

Análise de um pavimento reforçado com geossintético a partir de resultados de ensaio em equipamento de grandes dimensões

Francis Massashi Kakuda¹, Alexandre Benetti Parreira² e Glauco Túlio Pessa Fabbri³

Resumo: O artigo analisa o benefício do uso de uma geogrelha como reforço da camada de base de um pavimento. Seções do pavimento e subleito com dimensões próximas às reais submetidas a carregamentos cíclicos foram ensaiadas numa caixa metálica quadrada com lado de 1,5 m e altura de 1,2 m. Concluiu-se que a utilização da geogrelha proporciona a redução de deformações elásticas e permanentes, e que a eficiência do reforço posicionado na interface com o subleito é maior que a do reforço posicionado no horizonte médio da base. Foram ainda determinados os módulos de resiliência da base e do subleito a partir da retroanálise das bacias de deflexões obtidas nos ensaios. Finalmente, a análise numérica de um pavimento hipotético mostrou que a geogrelha pode proporcionar uma extensão expressiva na vida de fadiga do revestimento asfáltico.

Palavras-chave: pavimentos reforçados com geossintéticos, geogrelha, ensaios de laboratório em verdadeira grandeza, deformações elásticas e plásticas sob carregamento cíclicos.

Abstract: The article analyzes the benefits of the application of a geogrid as base layer pavement reinforcement. Cyclic loaded full-scale sections of pavement and subgrade were tested in a square metallic box with 1.5 m width and 1.2 m height. It was concluded that the geogrid reduces the elastic and plastic deformations and also that positioning the reinforcing at subgrade interface is more efficient than at base medium horizon. The base and subgrade resilient modulus were obtained by back calculation using the deflection basin results from the tests. Finally, a numerical modeling of a hypothetical pavement showed that the geogrid may conduct to an expressive increase of the bituminous surface life.

Keywords: geosynthetic reinforced pavement, geogrid, full-scale laboratory tests, elastic and plastic deformation under cyclic loadings.

1. INTRODUÇÃO

Uma das tecnologias disponíveis para controlar ou reduzir a manifestação de patologias como trilhas de roda ou fadiga precoce do pavimento é a utilização de geossintéticos como elemento de reforço, em especial as geogrelhas, por apresentarem rigidez elevada. O geossintético contribui para a redução das espessuras exigidas para as camadas granulares e para o aumento da vida de serviço do pavimento.

A melhoria do desempenho do pavimento com a inserção de geossintéticos foi comprovada tanto em experimentos de laboratório como em experimentos em campo (Klein *et al.*, 2003; Hass *et al.*, 1988; Miura *et al.*, 1990, etc.). Resultados obtidos por estes autores indicam que os pavimentos reforçados apresentam vida ou período de projeto maior em comparação a seções similares não-reforçadas. No caso de bases granulares reforçadas com geossintético, os experimentos mostram para situações onde o subleito apresentava CBR inferior a 4%, a possibilidade de se reduzir a espessura da camada de base de 20% a 50%. Neste contexto, estudos devem ser desenvolvidos para que se avance no conhecimento do comportamento de estruturas de pavimentos reforçados com geossintéticos e seja possível estabelecerem-

se rotinas de projeto, que considerem o seu efeito estrutural, e novos procedimentos construtivos, contemplando os materiais, clima e tráfego das rodovias brasileiras.

No Brasil, à exceção de pesquisa desenvolvida por Silva (2009) na COPPE e do trabalho objeto do presente artigo, não têm sido observados experimentos voltados à análise dos mecanismos envolvidos no desempenho dos pavimentos a partir do ensaio em laboratório de seções com dimensões reais e carregadas em condições semelhantes às de campo.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar o benefício do uso de uma geogrelha como elemento de reforço da camada de base de uma estrutura de pavimento a partir de resultados de ensaios em laboratório de um modelo físico fiel às dimensões e às condições de carregamento observadas no campo. O efeito da geogrelha será determinado a partir da análise comparativa das deformações elásticas e permanentes observadas na estrutura não reforçada e em estruturas reforçadas com a geogrelha posicionada no horizonte médio ou na face inferior da camada de base. A partir da retroanálise das deflexões na superfície do pavimento serão também calculados os módulos de resiliência da camada de base e do subleito para as estruturas ensaiadas. E, finalmente, será analisado o efeito da utilização de uma geogrelha na fadiga da capa asfáltica de um pavimento hipotético.

3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado nos ensaios constitui-se de uma caixa metálica de seção quadrada de 1,5 m de lado, com 1,2 m de altura. O carregamento aplicado é pneumático e

¹ Francis Massashi Kakuda, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. (e-mail: francis.kakuda@gmail.com).

² Alexandre Benetti Parreira, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. (e-mail: parreira@usp.br).

³ Glauco Túlio Pessa Fabbri, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. (e-mail: glauco@sc.usp.br).



Figura 1. Vista geral do equipamento de ensaio

cíclico e transmitido à superfície da seção ensaiada por meio de uma placa metálica circular com 300 mm de diâmetro e 25,4 mm de espessura. Um elemento de borracha com 4mm de espessura foi instalado na face inferior da placa para torná-la semi-flexível e assim, aproximar as condições do experimento às condições de campo e também para evitar que ocorram rupturas no terreno sob o contorno da área carregada. A medida dos deslocamentos é obtida a partir da leitura de seis LVDTs dispostos em uma reta com origem no centro da placa e alinhados segundo a diagonal da caixa.

O sistema responsável pela geração do carregamento cíclico é composto de um cilindro pneumático de 300 mm de diâmetro alimentado por um compressor de 15 HP acoplado a duas válvulas reguladoras para o controle de pressão e vazão de entrada de ar, associadas em série a um reservatório auxiliar de 2l de capacidade, usado com a função de abreviar o tempo despendido para se alcançar o carregamento desejado durante a aplicação do pulso. Quando se utiliza a placa descrita anteriormente e são aplicadas cargas cíclicas de 40 kN, com duração de 1Hz, reproduz-se a condição preconizada para o ensaio 'Determinação das Deflexões Utilizando o Deflectômetro de Impacto Tipo *Falling Weight Deflectometer* – FWD', segundo a norma DNER-PRO 273/96. Nestas condições, é aplicada na superfície do pavimento uma tensão de 550 kPa. A Figura 1 apresenta uma

vista geral do equipamento, sendo que maiores detalhes do seu projeto, construção e funcionamento encontram-se em Kakuda *et al.*(2009).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

As seções de pavimento ensaiadas são compostas por subleito e base, com 20 e 50 cm de espessura, respectivamente, sem a utilização de capa, contando-se apenas com um tratamento superficial muito esbelto para se evitar a perda de umidade ao longo dos ensaios. Para a construção das seções, foram coletados dois solos, denominados Solo 1 e Solo 2, e uma brita. O Solo 1 foi utilizado como subleito, e o Solo 2, juntamente com a brita, foi utilizado para a composição de uma base do tipo solo-brita na proporção de 30%–70%.

As classificações dos solos segundo os sistemas S.U.C.S., H.R.B e MCT são respectivamente, para o Solo 1, A-4, CL e NS'; e para Solo 2, A-2-6, SC e LA'. O agregado usado foi submetido ao ensaio de Abrasão Los Angeles (DNER ME 035/94) e apresentou uma perda da ordem de 17%, valor inferior ao limite de 55% preconizado pela norma DNER ES 303/97 para materiais utilizados na construção de bases estabilizadas granulometricamente.

Os materiais usados no subleito e na base foram compactados nas energias normal e modificada do ensaio Proctor (DNER-ME 129/94), respectivamente. Também foram realizados ensaios para a determinação dos índices de suporte Califórnia (CBR) (DNER ME 049/94). Os resultados destes ensaios são apresentados na Tabela 1.

Nas seções reforçadas, foi usada uma geogrelha biaxial de filamentos de polipropileno (PP) com revestimento polimérico protetor de alta rigidez, modelo Fornit J600 (30/30) fabricada pela Empresa Huesker Ltda. A Tabela 2 apresenta as características da geogrelha segundo dados fornecidos pelo fabricante.

A Figura 2 apresenta um esquema das seções ensaiadas, considerando-se três diferentes configurações: pavimento sem reforço, condição de controle; pavimento com a geogrelha posicionada no horizonte médio da camada de base; e pavimento com a geogrelha posicionada na interface da base com o subleito.

Tabela 1. Resultados dos ensaios de compactação e CBR do subleito e da base

Material	Energia de Compactação	Aplicação	w_{ot} (%)	ρ_{dmax} (g/cm ²)	CBR na w_{ot} (%)
Solo	P. Normal	Subleito	25,7	1,459	8
Solo/brita	P. Modificado	Base	5,6	2,315	190

Tabela 2. Características da geogrelha Fornit J600 (30/30), conforme o fabricante

Características	Unidade	Método	Fornit J600 (30/30)
Gramatura	g/m ²	ASTM D5261	240
Abertura de malha direção longitudinal	mm	–	40
Abertura de malha direção transversal	mm	–	40
Resistência a 5% de deformação – direção longitudinal	kN/m	D 6637	24
Resistência a 5% de deformação – direção transversal	kN/m	D 6637	24
Tensão última – direção longitudinal	kN/m	D 6637	30
Tensão última – direção transversal	kN/m	D 6637	30
Deformação nominal na ruptura	%	ABNT 12824	≤10
Coefficiente de interação	kN/m	ASTM D 6706	≥0,95
Módulo de rigidez à tração nominal (à 2% de deformação)	kN/m	ABNT 12824	≥600

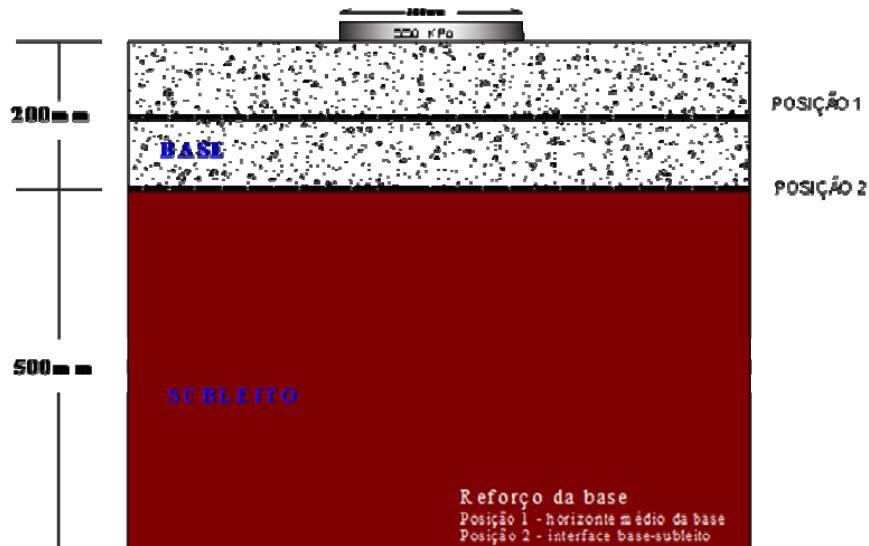


Figura 2. Configuração dos ensaios

5. ANÁLISES DOS RESULTADOS

5.1. Análise comparativa das deformações elásticas

As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, o desenvolvimento das deflexões determinadas sob a placa em função do número de aplicações e as bacias de deflexões ao final de 400.000 ciclos de carga, para ensaios sem e com a utilização da geogrelha. Destaca-se que para a medida dos deslocamentos elásticos sob a placa, foi feito um furo através da mesma, afastado de 7,5 cm do seu centro, de forma a possibilitar que o LVDT ali posicionado se apoie diretamente sobre a superfície da seção ensaiada.

Analisando-se a Figura 3 e comparando o desenvolvimento das deflexões máximas para as três configurações, observa-se que os padrões de variação para as condições sem reforço e com o reforço posicionado no centro da base são próximos entre si até 250.000 ciclos, a partir dos quais o uso da geogrelha conduz a uma pequena redução das deflexões. Para a geogrelha posicionada na interface com o subleito, a redução das deflexões é observada desde os ciclos iniciais de carga, sendo que esta coopera de maneira

mais expressiva para a redução das deflexões ao final do ensaio que a geogrelha posicionada no centro da base. Observa-se ainda que a estabilização das deflexões para o ensaio com a geogrelha na interface é alcançada com 250.000 ciclos, portanto, anteriormente à estabilização verificada para as duas outras configurações, que se dá para 330.000 ciclos. A conjugação do maior enrijecimento da estrutura do pavimento proporcionado pelo reforço na interface com o subleito com o fato do mesmo ser alcançado precocemente deverá cooperar para o aumento da vida útil do pavimento.

Na Figura 4, analisando-se as bacias de deflexões e considerando que as discrepâncias observadas nas distâncias de 30 e 40 cm sejam decorrentes dos valores dos deslocamentos envolvidos serem muito reduzidos, pode-se afirmar que a inserção de reforço não altera de maneira significativa o formato das mesmas. Assim, para se avaliar o efeito da inserção do reforço nas deflexões, serão comparados apenas os valores máximos observados sob a placa carregada, ou seja, 1,10, 1,03 e 0,90 mm, para as condições sem reforço, com o reforço posicionado no horizonte médio e na interface da base com o subleito, respectivamente.

Tomando-se a seção não reforçada como referência, con-

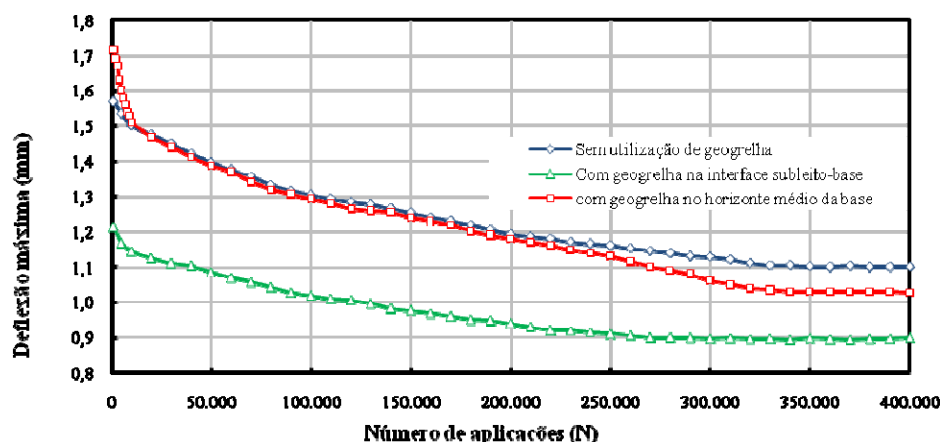


Figura 3. Deflexão sob a vertical do carregamento em função do número de ciclos de carga para estruturas sem e com reforço

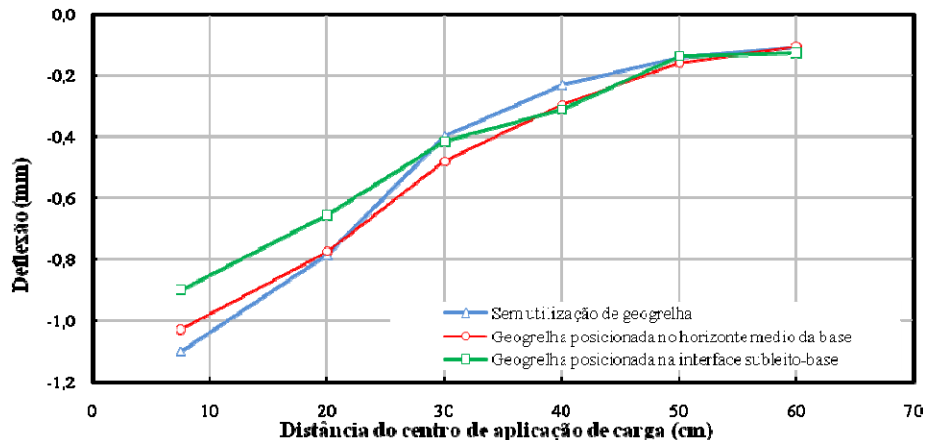


Figura 4. Bacias de deflexões após 400.000 ciclos de carga para estruturas sem e com reforço

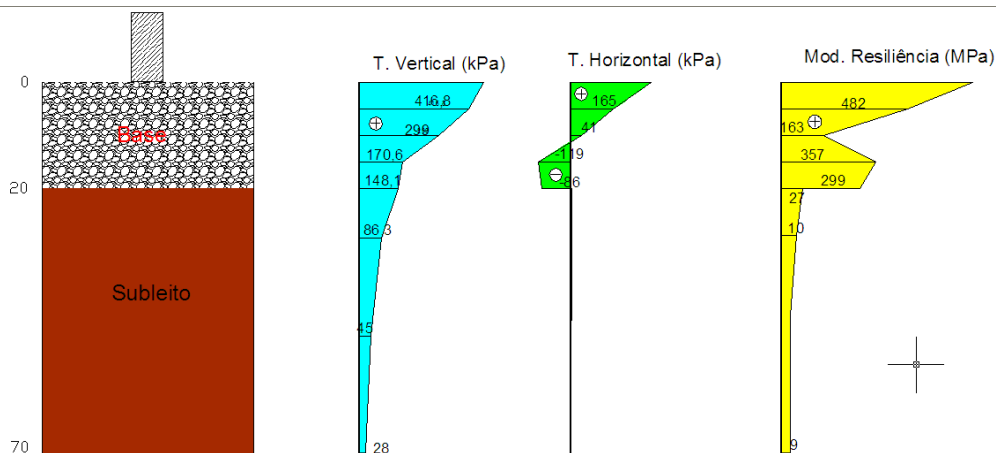


Figura 5. Variação das tensões e MR em função da profundidade

clui-se que a geogrelha posicionada no horizonte médio da camada de base conduz a uma redução da deflexão de 6%, valor pequeno se comparado aos 18% obtidos quando a geogrelha é posicionada na interface com o subleito. Para este último posicionamento, os benefícios observados por Don-di (1994), Kinney *et al.* (1998), Perkins (1999), situam-se no intervalo de 15 a 30%. Porém, é importante destacar, que apesar do benefício verificado na presente pesquisa situar-se no intervalo em questão, as magnitudes das deflexões obtidas por estes autores são da ordem de duas vezes mais elevadas. Na presente pesquisa, os valores menores das deflexões poderiam ser creditados ao fato de se ter utilizado como subleito um solo com comportamento superior aos dos utilizados nas pesquisas citadas.

Para complementar a análise das deflexões, calcularam-se os raios de curvatura para cada uma das bacias, segundo a Equação 1:

$$R = \frac{6250}{2 \cdot (D_0 - D_{25})} \quad (1)$$

em que,

R : raio de curvatura [m];

D_0 : deflexão máxima (0,01 mm); e

D_{25} : deflexão a 25 cm de distância do centro do carregamento (0,01 mm).

Os raios de curvatura obtidos foram de 62, 76 e 84 m para as seções ensaiadas sem reforço e com o reforço posicionado no horizonte médio da camada de base e na interface com o subleito, respectivamente. O efeito positivo da inserção do reforço é evidenciado pela sua contribuição para o aumento do raio de curvatura, com destaque para a condição em que o mesmo é posicionado na interface com o subleito, visto que menores raios são indicativos de arqueamentos mais severos, denotando condições estruturais mais críticas.

A maior contribuição para a redução das deformações elásticas para a geogrelha posicionada na interface com o subleito quando comparada com a geogrelha posicionada no centro da base seria decorrente das tensões horizontais no primeiro posicionamento serem de tração, condição ideal para a mobilização do reforço, enquanto que para o segundo posicionamento, as tensões horizontais são de compressão, conforme ilustra a Figura 5. O cálculo das tensões foi realizado a partir de uma análise no regime elástico com o Programa FEPAVE, sem se considerar a introdução de nenhum elemento equivalente ao reforço, e os valores de módulo de resiliência foram determinados usando o modelo composto calibrado a partir dos ensaios triaxiais cíclicos dos materiais.

A literatura relata experimentos realizados por Holtz *et al.* (1995) e Hass *et al.* (1988), a partir dos quais concluiu-se que para bases com espessuras inferiores a 25 cm, o efei-

to da geogrelha é maximizado quando instalada na interface com o subleito.

5.2. Análise comparativa das deformações permanentes

A Figura 6 apresenta o desenvolvimento dos recalques determinados sob a placa em função do número de aplicações da carga para ensaios sem e com a utilização da geogrelha.

Analisando-se a Figura 6, observa-se que as curvas apresentam formas semelhantes e que a estabilização dos recalques é alcançada após 300.000 ciclos de carga para as três configurações ensaiadas. Comparando-se os recalques ao final de 400.000 ciclos, 2 e 1mm, respectivamente para a condição sem e com reforço, conclui-se que a introdução do reforço, independente do seu posicionamento, proporciona uma redução das deformações permanentes de 50%. Entretanto, destaca-se que no terço inicial do ensaio, a geogrelha posicionada na interface com o subleito tem um maior efeito na redução dos recalques do que a geogrelha posicionada no horizonte médio da base.

Quando se comparam os benefícios do uso da geogrelha observados nesta pesquisa com os relatados na literatura, observa-se que o posicionamento do reforço no horizonte médio da camada de base só tem sido considerado para espessuras desta camada superiores a 30 cm (Collin *et al.*, 1996; Hass *et al.*, 1988; Webster, 1993). Assim os valores correspondentes a este posicionamento não puderam ser comparados com os da revisão bibliográfica.

Para o reforço na interface com o subleito e este elemento constituído de diferentes materiais, Miura *et al.* (1990), Holtz *et al.* (1995), Perkins (1999) e etc., determinaram taxas de redução no recalque variando de 50 a 250%. Semelhante ao ocorrido com as deflexões, apesar do benefício do uso do reforço verificado na presente pesquisa situar-se no intervalo em questão, as magnitudes dos recalques relatados por estes autores envolvem valores mais elevados. A discrepância observada poderia ser creditada novamente ao fato do subleito utilizado ser de melhor qualidade que os das pesquisas citadas, conforme já destacado anteriormente.

Quando são analisadas conjuntamente as deformações elásticas e permanentes para estruturas reforçadas e não reforçadas, conclui-se que o efeito positivo da introdução da geogrelha é maior no sentido da redução dos recalques do

que das deflexões, embora segundo este último aspecto, a avaliação de benefícios deva também incluir a análise da vida de fadiga de capas ou camadas cimentadas sobrepostas à estrutura de pavimento ensaiada. Quanto ao posicionamento do reforço, a sua instalação no horizonte médio da base ou no a interface com o subleito contribui igualmente para a redução das deformações permanentes. Entretanto, no tocante às deformações elásticas, a instalação do reforço na interface com o subleito tem efeito três vezes maior na redução das deflexões. Procurou-se uma explicação para o fato das deformações permanentes serem pouco afetadas pelo posicionamento, mas não foi possível identificar um mecanismo que o justificasse.

Finalmente, foram realizados ensaios complementares nos quais, para cada uma das três configurações, determinaram-se deflexões e recalques posteriormente à inundação do subleito, que ocasionou a diminuição de sua rigidez. Os resultados destes experimentos serão objeto de um próximo artigo, mas se pode adiantar que os resultados nesta condição aproximam-se muito dos relatados na literatura internacional e o benefício do uso do reforço é mais expressivo se comparado com o subleito na umidade ótima.

5.3. Análise dos módulos de resiliência obtidos a partir da retroanálise das bacias de deflexões

As bacias de deflexões obtidas ao final de 400.000 ciclos de carga para as três configurações ensaiadas foram retroanalisadas usando o programa desenvolvido pelo Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri em Plataforma LabView a partir do Programa ELSYM5, permitindo que se obtivessem os respectivos valores de módulo de resiliência do subleito e da base.

Para efeito de comparação, foram também determinados os módulos de resiliência da base e do subleito usando o modelo composto calibrado a partir dos ensaios triaxiais cíclicos de cada um dos materiais. Para o cálculo foi utilizado o Programa FEPAVE que incorpora o modelo em questão e o Programa ELSYM5, que por ser elástico linear, exigiu que se recorresse a um processo iterativo, em que as camadas foram subdivididas e a partir de valores de MR inicialmente assumidos, as respectivas tensões eram calculadas pelo programa. Estas tensões alimentavam o modelo composto e novos valores de MR eram determinados, e pa-

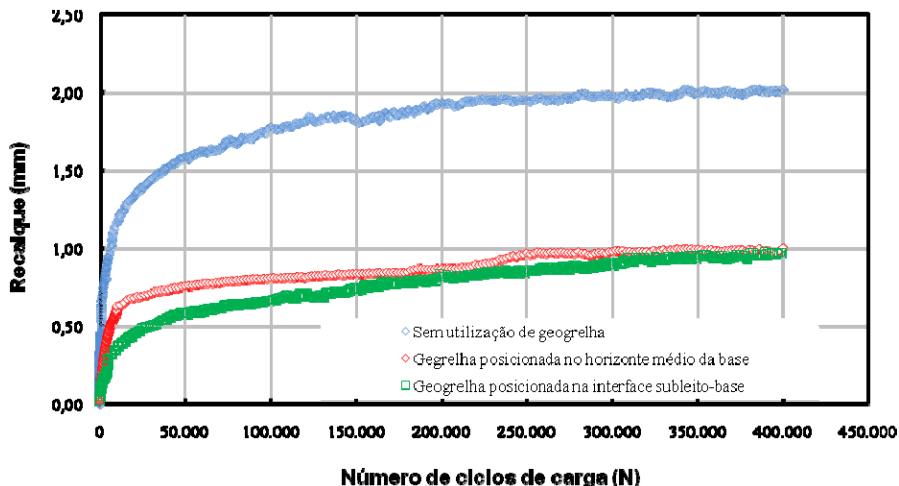


Figura 6. Recalque em função do número de ciclos de carga para estruturas sem e com reforço

ra estes valores, calculavam-se novamente as tensões em cada uma das subdivisões. Assim sucessivamente, até a convergência do processo.

A Tabela 3 apresenta para a base e o subleito, os valores médios dos módulos de resiliência obtidos para cada uma das camadas a partir do modelo composto com o auxílio dos dois programas computacionais e os valores dos módulos de resiliência obtidos pela retroanálise da bacia de deflexões para a configuração em que o reforço não foi utilizado, conforme apresentado na Figura 4.

Na Tabela 3, comparando-se os módulos de resiliência obtidos na retroanálise com os obtidos a partir dos resultados dos ensaios triaxiais cíclicos, observa-se que para a ba-

Tabela 3. Módulos de resiliência obtidos a partir do modelo composto e na retroanálise da bacia de deflexões para a configuração sem reforço

	Módulo de Resiliência		
	Ensaio sem a utilização de geogrelha		
	<i>Ensaio triaxial cíclico (MPa)</i>		<i>Retroanálise</i>
	FEPAVE	ELSYM5	(MPa)
Base	325	233	280
Subleito	18	20	37

se, o valor de 280MPa insere-se no intervalo delimitado pelos valores calculados usando os programas FEPAVE e ELSYM5, 325 e 233MPa, respectivamente. Para o subleito, o valor da retroanálise, 37MPa, é superior aos determinados a partir do modelo composto, 18 e 20MPa, valores muito próximos entre si.

Pode-se considerar que existe uma boa concordância entre os resultados da retroanálise e os determinados a partir dos ensaios triaxiais e que a maior discrepância observada para o subleito seja decorrente de sua baixa rigidez. Neste caso, os erros absolutos associados ao ensaio podem ser relativamente elevados se comparados à pequena magnitude do módulo do subleito.

Para efeito de comparação, a Tabela 4 apresenta os módulos de resiliência da base e do subleito obtidos na retroanálise das bacias de deflexões correspondentes aos ensaios realizados sem a utilização de geogrelha e com a geogrelha posicionada no horizonte médio da base e no interface com o subleito, conforme apresentado na Figura 4.

Analisando-se a Tabela 4, observa-se que os módulos da camada de base dos ensaios com geogrelha apresentaram valores superiores ao determinado sem a utilização do reforço. Esse fato indica que a inserção da geogrelha é equivalente ao enrijecimento da camada de base. Quando se

Tabela 4. Módulos de resiliência obtidos a partir da retroanálise das bacias de deflexões dos ensaios com e sem reforço

	Módulo de resiliência (MPa)		
	<i>Sem utilização de geogrelha</i>	<i>Geogrelha no horizonte médio da base</i>	<i>Geogrelha na interface com o subleito</i>
Base	280	390	490
Subleito	37	30	30

Tabela 5. Diferença entre as tensões de compressão e tração na capa e o número de aplicações de carga para se atingir a ruptura para os ensaios sem e com a utilização da geogrelha

	$\Delta\sigma$ (MPa)	N
Sem geogrelha	22,3	1,3x106
Geogrelha no horizonte médio da base	16,1	6,2x106
Geogrelha na interface subleito-base	12,4	2,2x107

comparam os valores de módulo de resiliência obtidos para os dois posicionamentos da geogrelha, o enrijecimento decorrente do uso do reforço na interface com o subleito é maior que quando posicionado no horizonte médio da camada de base. Observa-se ainda que existe uma pequena redução do módulo de resiliência do subleito quando a geogrelha é utilizada. Essa redução seria decorrente do enrijecimento da base minimizar as tensões que chegam ao subleito.

5.4. Estudo do efeito do uso do reforço na fadiga da capa asfáltica de uma estrutura de pavimento hipotética

Para ilustrar o efeito da inserção da geogrelha como elemento de reforço da base de um pavimento, foram avaliadas a vida de fadiga da capa asfáltica de uma estrutura hipotética para as configurações sem reforço e com o reforço posicionado no horizonte médio da base e na interface com o subleito. Para essa aplicação assumiu-se um pavimento constituído de uma capa asfáltica de 4cm de espessura apoiada sobre uma seção similar à ensaiada e avaliou-se o número de ciclos de carregamento necessários para a ruptura do revestimento para cada uma das três configurações ensaiadas. Para a determinação das tensões, foi utilizado o Programa ELSYM5 considerando-se os módulos de resiliência determinados na retroanálise, conforme os valores apresentados na Tabela 4. Adotou-se ainda, para o cálculo da fadiga na capa, a Equação 2, apresentada por Furlan *et al.* (2007) apud Iwanaga (2007), para uma mistura de agregado de basalto e CAP20 com adição de cal.

$$N = 6 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{4,78} \quad (2)$$

em que,

N: número de ciclos de carregamento para fadiga do revestimento; e

$\Delta\sigma$: diferença entre as tensões de compressão e tração (MPa) na fibra inferior da capa.

A Tabela 5 apresenta os valores de $\Delta\sigma$ obtidos a partir do Programa ELSYM5 e os valores de N para os ensaios sem geogrelha e com a geogrelha posicionada no horizonte médio da base e na interface com o subleito, determinados segunda a Equação 2.

Comparando-se os valores de N apresentados na Tabela 5, verifica-se que a geogrelha posicionada no horizonte médio da camada de base proporcionou uma extensão da

vida de fadiga da capa de cinco vezes se considerada a estrutura sem reforço, e na interface com o subleito, este aumento é de dezessete vezes, repercutindo o maior enrijecimento alcançado para esta configuração. É importante ressaltar, que este resultado é exploratório e deve ser visto com cautela e assim, os valores determinados não devem ser extrapolados para condições de campo sem um maior aprofundamento dos estudos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da revisão bibliográfica e dos resultados obtidos nesta pesquisa permitiram as seguintes conclusões:

A utilização de geogrelha no reforço da camada de base proporciona a redução de deformações elásticas e permanentes observadas na superfície da seção ensaiada. Em geral, o posicionamento da geogrelha na interface com o subleito é o que mais contribui para a redução das deformações. Acredita-se que o fato seja decorrente das tensões horizontais ali observadas serem de tração, condição para a mobilização do reforço e ainda a sua contribuição ao evitar o cravamento do agregado no subleito.

As reduções relativas das deformações elásticas e plásticas decorrentes do uso do reforço determinadas na pesquisa são compatíveis com as relatadas na bibliografia. Entretanto, os valores das deflexões e recalques observados são inferiores aos verificados nas pesquisas internacionais. Presume-se, que isto se deva ao melhor comportamento mecânico do solo utilizado como subleito, se comparado aos solos utilizados com tal fim nas pesquisas desenvolvidas no exterior.

A retroanálise das bacias de deflexões permitiu avaliar-se os módulos de resiliência da camada de base e do subleito, sendo que os valores determinados para a configuração sem reforço são compatíveis com os obtidos a partir dos ensaios triaxiais cíclicos dos materiais. Quando são comparados os módulos de resiliência obtidos sem reforço e com reforço, pode-se concluir que a utilização do reforço seria equivalente ao enrijecimento da base, sendo este efeito mais destacado para a geogrelha posicionada na interface com o subleito.

A análise numérica de um pavimento hipotético em que se analisou o efeito do reforço na ruptura por fadiga da capa asfáltica, mostrou que a geogrelha posicionada no horizonte médio da camada de base ou na sua interface com o subleito, proporciona uma extensão de cinco e dezessete vezes, respectivamente, na vida de fadiga do revestimento.

Finalmente, é importante destacar que estas conclusões restringem-se aos materiais e às condições dos ensaios realizados, sendo ainda necessário um aprofundamento dos estudos realizados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo auxílio à pesquisa que possibilitou a construção do equipamento, à CAPES pela bolsa de doutorado do primeiro autor e à empresa Huesker Ltda pelo apoio e fornecimento da geogrelha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (1999) *Designation: T307-99 Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soil and Aggregate Materials*. American Association of State Highway Transportation Officials, Washington.

- Collin, J. C.; T. C. Kinney; e X. Fu (1996) Full-scale highway load test of flexible pavement systems with geogrid reinforced base courses. *Geosynthetics International*, v. 3, p. 537–549.
- DNER-ME 035/94 (1994) *Agregado - Abrasão "Los Angeles"*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER-ES 303/97 (1997) *Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER-PRO 273/96 (1996) *Determinação das Deflexões Utilizando o Deflectômetro de Impacto Tipo Falling Weight Deflectometer – FWD*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER ME 049/94 (1994) *Solos-determinação do índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER-ME 129/94 (1994) *Solos-compactação utilizando amostras não trabalhadas*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- Dondi, G. (1994) Three-dimensional finite element analysis of a reinforced paved road. In: *Proc. of the V International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products – Cingapura*, v. 1, p. 95–100.
- Furlan, A. P.; F. Iwanaga; G. T. P. Fabbri e A. C. Gigante (2007) Influência do modo de preparo e do tipo de filer nas propriedades de misturas asfálticas densas. *XXI ANPET Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes*. Rio de Janeiro-RJ.
- Hass, R.; J. Walls e R. G. Carroll (1988) Geogrid reinforcement of granular bases in flexible pavement. *Transportation Research Record 1188*, Transportation Research Board, p. 19–27.
- Holtz, D.; B. R. Christopher e R. R. Berg (1995) *Geosynthetic design and construction guidelines*. Report No FHWA-A-HI-95, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute Course n. 13213, Washington DC, EUA.
- Iwanaga, F. I. (2007) *Avaliação da influencia do tipo de agregado, do tipo de ligante, do tipo de moldagem e do tipo de filer na vida de fadiga de mistura asfáltica densa*. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos-SP.
- Kakuda, F. M.; A. B. Parreira e G. T. Fabbri (2009) Desenvolvimento de um equipamento de grandes dimensões para análise de estruturas de pavimento. *XXIII ANPET Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes*. Vitória-ES.
- Kim, W. H.; T. B. Edil; C. H. Benson e B. F. Tanyu (2005) Structural contribution of geosynthetic-reinforced working platforms in flexible pavement. *Transportation Research Record 1936*. Transportation Research Board, p. 43–50.
- Kinney, T. C.; D. K. Stone e J. Schuler (1998) Using geogrids for base reinforcement as measured by falling weight deflectometer in full-scale laboratory study. *Transportation Research Record 1611*. Transportation Research Board, p. 70–77.
- Leng, J. e M. A. Gabr (2002) Characteristics of geogrid-reinforced aggregate under cyclic load. *Transportation Research Record 1786*. Transportation Research Board.
- Leng, J. e M. A. Gabr (2007) Deformation-resistance model for geogrid-reinforced unpaved road. *Transportation Research Record 1975*. Transportation Research Board.
- Miura, N.; A. Sakai; Y. Taesiri; T. Yamanouchi e K. Yasuhara (1990) Polymer grid reinforced pavement on soft clay grounds. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 9.
- NBR 7182 (1986) *Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Perkins, S. W. (1999) Mechanical response of geosynthetic-reinforced flexible pavement. *Geosynthetic International*, v. 6.
- Silva, B. A. (2009). *Análise mecânica de um pavimento rodoviário submetido à oscilação do lençol freático sumulada em modelo físico de verdadeira grandeza*. Tese (doutorado). COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.
- Tingle, J. S. e S. R. Jersey (2005) Cyclic plate load testing of geosynthetic-reinforced unbound aggregate roads. *Transportation Research Record 1936*. Transportation Research Board.
- Webster, S. L. (1993) *Geogrid reinforced base course for flexible pavement for light Aircraft, test section construction behavior under traffic, laboratory tests, and design criteri* Army Corps Engineering, Vicksburg Mississippi, USA.