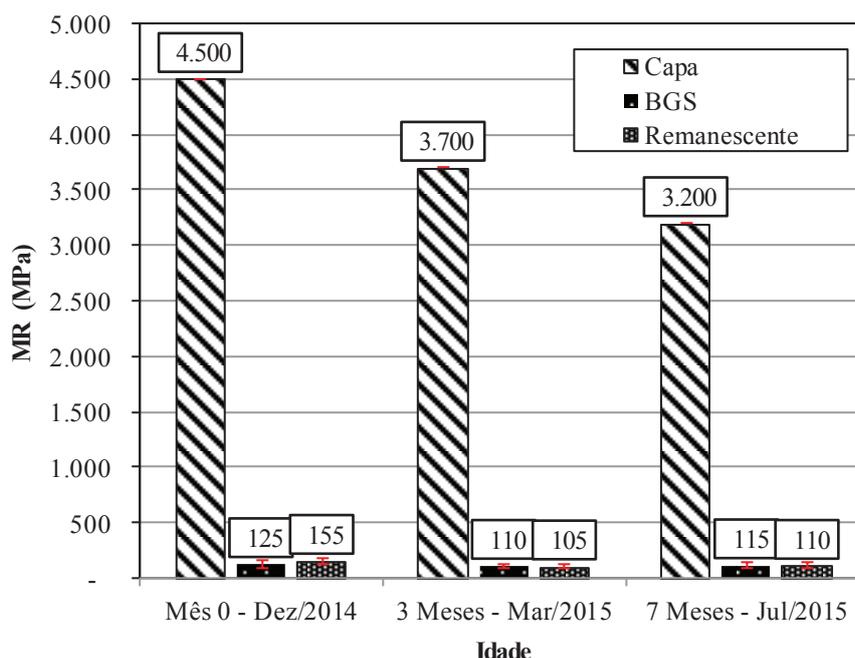


Figura 10: Módulos retroanalizados do segmento 1 (BGS)

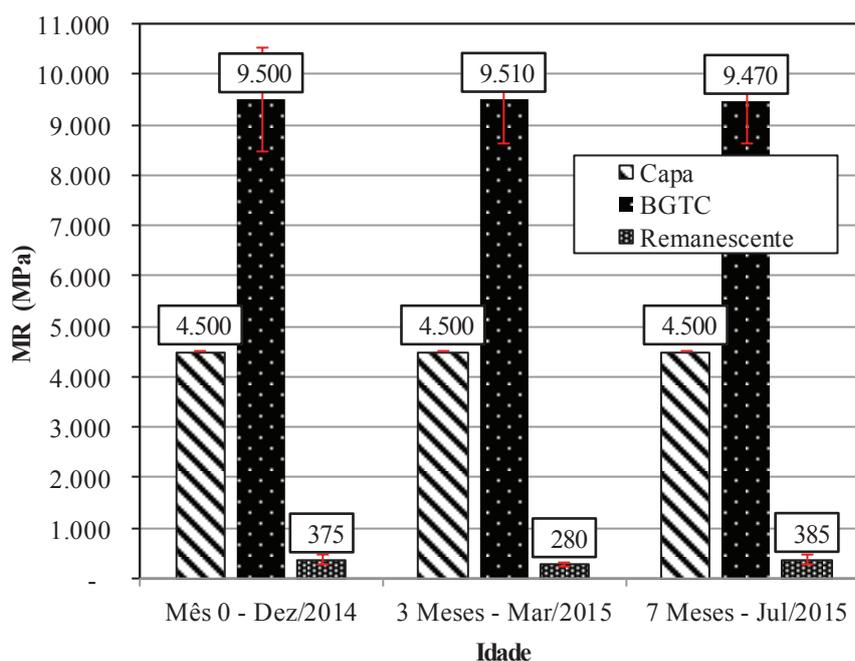


Figura 11: Módulos retroanalizados do segmento 2 (BGTC)

Analisando a evolução do segmento 1 de BGS nos três levantamentos da Figura 10, é possível verificar o comportamento dos módulos retroanalizados ao longo dos 7 meses, (i) módulo da capa asfáltica está decrescendo com o passar do tempo, que se deve os danos causados pelo elevado tráfego, este efeito vem sendo acompanhado pelo monitoramento da área trincada (ii) os módulos da base de BGS permanecem constante entre 115 MPa, que são relativamente baixos, e que possivelmente é decorrente de uma dificuldade de compactação da camada de

base durante a fase construtiva, o que refletiu em um MR inicial inferior ao 250 MPa desejado em projeto.

No segmento 2 de BGTC, os módulos retroanalizados para as idades 0, 3 e 7 meses da Figura 11, apresentaram módulos constantes tanto para a Capa asfáltica quanto para a Base de BGTC. Nesta estrutura a solicitação do tráfego até o presente momento ainda não foi relevante para a ocorrência de danos aos materiais. Até o presente momento não foi verificada a reflexão das trincas de retração, que são comumente verificadas para os materiais estabilizados com cimento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados parciais deste estudo demonstram que o desempenho do pavimento flexível é distinto quando comparado ao comportamento do pavimento semirrígido em condições reais e idênticas de solicitação. Tais diferenças de comportamento para as estruturas indicam que até o momento a estrutura flexível mostra-se menos apropriada para as condições de tráfego da rodovia estudada, e isto é demonstrado pela evolução do nível deflectométrico do pavimento e pela redução dos módulos retroanalizados das camadas desta estrutura. Por outro lado, a estrutura semirrígida tem se mostrado adequada para as mesmas condições de tráfego e de clima, apresentando comportamento constante ao longo do período analisado.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela oportunidade e apoio no desenvolvimento desta pesquisa, à ANTT pelo financiamento e à Autopista Fernão Dias e ao Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Arteris pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho. Os autores agradecem ainda à CAPES pelas bolsas de pesquisa dos autores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 11803:2013. *Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento*, 2013.
- Balbo, J. T. *Pavimentação Asfáltica – materiais, projeto e restauração*. Oficina de Textos, São Paulo, 2007.
- Balbo, J. T. *Estudos das propriedades Mecânicas das misturas de Brita e Cimento e sua Aplicação aos Pavimentos Semirrígidos*. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.
- Bernucci, L. L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. *Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros*. ABEDA, Petrobras, Rio de Janeiro, 2008.
- Departamento de Estradas de Rodagem (DER) IP-DE-P00/003. *Avaliação funcional e estrutural de pavimento*. 2006.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), DNER-ME 196/98. *Agregados – determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), DNER-PRO 273/96. *Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer” (FWD)*, 1996.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), DNER-ME 024/94. *Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman*, 1994.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), DNIT 141/2010. *Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço*, 2010.
- Gopalakrishnan, K.; Manik, A. *Co-variance matrix adaptation evolution strategy for pavement backcalculation*. Construction and Building Materials, 24, 2177-2187, 2010.
- Lay, M. G. *Ways of the World – A History of the World’s Roads and of the Vehicles that used them*. Rutgers University Press, EUA, 1992.
- Leandri, P.; Bacci, R.; Di Natale, A.; Rocchio, P. e Losa, M. (2013) *Appropriate and Reliable Use of Pavement Instrumentation on In-Service Roads*. Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements, ASCE.
- Medina, J. *Mecânica dos pavimentos*. UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.
- Pinto, S.; Preussler, E. *Pavimentação Rodoviária – Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. Rio de

Janeiro, 2002.

- Suzuki, C. Y. Contribuição ao estudo de pavimentos rodoviários com estrutura invertida (Sub-base Cimentada). Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- Timm, D.H. (2009) *Design, Construction and Instrumentation of the 2006 Test Track Structural Study*. NCA T Report 09-01.
- Yoder, E.; Witczak, M. *Principles of pavement design*. 2ª edição, Nova Iorque, EUA, John Wiley & Sons, 1975.

Lucas Rodrigues de Andrade (eng.lucasandrade@gmail.com)

André Kazuo Kuchiishi (andre.kuchiishi@usp.br)

Iuri Sidiney Bessa (iuribessa@usp.br)

Kamilla L. Vasconcelos (kamilla.vasconcelos@gmail.com)

Liedi Légi Bariani Bernucci (liedi@usp.com)

Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP)

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)

Av. Prof. Almeida Prado - Travessa 2, N. 83 - 05508-070 - São Paulo - SP - Brasil

Igor Amorim Beja (igor.beja@arteris.com.br)

José Mário Chaves (jmariochaves@uol.com.br)

Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDT)

Estrada Municipal José de Souza Bueno, 97 - Rio Acima 12935-000 - Vargem - SP - Brasil