

# Análise de tensões e deformações em pavimentos flexíveis utilizando geogrelha como reforço de revestimento asfáltico

Natalia S. Correia

Universidade de São Paulo, EESC/USP, São Carlos, Brasil, nataliacorreia@usp.br

Jorge G. Zornberg

The University of Texas at Austin, Austin, Texas, Estados Unidos, zornberg@mail.utexas.edu

**RESUMO:** O estudo de pavimentos é de grande importância na Engenharia Geotécnica brasileira devido à crescente necessidade de melhora da situação da malha viária nacional. Para tanto, o desenvolvimento e a aplicação de novas técnicas são necessárias, principalmente no âmbito econômico. A técnica do uso de reforços geossintéticos em revestimentos asfálticos é identificada como uma alternativa ao aumento da vida útil do pavimento através da mitigação de trincas por fadiga e de reflexão. No entanto, a maioria das aplicações desta técnica não correlaciona os benefícios estruturais da inclusão do geossintético no revestimento para a melhora do desempenho global do pavimento. O objetivo desta pesquisa é investigar os benefícios estruturais no desempenho de pavimentos flexíveis trazidos pelo reforço de geogrelhas poliméricas em camadas asfálticas através do monitoramento de tensões e deformações no revestimento asfáltico. Um equipamento acelerador de cargas de tráfego foi construído para esta pesquisa e consiste numa caixa metálica de grande porte em que seções de pavimento em grande escala podem ser construídas. Seções de pavimento com e sem o uso da geogrelha foram avaliadas. Sensores foram instalados nas camadas do pavimento medindo tensões e deformações. Uma geogrelha de PVA foi escolhida como material de reforço do revestimento asfáltico e a emulsão asfáltica de ruptura rápida foi utilizada como ligante. O uso da geogrelha polimérica reduziu consideravelmente os afundamentos plásticos e deformações laterais na superfície, além de diminuição nos níveis de deslocamentos elásticos. Tensões verticais nas camadas subjacentes também apresentaram expressiva redução. Esta pesquisa permitiu concluir que a geogrelha presente na camada asfáltica atua como elemento de reforço, levando ao aumento no desempenho da resposta estrutural do pavimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Revestimento asfáltico, Reforço, Geogrelha.

## 1 INTRODUÇÃO

Apesar de bem sucedida a experiência acumulada ao longo dos anos sobre o uso de geossintéticos para minimizar trincas de fadiga e de reflexão em revestimentos asfálticos, a maioria das aplicações desta técnica não correlaciona os benefícios estruturais da inclusão do geossintético no revestimento para a melhora do desempenho estrutural do pavimento. Atualmente, na técnica de restauração de pavimentos com geossintéticos (DNER ET-DE-P00/43, 2006), não existe uma metodologia de projeto estabelecida para esta aplicação ou um consenso único para os

métodos e materiais empregados na construção. Ademais, há um certo ceticismo dos engenheiros em relação ao uso de geossintéticos como elemento estrutural nas camadas asfálticas, principalmente porque o benefício do reforço nesta técnica ainda não é completamente quantificado.

No entanto, diversas pesquisas sobre reforços geossintéticos em camadas asfálticas, especialmente com o uso de geogrelhas, mostram que a inclusão deste material pode trazer redução no nível de deformações permanentes do revestimento, além de redução de tensões nas camadas do pavimento (Austin e Gilchrist, 1996; Montestruque et al., 2004;

Wasage et al., 2004; Laurinavičius e Oginskas, 2006; Siriwardane et al., 2010; Solaimanian, 2013 e Graziani et al., 2013).

Uma das formas de quantificar a eficiência do uso de reforços geossintéticos em pavimentos é através de ensaios realizados em grande escala, medindo a resposta do pavimento com o uso de instrumentação. O uso de instrumentação se tornou uma importante ferramenta para o monitoramento do desempenho de pavimentos, possibilitando medidas de tensões, deformações e deflexões nas camadas da estrutura, sob cargas reais de tráfego. Os chamados ensaios acelerados de pavimento (*APT tests*), apresentam-se como um sistema eficaz para o monitoramento de seções instrumentadas de pavimento, particularmente por proporcionarem aceleração da deterioração das estruturas, trazendo todo o controle proporcionados por estudos de laboratório para estruturas construídas em grande escala.

Desta forma, o objetivo desta pesquisa é investigar os benefícios estruturais no desempenho de pavimentos flexíveis trazidos pelo reforço de geogrelhas em camadas asfálticas através do uso de ensaios acelerados de seções instrumentadas de pavimento. Um simulador de cargas de tráfego foi construído para esta pesquisa, possibilitando ensaios com carregamentos cíclicos de roda. Estas informações devem fornecer a compreensão dos mecanismos de reforço em revestimentos reforçados com geogrelha, particularmente relacionados à melhora estrutural do pavimento.

## 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 Simulador de cargas de tráfego

Modelos de estruturas de pavimento em grande escala foram construídos no Laboratório de Geossintéticos da Universidade de São Paulo EESC-USP, submetidos à carregamentos cíclicos de roda através de um simulador de cargas de tráfego. O simulador é composto por uma estrutura de reação, instalada na caixa de ensaios utilizada para a construção dos modelos de pavimento, e um sistema para aplicação do carregamento. A caixa de ensaios tem dimensões de 1,8 m (altura), 1,6 m (largura) e 1,8 m (comprimento). O sistema é composto

por um pneu, carregado pelo pistão hidráulico, e um motor que controla os movimentos do ciclo, além da célula de carga que monitora o carregamento imposto. A Figura 1 apresenta o equipamento simulador de cargas de tráfego do Laboratório de Geossintéticos EESC-USP.

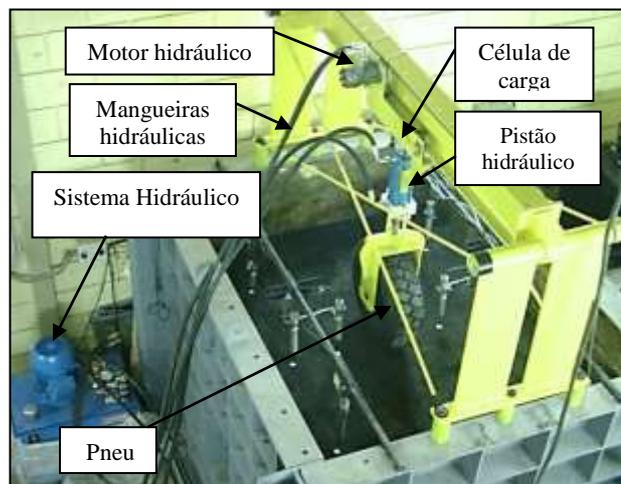


Figura 1. Equipamento Simulador de cargas de tráfego desenvolvido na EESC-USP.

O movimento do pneu corresponde a 1 ciclo realizado em 2,4 segundos, que extense-de em uma distância de 1.0 m (com pressão de contato constante), resultando em uma frequência de ensaios de 0,4 Hz. A pressão de contato do pneu (154 mm de largura e 546 mm de diâmetro) utilizada nos ensaios foi de 700 kPa, para uma carga de 16 kN (1,6 t). A Figura 2 apresenta o ciclo de carregamento imposto e a resposta da célula de carga.

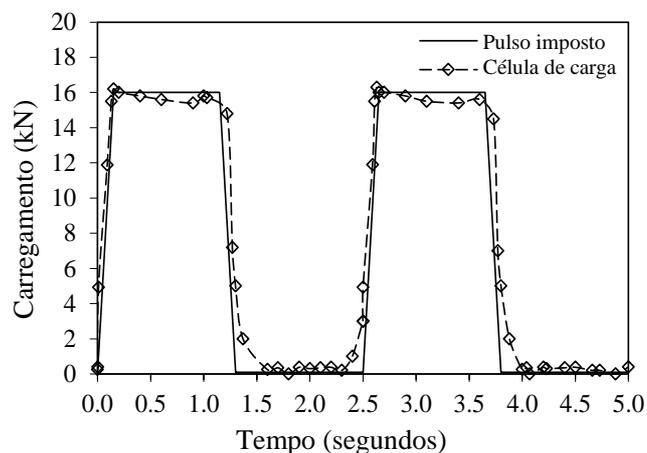


Figura 2. Ciclo de carregamento dos ensaios.

## 2.2 Materiais e propriedades das camadas

O solo de subleito é um silte argiloso (MH) que foi manualmente compactado na caixa ensaios em camadas de 50 mm, totalizando 1 metro. Os parâmetros de compactação usados foram  $\gamma_{dm\acute{a}x}=15 \text{ kN/m}^3$  e  $w_{\acute{o}t} = 29\%$  (Proctor Normal). Com CBR de 4,5% assegurou-se uma condição de subleito fraco. O agregado da base (A-1-a) foi compactado com placa vibratório em camadas de 100 mm, com altura variável. Os parâmetros de compactação foram  $\gamma_{dm\acute{a}x}=24 \text{ kN/m}^3$  e  $w_{\acute{o}t} = 6,5\%$  (Proctor Normal), com GC=99,5%. A camada asfáltica é classificada como Capa de rolamento - mistura Tipo C (DNER ET-DE-P00/027) com teor de asfalto de 5,4%. A massa asfáltica foi compactada com placa vibratória a  $130^{\circ}\text{C}$ , em uma única camada de 50 mm. As camadas de recapeamento (após os ensaios) foram realizadas nas mesmas condições, compactadas em uma única camada de 60 mm. A Figura 3 apresenta o layout típico das seções de pavimento.

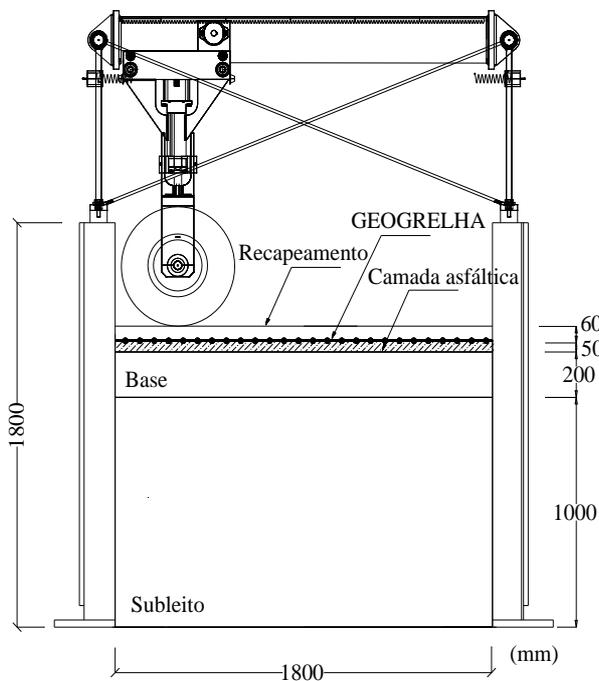


Figura 3. Layout típico das seções de pavimento.

## 2.3 Características da geogrelha e instalação

Uma geogrelha específica para uso em reforço de capa asfáltica foi utilizada nos ensaios. A geogrelha de PVA é um produto biaxial de 50 kN/m (ASTM D6637, 2011) com abertura quadrangular de 40 mm. Um geotêxtil não

tecido de baixa gramatura é fixado nesta geogrelha para permitir melhor instalação no campo, além de permitir contínua aderência entre as camadas, também assegurada por uma pré-pintura betuminosa no material.

No caso das seções recapeadas com geogrelha, esta foi cortada nas dimensões da caixa e instalada sobre o pavimento previamente degradado (1ª fase dos ensaios). A direção longitudinal foi instalada paralelamente à trilha de roda. A Figura 4 ilustra a instalação da geogrelha na caixa de ensaios. Uma pintura de ligação com emulsão asfáltica ( $0,6 \text{ l/m}^2$  residual) foi aplicada antes da instalação. Para a seção recapeada sem reforço, a mesma taxa de ligante foi utilizada durante o recapeamento.

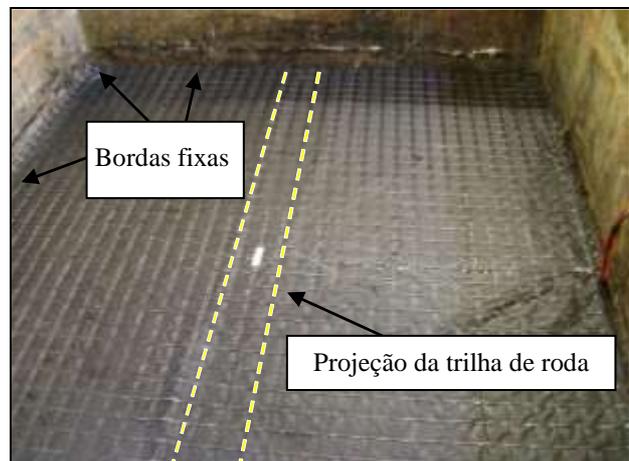
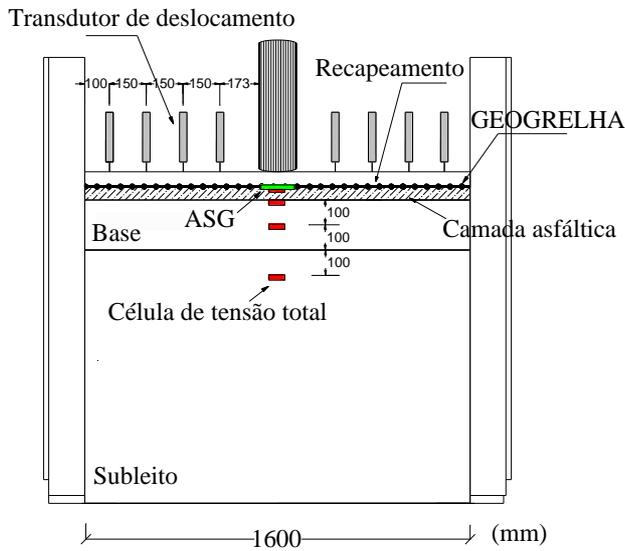


Figura 4. Instalação da geogrelha na caixa de ensaios.

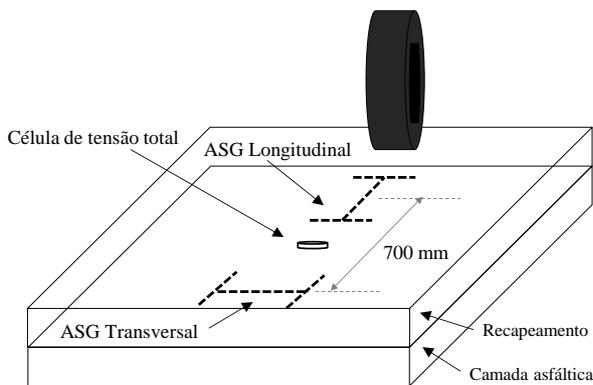
## 2.4 Plano de instrumentação

Um total de 8 sensores de deslocamento vertical linear (tipo LVDT) foram utilizados para monitorar os deslocamentos plásticos e elásticos da superfície dos pavimentos. Além disso, um perfilômetro foi utilizado para medidas de afundamento na trilha de roda. Células de tensão total foram instaladas na fibra inferior das camadas asfálticas (capacidade de 1 MPA), no centro da base e no topo do subleito (capacidade de 500 kPa), de forma a quantificar as tensões verticais dinâmicas nas camadas do pavimento. Sensores de deformação (*Asphalt Strain Gauges* - ASG) do tipo H foram instalados horizontalmente na interface das camadas de revestimento asfáltico, tanto no sentido transversal quanto longitudinal à trilha de roda.

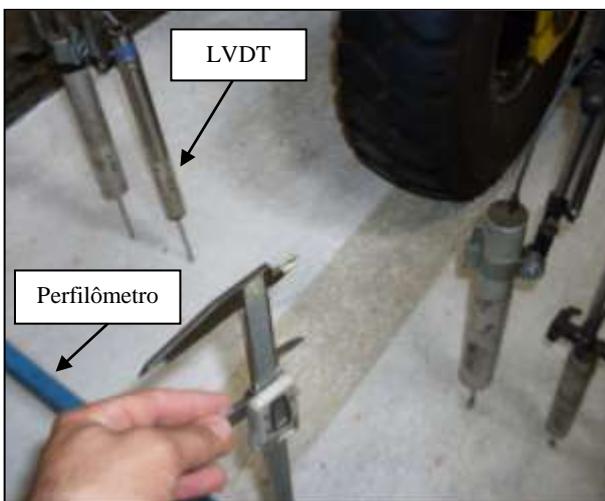
A Figura 5 apresenta o layout típico da instrumentação, posição dos sensores e detalhe das medidas de deslocamentos na superfície.



(a)



(b)



(c)

Figura 5. Layout de instrumentação: (a) seção típica; (b) posição dos sensores; (c) medidas de deslocamentos na superfície.

## 2.5 Matriz de ensaios

A Tabela 1 apresenta a matriz de ensaios deste estudo. Duas seções de pavimento são apresentadas, as quais foram ensaiadas antes do recapeamento (A) e após o recapeamento (B). O Teste 1 não contém reforço geossintético na estrutura, e no Teste 2, a geogrelha foi aplicada como reforço de revestimento asfáltico. Como indicado na Tabela 1, no primeiro estágio dos ensaios (A), as seções foram submetidas à  $N=10^5$  ciclos de carregamento cíclico. No segundo estágio, após o recapeamento aplicado sobre a superfície previamente danificada, um total de  $N=10^5$  foram também aplicados. Verifica-se, portanto, que as seções 1A e 2A são idênticas, e foram utilizadas como parâmetro de controle de qualidade para comparação dos resultados dos ensaios.

Tabela 1. Seções e nomenclaturas utilizadas.

Testes	Seção	Estágio	Número de ciclos
1	Não Reforçada	1A	1° - Controle
		1B	2° - Recap.
2	Reforçada	2A	1° - Controle
		2B	2° - Recap. com geogrelha

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Deslocamentos plásticos e elásticos

A Figura 6 apresenta os resultados de deslocamentos verticais plásticos máximos, ocorridos abaixo da carga de roda, para os dois estágios de ensaios. Verifica-se no primeiro estágio dos ensaios que, seções controle idênticas (1A e 1B), mostraram excelente repetibilidade nos resultados de deslocamentos plásticos, mostrando confiabilidade para comparações na segunda etapa de ensaios.

Verificou-se também nestas análises que a inclusão da geogrelha polimérica no revestimento asfáltico da seção 2B possibilitou uma redução de 36% nos valores máximos de afundamentos plásticos após 100.000 ciclos de carregamento, quando comparados aos resultados da seção sem reforço (1B).

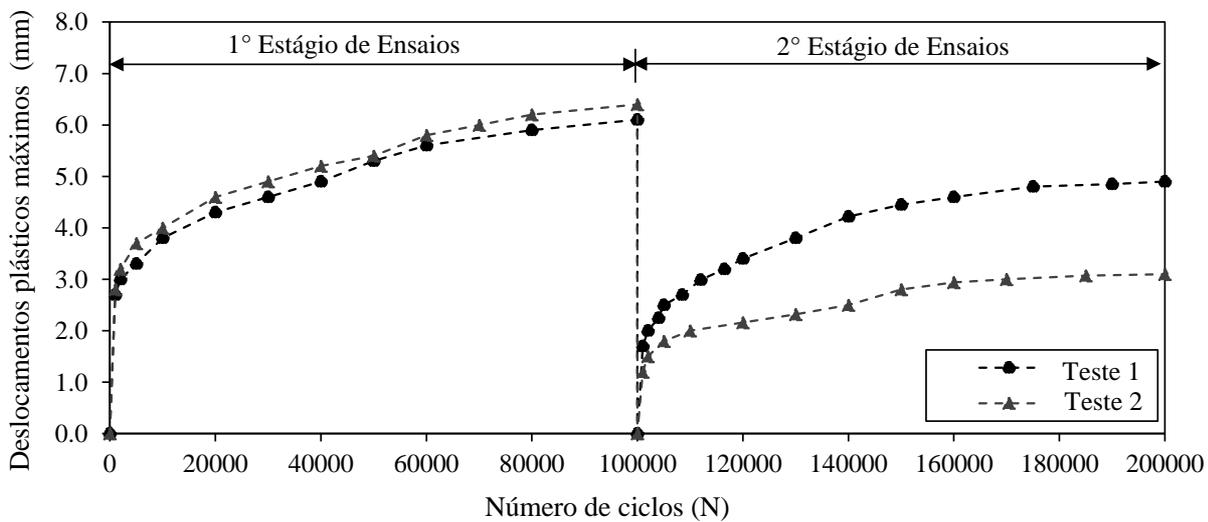


Figura 6. Deslocamentos plásticos máximos durante os ensaios.

Estes resultados são consistentes com os resultados apresentados no trabalho de Siriwardane et al. (2010), que avaliou deslocamentos plásticos acumulados em seções reforçadas com geogrelha, porém de fibra de vidro. A melhora no desempenho foi de aproximadamente 40%, muito similar aos valores encontrados nesta pesquisa. Num estudo de Perkins (1999), os resultados mostram que posicionar a geogrelha a uma certa altura dentro da camada da base mostrou melhor desempenho em termos de afundamento do que quando colocada na interface base-subleito, sugerindo que quanto mais próximo da superfície estiver a geogrelha, melhor pode ser o desempenho da estrutura.

Os resultados desta pesquisa também podem ser usados para uma comparação de desempenho das seções reforçadas e não reforçadas através da taxa de benefício de tráfego ou TBR (*Traffic Benefit Ratio*). O TBR é definido como o número de ciclos necessários para alcançar um determinado parâmetro na seção com reforço, dividido pelo número de ciclos para alcançar este mesmo parâmetro na seção sem reforço. Neste estudo, para se alcançar 3 mm de deslocamento permanente na superfície (segunda fase dos ensaios), foram necessários 16,4 mil ciclos de carregamento na seção sem reforço e cerca de 71 mil ciclos na seção reforçada, gerando um TBR de 4.33. O uso da geogrelha quadruplicou a melhora da vida útil do pavimento em termos de deformações na superfície.

A Figura 7 apresenta o perfil de trilha de roda apresentado ao final dos testes 1 e 2. Verifica-se na Figura 7 que a seção sem reforço, além de apresentar maior afundamento plástico (5,1 mm em comparação à 3,0 mm da seção reforçada), apresenta também maiores níveis de deformação lateral (deslocamento de massa), embora as massas asfálticas tenham apresentando o mesmo índice de vazios. Estes resultados sugerem que a geogrelha no revestimento asfáltico atuou na redução de deformações laterais do revestimento. Quando a carga é aplicada na superfície, uma zona de tensão é desenvolvida na camada asfáltica inferior. A tensão de tração atua no revestimento é transferida para geogrelha, que atua como elemento de reforço, resistindo à estes esforços.

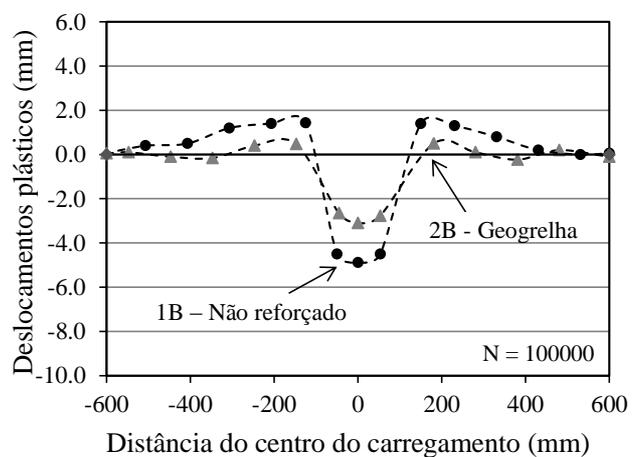


Figura 7. Afundamentos em trilha de roda.

A Figura 8 apresenta uma as bacias de deflexão medidas com os LVDTs durante os ensaios. Os resultados mostram níveis de deslocamentos elásticos similares aos obtidos nas seções controle 1A e 1B.

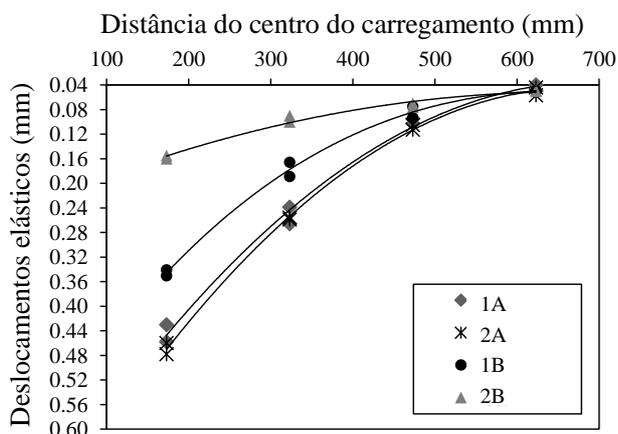


Figura 8 – Bacias de deflexão registradas durante os ensaios.

Comparando a segunda fase de ensaios, verificam-se diferenças na bacia de deflexão da seção 2A e 2B, resultado associado ao aumento na rigidez do pavimento com a inclusão da geogrelha. O efeito da geogrelha na redução dos deslocamentos elásticos foi visto com maior intensidade ao redor da carga de roda (área de maior mobilização da geogrelha), e menos expressivo quanto mais próximo da parede da caixa de ensaios (700 mm).

### 3.2 Tensões verticais transmitidas às camadas subjacentes

A Figura 9 apresenta resultados da instrumentação utilizada para permitir avaliação de tensões verticais dinâmicas nas camadas do pavimento (posicionada abaixo da carga de roda). A resposta típica das células de tensão total para um dado momento de ensaios é mostrada para a seção com reforço de geogrelha e sem reforço. De forma geral, o coeficiente de variação das respostas das células de tensão durante todo o ensaio variaram em torno de 2 a 3 % (desvio padrão de até 5 kPa). Na Figura 9a, verifica-se uma diferença expressiva nos valores de tensão vertical no revestimento da seção reforçada em relação à seção sem reforço. O mesmo ocorreu nas células instaladas na base e no topo do subleito (Figura 9b).

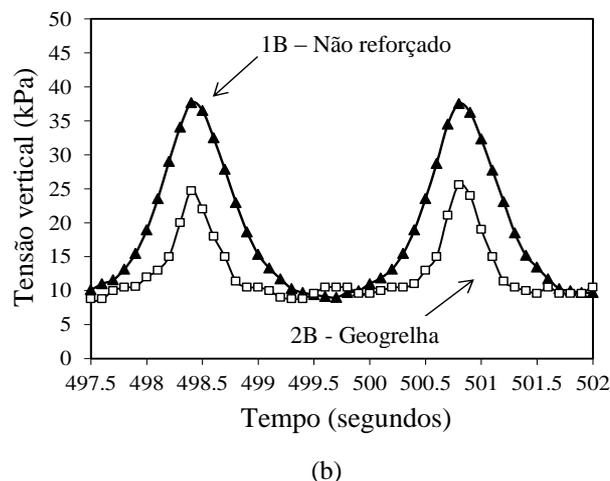
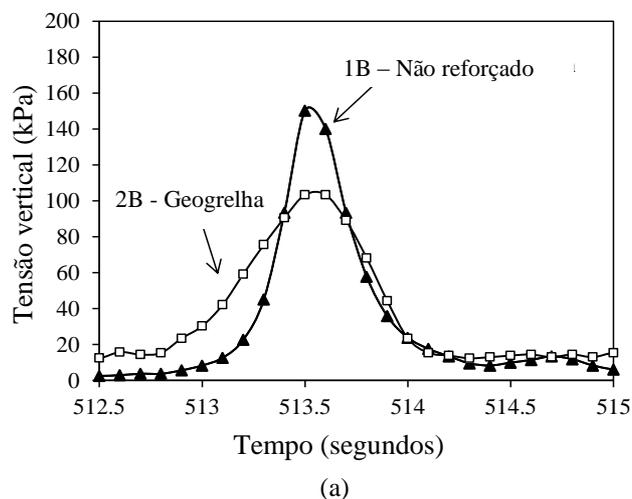


Figura 9: Resultados típicos das tensões verticais monitoradas: (a) Fibra inferior da camada asfáltica antiga; (b) Topo do subleito.

No estudo de Siriwardane et al. (2010) com geogrelha de fibra de vidro no revestimento, verificou-se que a geogrelha distribuiu a carga de roda sobre uma área maior nas camadas inferiores da seção de pavimento, causando tensões verticais inferiores no subleito. Este mesmo comportamento foi visto nesta pesquisa com a geogrelha polimérica, com redução de 32% nas tensões na fibra inferior da capa asfáltica antiga, seguidas de 30% na base e 36% de redução no topo do subleito.

Uma das células de tensão inseridas na fibra inferior do revestimento novo não mostrou resultados satisfatórios, apresentando-se danificada ao final do ensaio. Presume-se que este fato ocorreu devido à proximidade com a carga de roda e, portanto, estes dados foram excluídos das análises.

### 3.3 Deformações elásticas horizontais na camada de revestimento asfáltico

A Tabela 2 apresenta os resultados de deformação elástica horizontal (média de picos) registrados pelos sensores ASGs inseridos na interface do revestimento asfáltico das seções reforçada e não reforçada. Somente foram computadas, nesta análise, as deformações elásticas de tração. Como esperado, os sensores no sentido transversal apresentaram apenas deformação de tração. Já os sensores ASGs no sentido longitudinal, quando da proximidade da passagem da carga de roda, apresentaram pequenos níveis de deformação de compressão, seguidos de maiores deformações de tração (comportamento esperado para a resposta deste sensor).

Tabela 2. Média dos picos de deformação elástica horizontal no revestimento asfáltico.

Seção	Longitudinal ( $\mu\epsilon$ )	Transversal ( $\mu\epsilon$ )
1B	280	200
2B	125	115

Os valores de deformação elástica horizontal na Tabela 2 mostram mais de 50% de redução nas deformações longitudinais e cerca de 40% de redução nas deformações apresentadas no sentido transversal com a inclusão da geogrelha no revestimento. A redução de deformações na camada asfáltica observada enfatiza o potencial desta técnica em reduzir as ocorrências de trincas de fadiga durante a vida útil do pavimento.

## 4 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos nesta pesquisa, as seguintes conclusões são apresentadas:

- O equipamento simulador de cargas de tráfego construído para esta pesquisa atendeu as expectativas previstas. Seções controle idênticas mostraram excelente repetibilidade nos resultados, mostrando confiabilidade no controle de qualidade dos ensaios e nas comparações entre seções;

- Baseado nas medidas de deslocamentos verticais plásticos e elásticos, a seção reforçada apresentou superior desempenho em relação a não reforçada, mostrando 36% de redução nos

afundamentos plásticos máximos (trilha de roda), além de expressiva redução nas deformações laterais na superfície. Níveis de deslocamentos elásticos na superfície (bacia de deflexão) diminuíram cerca de 2,5 vezes, especialmente na área do carregamento;

- Medidas de tensões verticais transferidas às camadas subjacentes do pavimento mostraram que, na seção reforçada, houve 32% de redução nos valores de tensões na fibra inferior da camada asfáltica antiga, seguidas de 30% na base e 36% no topo do subleito;

- Reduções no nível de deformações horizontais de tração na interface do revestimento asfáltico reforçado foram também verificadas. Mais de 50% de redução nas deformações longitudinais e cerca de 40% de redução nas deformações no sentido transversal, contribuindo para menores níveis de fadiga acumulada na estrutura (potencial redução de trincas por fadiga).

Os resultados demonstraram um significativo aumento no desempenho da seção com inclusão da geogrelha polimérica (PVA) no revestimento asfáltico em comparação à uma seção idêntica sem reforço. Portanto, as diferenças constatadas no desempenho das seções são atribuídas às propriedades intrínsecas da geogrelha e sua interação com as camadas do pavimento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem a importante contribuição do Professor Dr. Benedito de Souza Bueno na orientação deste trabalho. Agradecemos ao CNPq e à HUESKER pelo apoio concedido à esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ASTM: American Society for Testing and Materials. ASTM D 6637. 2011. Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method, Oct 1, 2011.
- Austin, R. A. & Gilchrist, A. J. T. (1996). Enhance performance of asphalt pavements using geocomposites. *Geotextiles and Geomembranes*, 14, p. 175-186.
- Graziani, A.; Pasquini, E.; Ferrotti, G.; Virgili, A. Canestrari, F. (2014). Structural response of grid-reinforced bituminous pavements. *Materials and Structures*, 18p.

- DNER-SP. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. ET-DE-P00/043. (2006). *Sistema anti-reflexão de trincas com geossintéticos*. Especificação Técnica - São Paulo, Brasil.
- \_\_\_\_\_. ET-DE-P00/027. (2005). *Concreto asfáltico*, p. 1-45.
- Perkins, S. W. 1999. Mechanical response of geosynthetic-reinforced flexible pavements. *Geosynthetics International*, Vol. 6 (5), pp. 347-382.
- Laurinavičius, A. & Oginskas, R. (2006). Experimental research on the development of rutting in asphalt concrete pavements reinforced with geosynthetic materials, *J. of Civil Eng. and Management*, 12, p. 311-317.
- Montestruque, G.; Rodrigues R.; Nods M. & Elsing A. (2004). Stop of reflective crack propagation with the use of PET geogrid as asphalt overlay reinforcement. In. *5<sup>th</sup> RILEM International Conference Cracking in Pavement*. Limoges, França, pp. 231-238.
- Siriwardane, H., Gondle, R., & Bora K. (2010). Analysis of Flexible Pavements Reinforced with Geogrids. *Geotechnical and Geological Eng.* 28, p. 287-297.
- Solaimanian, M. (2013). Evaluating Resistance of Hot Mix Asphalt to Reflective Crackin Using Geocomposites. Report No. PSU-2008-04. *The Mid-Atlantic Universities Transportation Center*, Springfield, VA, 36p.
- Wasage, T. L. J.; Ong, G. P.; Fwa T. F. & Tan, S. A. (2004). Laboratory evaluation of rutting resistance of geosynthetics reinforced asphalt pavement. *Journal of the Institution of Engineers, Singapore*. Vol. 44 Issue 2 2004, pp. 29-44