

USO DE GEOSINTÉTICOS COMO REFORÇO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADASDoi:<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p546-557/2016>**LORENA A. OLIVEIRA¹, PAULO M. F. VIANA², DIVINA C. R. SANTOS³,
ELTON F. REIS⁴**

RESUMO: O trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento de estradas não pavimentadas construídas sobre solos moles reforçadas com diferentes geossintéticos. Foram selecionadas três estradas não pavimentadas que apresentassem um trecho com baixa capacidade de suporte de carga. A flecha foi medida pelo método fotográfico para cada número de passadas, nas condições com e sem reforço, e submetido à análise de variância, pelo teste de F, a 5% de probabilidade, e quando houve diferença significativa entre os tratamentos, suas médias foram comparadas pelo teste de Tukey. Posteriormente, realizou-se o cálculo da razão de benefício de tráfego fornecida pela inclusão do reforço. O geossintético não tecido, quando inserido no interior do solo, contribuiu de modo significativo para a redução das flechas, principalmente nos solos do trecho das estradas I e III. O geossintético tecido contribuiu para a redução das flechas, principalmente nos solos do trecho da estrada III. A geogrelha não contribuiu para a redução das flechas. A razão de benefício de tráfego para os reforços utilizados foram superiores a um, com valores médios de 1,28 para o trecho da estrada I, reforçado com geossintético não tecido, 1,54 para o trecho da estrada II, reforçado com geossintético tecido e de 2,7 para o trecho da estrada III, reforçado com geossintético tecido.

PALAVRAS-CHAVE: capacidade de suporte de carga, trilha de roda, simulador de tráfego.

PERFORMANCE OF GEOSYNTHETICS AS REINFORCEMENT IN UNPAVED ROADS

ABSTRACT: The objective of this study was to evaluate the performance of unpaved roads built on soft soils reinforced with different geosynthetic materials. We selected three sections of unpaved roads with low load-bearing capacity. Vertical displacement (rut depth) was visually measured (photographs) for each number of passes on soils with and without reinforcement. The data underwent variance analysis by the F-test at 5% probability; when significant, means were compared by the Tukey's test. Subsequently, we calculated traffic benefit ratio (TBR) or improvement factor due to the use of each reinforcement material. Non-woven geosynthetic materials reduced significantly the rut depths, mainly within the road sections I and III; by contrast, geosynthetic woven materials contributed in road section III. Moreover, geogrid use had no contribution to rut depth reductions. The TBR by using the reinforcements studied here showed values higher than one, with averages of 1.28 for road section I reinforced with geosynthetic nonwoven material, 1.54 for road section II reinforced with geosynthetic woven material, and 2.7 for road section III reinforced with geosynthetic woven.

KEY WORDS: load-bearing capacity, wheel track, traffic simulator.

INTRODUÇÃO

O Brasil enfrenta grandes problemas para o escoamento de sua produção, pois o modal utilizado neste caso é o rodoviário, cujas vias estão em estado precário de conservação, o que acaba

¹ Eng^o Agrícola, Prof^a. Mestre em Engenharia Agrícola, Doutoranda Universidade Federal de Goiás/Goiânia, GO, Fone: (62) 3328-1156, eng.lorena.oliveira@hotmail.com

² Eng^o Civil, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás/Anápolis, GO, pmfviana@gmail.com

³ Eng^o Agrônoma, Mestre em Engenharia Agrícola, Doutoranda Universidade de Brasília/Brasília, DF, cleiadvina@hotmail.com

⁴ Eng^o Agrícola, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Goiás/Anápolis, GO, fialhoreis@ueg.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 11/09/2013

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 21/08/2015

contribuindo para o desperdício e o aumento de encargos sobre o produto final (CORREA & RAMOS, 2010).

O defeito do tipo trilha de roda pode ser originado pela deformação permanente do subleito ou da camada de revestimento, e ocorre em função da baixa capacidade de suporte de carga ou quando a drenagem é deficiente. O defeito tem interferência sobre o nível de serventia da estrada, pode levar à retenção de água sobre a pista, sem contar o desconforto da viagem (OLIVEIRA et al., 2013).

Apesar da grande extensão, a distribuição entre rodovias pavimentadas e não pavimentadas é desigual. Segundo o Boletim Estatístico de março de 2015, o Brasil tem 1.720.643 km de rodovias. Apenas 12,24% das rodovias brasileiras são pavimentadas, o que equivale a 210.618 km (CNT, 2015).

Desde 1970, os geossintéticos têm sido utilizados para a estabilização do subleito e reforço de aterros para a construção de estradas não pavimentadas. Normalmente, este material é colocado entre a camada de aterro (reforço do subleito) e o subleito, suportando maiores cargas e intensidade de tráfego. Além disso, a capacidade de reforço do geossintético pode viabilizar a utilização de material de aterro de menor qualidade, o que implica redução de custos e benefícios ambientais (GÓNGORA & PALMEIRA, 2012).

O emprego de geossintéticos em estradas não pavimentadas vem sendo estudado por diferentes autores, como ABU-FARSAKH & CHEN (2011), PERKINS et al. (2012), YANG et al. (2012), SUN et al. (2015) e BHANDARI et al. (2015). Porém, ainda não há uma metodologia de ensaio padronizada para avaliar o uso desse reforço em solos.

Os geossintéticos (sintéticos ou naturais), como os geotêxteis, geogrelhas, geomantas e geodrenos, são desenvolvidos para utilização em obras geotécnicas, desempenhando uma ou mais funções, entre as quais se destacam: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial. Estes materiais representam alternativas de fácil e rápida execução na obra, podendo ser soluções mais econômicas e ambientalmente corretas que as soluções tradicionais (COSTA et al., 2008).

O principal indicador que quantifica a melhoria do desempenho da estrada com a inclusão do geossintético é a razão de benefício de tráfego, definida pelo número de repetições do eixo-padrão ou de simuladores de tráfego de laboratório que produz determinada trilha de roda na estrada reforçada com geossintético, dividido ao número de repetições do eixo-padrão que produz o mesmo afundamento de roda na estrada, sem o geossintético, conforme PERKINS (1999), PALMEIRA & ANTUNES (2010) e HAN et al. (2011).

O objetivo do trabalho foi avaliar o comportamento de estradas não pavimentadas construídas sobre solos moles reforçadas com diferentes geossintéticos, por meio da flecha (trilha de roda) e da razão de benefício de tráfego.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionadas 3 estradas não pavimentadas, localizadas no município de Anápolis-GO, para definir o trecho de retirada da amostra de solo, sendo realizada uma avaliação subjetiva com relação à sensação de conforto e de suavidade ao trafegar pela via (DNIT, 2003). Quando verificado baixa sensação de conforto, identificavam-se as coordenadas desse ponto por meio de GPS e retirava-se uma amostra indeformada, evitando o local das trilhas de roda, em uma profundidade de 0,30 m.

Para a retirada das amostras indeformadas, fez-se uma escavação, com dimensões superiores ao do amostrador cilíndrico (cilindro usado para realizar o ensaio Índice de Suporte Califórnia – CBR). Com o auxílio de uma espátula, o solo foi moldado até atingir as dimensões do amostrador cilíndrico, sendo essas amostras levadas para o laboratório onde o ensaio de ISC ou CBR foi realizado segundo a norma NBR 9895 (ABNT, 1987).

O trecho de cada estrada com CBR menor que 10% foi escolhido e obtidas suas coordenadas geográficas 16°20' S e 48°50' W (estrada I), 16°27' S e 48°56' W (estrada II) e 16°21' S e 48°48' W (estrada III).

Foram realizados os ensaios de caracterização física do solo: análise granulométrica, massa específica dos sólidos, umidade, massa específica, limite de liquidez e limite de plasticidade (EMBRAPA, 2011) e o ensaio de Proctor normal, norma NBR 7182 (ABNT, 1986). A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas (com defloculante) de cada trecho de estrada avaliado. Segundo a classificação TRB (Transportation Research Board), o Trecho I é um A-7 (argiloso plástico), e os Trechos II e III são A-4 que incluem o grupo dos solos siltosos de baixa plasticidade (DAS, 2011).

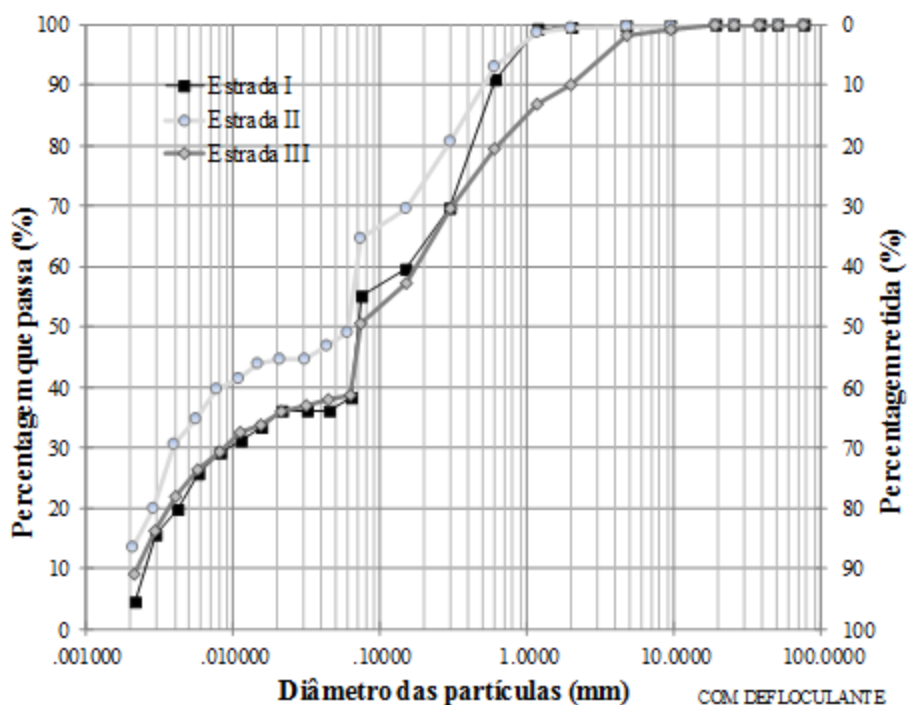


FIGURA 1. Curvas granulométricas de cada trecho das estradas avaliadas. **Grain size distribution curves of each evaluated road section.**

Os valores médios dos ensaios de caracterização física dos solos são apresentados na Tabela 1, onde foram realizadas triplicatas para cada ensaio.

TABELA 1. Caracterização física dos solos nos trechos das estradas avaliadas. **Soil physical characterization in the evaluated road sections.**

Propriedades	Estrada I	Estrada II	Estrada III
Umidade - (w - %)	24,7	18,3	21,4
Massa específica real dos grãos - (ρ - kN m^{-3})	26,9	27,0	27,4
Massa específica aparente seca - (ρ_d - t m^{-3})	1,1	1,3	1,2
Porosidade total - (η - %)	52,9	50,5	57,9
Limite de liquidez - (LL - %)	42,8	33,8	39,6
Limite de Plasticidade - (LP - %)	31,9	26,4	29,6
Massa específica aparente seca máxima - ($\rho_{\text{máx}}$ t m^{-3})	1,6	1,7	1,5
Umidade ótima de compactação - (w_{otm} - %)	23,5	18,4	28,0
Grau de Compactação - (GC - %)*	73,7	75,9	81,1

*Ensaio de Proctor normal.

O subleito foi reforçado com três tipos de geossintéticos: GNT - geossintético não tecido agulhado produzido com fios de poliéster; GT - geossintético tecido produzido a partir do entrelaçamento em ângulo reto de laminetes de polipropileno; e GG - geogrelha feita a partir de elevado peso molecular, construída com fios de poliéster com múltiplos filamentos (Figura 2). A resistência longitudinal à tração e a espessura do elemento são, respectivamente, de 14 kN m^{-1} e $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ para o GNT, 25 kN m^{-1} e $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ para o GT e $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ e 25 kN m^{-1} para a GG.



FIGURA 2. Geossintéticos utilizados: a) Geossintético não tecido; b) Geossintético tecido; e c) Geogrelha. **Geosynthetic materials: a) nonwoven b) woven, and c) geogrid.**

O efeito dos diferentes níveis de tráfego do pneu a partir da flecha (trilha de roda), em condição laboratorial, foi realizado utilizando um simulador linear de tráfego, conforme Figura 3a.

A pressão aplicada pelo simulador de tráfego foi a pressão média de contato do pneu de um caminhão bitrem, que é o mais utilizado para transportar a safra agrícola. O caminhão utilizado foi carregado com a capacidade máxima, de forma que cada eixo traseiro estava com 17 toneladas, cada eixo tinha oito rodas, resultando em uma carga por roda de aproximadamente 20,80 kN. Para medir a área de contato, pintou o pneu com um spray e colocou uma cartolina embaixo, registrando-se a área de contato por fotografia digital. Subtraíram-se as superfícies dos sulcos da banda de rodagem do valor da área de contato. Portanto, a área medida constitui o valor líquido da interface pneu/solo. O pneu, com pressão de inflagem de aproximadamente 90 psi (620,0 kPa), apresentou área média de $0,0831 \text{ m}^2$. A pressão média de contato do pneu foi ($P_m = 250,30 \text{ kPa}$).

A diferença entre o simulador linear de tráfego e um veículo qualquer está basicamente na escala e na forma como a carga é aplicada ao solo. Para medir a área de contato do pneu do simulador de tráfego, foi polvilhado gesso em pó em toda a área em volta do pneu, preocupando-se em preencher todos os espaços vazios entre as ranhuras do pneu. Em seguida, descarregou-se a pressão do macaco hidráulico na roda, tomando o cuidado para não danificar o desenho produzido pelo rodado no solo. A área de contato foi registrada por fotografia digital, obtida perpendicularmente ao solo. As imagens foram analisadas, utilizando-se do software AutoCad 2007, após a correção da escala (COUTO et al., 2013), (Figura 3b).

A pressão média de contato para o simulador, com a pressão de insuflagem do pneu de 60 psi (413,68 kPa), foi de 255,72 kPa, aproximadamente 80% da pressão de contato do pneu do caminhão bitrem. A carga aplicada pelo macaco hidráulico foi controlada por uma célula de carga de 5 kN, posicionada entre o macaco hidráulico e a plataforma onde foram colocadas as amostras de solo. Utilizou-se de um sistema de aquisição de dados, modelo CR 800, fabricado pela Campbell Scientific Ltd. para conectar a célula de carga, e as leituras foram realizadas utilizando o Software PC 400 versão 1.5.

No rodado do simulador, foi utilizado um pneu Levorin, tube type, 4.80/4.00-8, carretilha, capacidade de carga B e carga máxima de 435 kg, 70 lbs poF^2 a frio. No simulador linear, o tráfego foi simulado pela repetição da carga aplicada por uma roda submetida ao esforço vertical, com movimento longitudinal sobre o corpo de prova (Figura 3a).

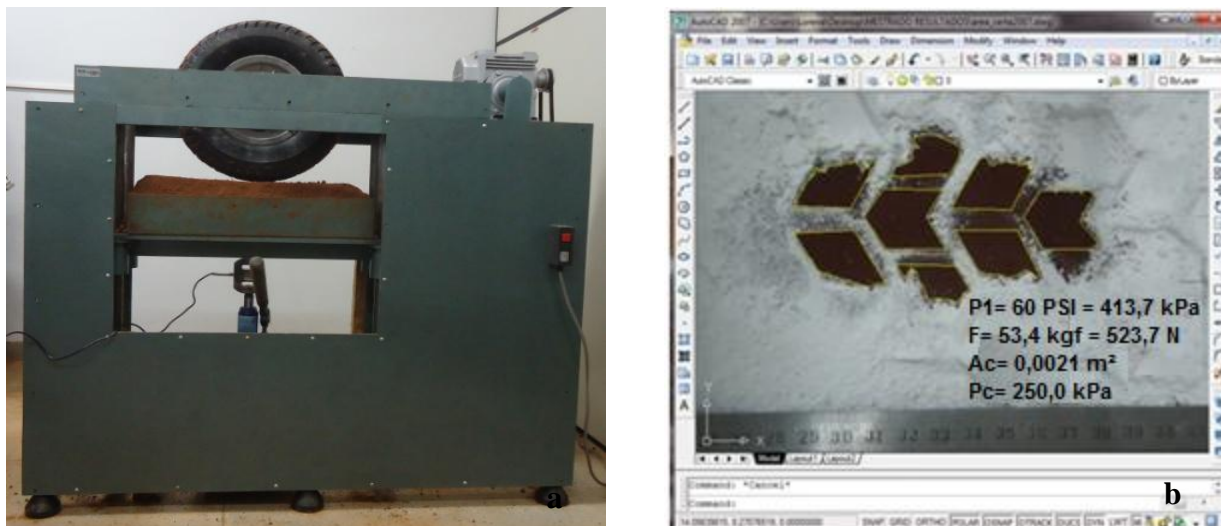


FIGURA 3. a) Vista frontal do simulador linear de tráfego. b) Área de contato do pneu do simulador. a) **Traffic simulator front view.** b) **Tire simulator contact area.**

Um teste inicial mostrou que essa amostra de solo reforçada no laboratório suportava, em média, 60 ciclos, ou seja, 120 passadas do simulador de tráfego linear. A partir deste valor, foi determinado o número de passadas para as amostras (2; 8; 20; 36; 60 e 100).

Para moldar as amostras, foram separadas duas bandejas com solo: em uma, adicionou-se água até que o mesmo ficasse próximo da umidade de saturação ($S=100\%$), e na segunda bandeja adicionou-se água até chegar à umidade ótima de compactação de cada solo, e a amostra foi moldada com dimensões de 0,40 x 0,20 x 0,16 m (comprimento, largura e altura), em uma caixa de metal.

Os primeiros 0,10 m de altura da caixa de metal foram preenchidos com solo saturado de forma a retirar o ar (subleito). Colocou-se o geossintético e compactou-se a base (0,06 m de altura), dividindo-a em três camadas, sendo cada camada compactada com o auxílio da máquina Universal de Ensaio, modelo WDW-100E de 100 kN de capacidade.

Para medir a flecha, foi utilizado um perfilômetro constituído de 30 hastes espaçadas de 0,010 m, acoplada a uma estrutura retangular de aço. O método utilizado para a leitura das flechas, desenvolvido na superfície do solo, foi o fotográfico utilizado por COUTO et al. (2013).

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial $3 \times 4 \times 6$, sendo uma amostra de solo para cada trecho (estrada I, estrada II e estrada III), 4 tipos de reforço (sem reforço (SG), geossintético tecido (GT), geossintético não tecido (GNT) e geogrelha (GG)), e 6 passadas do simulador linear de tráfego (2; 8; 20; 36; 60 e 100), com três repetições. A variável flecha (transformada em $\log x$) foi submetida à análise de variância, pelo teste de F, a 5% de probabilidade, e quando houve diferença significativa entre os tratamentos, suas médias foram comparadas pelo teste de Tukey, utilizando-se do programa SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2011).

Posteriormente, realizou-se uma análise descritiva por meio de gráficos de flecha, em função do número de passadas, mostrando o comportamento em cada solo; e por meio da equação de ajuste, foi calculado o número de passadas que produz a mesma flecha para o solo reforçado e sem reforço, sendo possível determinar a razão de benefício de tráfego (RBT).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da análise de variância mostrou que a variável flecha sofreu influência da estrada com o tipo de geossintético, mostrando a necessidade de avaliar desdobramento das variáveis. Para análise das variáveis qualitativas (trechos das estradas e tipos de reforço), foi utilizado o teste de média para comparação, Tabela 2; já para o número de passadas, foi utilizada a análise de regressão.

A influência da geogrelha nas flechas nos trechos de estrada I, II e III, não é significativa devido à pequena contribuição do reforço na rigidez do sistema. Justifica-se pelo fato de a abertura da malha da grelha ser superior a 4 mm (maior dimensão das partículas do solo), o que diminui a mobilização e redistribuição das tensões, corroborando GÓNGORA (2015).

A influência do geossintético não tecido é significativa nos trechos das estradas I e III, solos mais finos e deformáveis; na estrada II, os solos são mais grossos e menos deformáveis. Justifica-se o fato de o geossintético não tecido ser mais rígido que o solo, o que contribui para o aumento da rigidez relativa do sistema. Como a abertura dos vazios da manta do reforço é inferior às das partículas do solo, o geossintético não tecido funciona também como elemento separador na interface do solo reforçado, contribuindo para a redistribuição das tensões, sendo este fenômeno chamado de “arqueamento do solo”, por DEB (2010) e SADREKARIMI & ABBASNEJAD (2010).

A influência do geossintético tecido não é significativa nos trechos das estradas I e II. No trecho da estrada I, apesar de a rigidez do reforço ser superior à do solo e a superfície ter vazios inferiores aos das partículas do solo, o efeito do confinamento (ancoragem) foi menos intenso nas bordas, o que pode ter contribuído para aumentar os deslocamentos relativos da interface solo-reforço e redução do efeito do arqueamento. No trecho da estrada II, considerando o solo mais arenoso e menos deformável, o efeito da redução da flecha é ainda menos perceptível. Entretanto, na estrada III, o efeito da ancoragem na região de interação solo-reforço é mais intenso (solo menos plástico $IP < 10$), o que certamente contribuiu para o resultado significativo.

TABELA 2. Desdobramento dos geossintéticos dentro de cada trecho de estrada analisado.
Statistical breakdown of the geosynthetics within each section analyzed.

Geossintéticos	Estrada I	Estrada II	Estrada III
SG	9,58 ab	7,39 a	9,51 a
GNT	7,18 c	6,38 a	6,61 b
GT	8,68 bc	6,93 a	5,43 b
GG	11,25 a	6,81 a	7,30 ab

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($P > 0,05$).

As curvas de flecha, pelo número de passadas do simulador de tráfego para o trecho da estrada I com os diferentes geossintéticos utilizados, são apresentadas na Figura 4. Pode-se observar que a utilização do geossintético não tecido contribui na redução da flecha, a partir de 20 passadas; já o geossintético tecido contribuiu para a redução da flecha, a partir de 50 passadas, com um aumento ainda maior a partir de 60 passadas; já a geogrelha não contribuiu como reforço, e praticamente não houve alteração no estado de tensões com sua utilização, comparado à não utilização do geossintético.

Com um número abaixo de 40 passadas, a flecha foi maior para o reforço com geossintético tecido do que sem reforço, isso pode ter acontecido devido às imperfeições iniciais provocados pela interação solo-reforço. Neste caso, o sistema não apresenta resultados efetivos nas primeiras passadas.

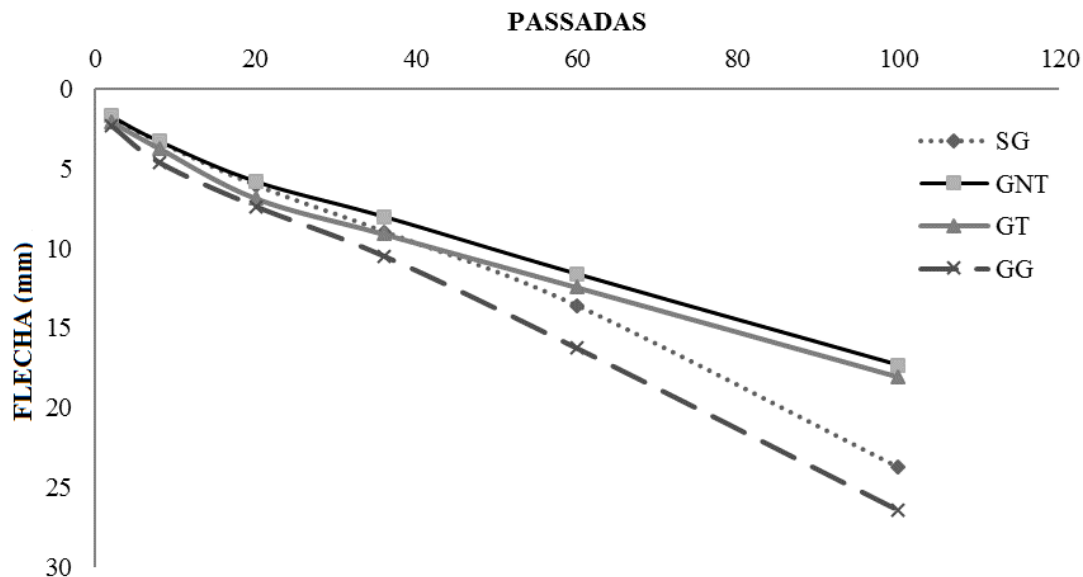


FIGURA 4. Flecha em função do número de passadas para o trecho da estrada I, sem geossintético (SG), com geossintético não tecido (GNT), com geossintético tecido (GT) e com geogrelha (GG). **Rut depth due to the number of passes within road section I without geosynthetic material (SG), with geosynthetic nonwoven material (GNT), with geosynthetic woven material (GT) and with geogrid (GG).**

A partir dos valores das flechas obtidos para as diferentes passadas do simulador de tráfego linear, realizou-se o ajuste gerando as equações nas diferentes condições de uso, conforme Tabela 3. As equações lineares foram as que explicaram os modelos ajustados de maneira satisfatória. Quanto maior o R², mais explicativo é o modelo, melhor ele se ajusta à amostra. Os ajustes abaixo estão muito próximos de 1, mostrando que os ajustes representam bem cada situação. Todas as equações podem ser utilizadas de maneira satisfatória como modelo para estimar as diferentes flechas para reforço em estradas não pavimentadas.

TABELA 3. Modelos ajustados para a flecha na estrada I, sem geossintético (SG), com geotêxtil não tecido (GNT), geotêxtil tecido (GT) e geogrelha (GG). **Rut depth fitted models for road section I without geosynthetic material (SG), with geosynthetic nonwoven material (GNT), with geosynthetic woven material (GT) and with geogrid (GG).**

Tratamento	Equação ajustada	R ²
SG	$y = 0,2180x + 1,3671$	0,9961
GNT	$y = 0,1559x + 2,0558$	0,9935
GT	$y = 0,1583x + 2,7217$	0,9840
GG	$y = 0,2401x + 2,2076$	0,9979

Com as equações ajustadas, pode-se calcular o número de passadas necessárias para o mesmo valor de flecha da situação sem reforço, para então calcular a razão de benefício de tráfego, que está apresentada na Tabela 4. Com poucas passadas, não há benefício de tráfego, e o mesmo aumenta com o aumento do número de passadas. Segundo GÓNGORA (2015), o reforço geossintético empregado nas estradas não pavimentadas simuladas contribui para aumentar o número de repetições de carga suportado pela estrada, sendo que em condições reais poderá resultar em aumento da vida útil da estrada.

Observe que o valor da razão de benefício de tráfego foi de até 1,36, o que é expressivo considerando que as estradas são obras lineares. Este efeito deve-se principalmente ao espraiamento das tensões, e com tensões menores atuando sobre o reforço, as flechas diminuem. Considerando

estradas de baixo volume de tráfego (número de passadas menor que 200), os ensaios mostram valores para a razão de benefício de tráfego maior que um para todas as inclusões (Tabelas 4; 6 e 8), apresentando geralmente melhor custo benefício, conforme LA THA et al. (2010).

PALMEIRA & ANTUNES (2010), HAN et al. (2011) e GÓNGORA & PALMEIRA (2012) também mostraram que há uma razão de benefício ao utilizar um reforço, mostrando que o solo reforçado necessita de um número maior de ciclos para alcançar o mesmo valor de flecha do solo, sem reforço. A geogrelha não apresentou razão de benefício de tráfego.

TABELA 4. Razão de benefício de tráfego para a estrada I, sem geossintético (SG), com geotêxtil não tecido (GNT), geotêxtil tecido (GT) e geogrelha(GG). **Traffic benefit ratio (TBR) for road section I without geosynthetic material (SG), with geosynthetic nonwoven material (GNT), with geosynthetic woven material (GT) and with geogrid (GG).**

Flecha (mm)	Número de Passadas (SG)	Número de Passadas (GNT)	Razão de benefício de tráfego (GNT)	Número de Passadas (GT)	Razão de benefício de tráfego (GT)	Número de Passadas (GG)	Razão de benefício de tráfego (GG)
1,84	2	1	-	-	-	-	-
3,35	9	8	-	4	-	5	-
6,05	21	26	1,19	21	-	16	-
8,95	35	44	1,27	39	1,13	28	-
13,58	56	74	1,32	69	1,22	47	-
23,70	102	139	1,36	133	1,29	90	-

As curvas de flecha pelo número de passadas do simulador de tráfego para o trecho da estrada II, com os diferentes geossintéticos utilizados, são apresentadas na Figura 5. Em alguns pontos o solo reforçado sofre maior deformação, o que pode estar relacionado à pequena interação promovida pela inclusão do reforço sob a camada de subleito, conforme observado por BHANDARI & HAN (2010) e GÓNGORA (2015).

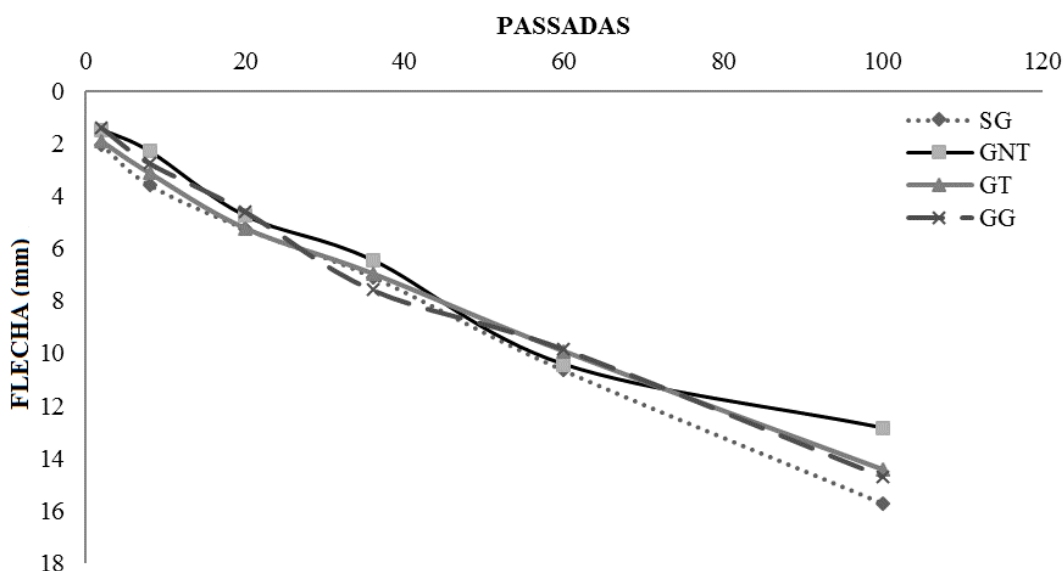


FIGURA 5. Flechas em função do número de passadas para o trecho da estrada II, sem geossintético (SG), com geossintético não tecido (GNT), com geossintético tecido (GT) e com geogrelha (GG). **Rut depth due to the number of passes within road section II without geosynthetic material (SG), with geosynthetic nonwoven material (GNT), with geosynthetic woven material (GT) and with geogrid (GG).**

A partir dos dados, realizou-se um ajuste gerando as equações para o cálculo de cada situação (Tabela 5), e as equações lineares foram as que explicaram os modelos ajustados de maneira satisfatória, com os ajustes representando bem cada situação.

TABELA 5. Modelos ajustados para a Flecha, para estrada II, sem geossintético (SG), com geotêxtil não tecido (GNT), geotêxtil tecido (GT) e geogrelha (GG). **Rut depth fitted models for road section II without geosynthetic material (SG), with geosynthetic nonwoven material (GNT), with geosynthetic woven material (GT) and with geogrid (GG).**

Tratamento	Equação ajustada	R ²
SG	$y = 0,1362x + 2,2560$	0,9966
GNT	$y = 0,1194x + 1,8871$	0,9619
GT	$y = 0,1248x + 2,2337$	0,9930
GG	$y = 0,1331x + 1,8006$	0,9866

A Tabela 6 mostra que, com poucas passadas, não há benefício de tráfego, e o mesmo aumenta com o aumento do número de passadas. Observe que o valor de razão de benefício de tráfego para esse tipo de solo aumentou, chegando a até 1,74 para o solo reforçado com geossintético tecido. Isso mostra que o reforço pode ser mais eficiente, dependendo do tipo de solo. Para que os solos reforçados alcancem o mesmo valor de flecha que o solo sem reforço, a partir dos modelos, é necessário um maior número de passadas, o que evidencia a razão de benefício de tráfego com uso do geossintético, mas em menor quantidade do que no trecho da estrada I. Segundo GIROUD & HAN (2004), o efeito membrana faz com que as solicitações de tráfego sejam mais bem suportadas após significativos afundamentos por trilhas de rodas quando o tráfego é canalizado.

TABELA 6. Razão de benefício de tráfego para a estrada II, sem geossintético (SG), com geotêxtil não tecido (GNT), geotêxtil tecido (GT) e geogrelha (GG). **Traffic benefit ratio (TBR) for road section II without geosynthetic material (SG), with geosynthetic nonwoven material (GNT), with geosynthetic woven material (GT) and with geogrid (GG).**

Flecha (mm)	Número de Passadas (SG)	Número de Passadas (GNT)	Razão de benefício de tráfego (GNT)	Número de Passadas (GT)	Razão de benefício de tráfego (GT)	Número de Passadas (GG)	Razão de benefício de tráfego (GG)
2,40	2	5	2,50	-	-	-	-
3,58	10	15	1,50	-	-	12	1,20
5,25	22	29	1,32	31	1,41	32	1,45
7,09	36	44	1,22	54	1,50	54	1,50
10,65	62	74	1,19	91	1,47	89	1,44
15,71	99	116	1,17	172	1,74	165	1,67

As curvas de flecha pelo número de passadas do simulador de tráfego para o trecho da estrada III, com os diferentes geossintéticos utilizados, são apresentadas na Figura 6. Pode-se observar que a utilização de qualquer reforço, para esse solo do trecho da estrada III, mostra diminuição na flecha. A interação solo-reforço é alta, mostrando que o sistema é efetivo desde o início do tráfego do simulador. Nessa situação, mesmo a malha da geogrelha possuindo uma área efetiva menor, não diminuiu a mobilização e redistribuição das tensões no solo. O solo reforçado com geossintético tecido apresentou menor flecha mesmo com poucas passadas, evidenciando boa interação, o que também foi observado por GÓNGORA (2015).

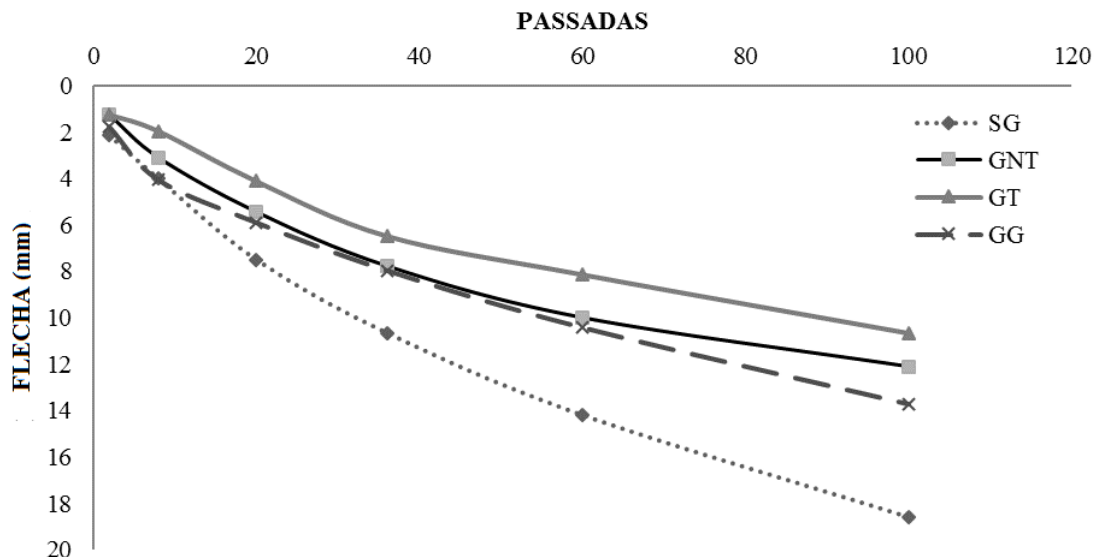


FIGURA 6. Flecha em função do número de passadas para o trecho da estrada III, sem geossintético (SG), com geossintético não tecido (GNT), com geossintético tecido (GT) e com geogrelha (GG). **Rut depth due to the number of passes within road section III without geosynthetic material (SG), with geosynthetic nonwoven material (GNT), with geosynthetic woven material (GT) and with geogrid (GG).**

A partir dos dados, realizou-se um ajuste gerando as equações para cada situação, conforme Tabela 7. O R^2 foi próximo a um, mostrando que os ajustes representam bem cada situação. O modelo para os trechos das estradas I e II foram lineares, já para o trecho da estrada III foi modelo de potência, e isso pode ser explicado porque a interação solo-reforço depende de algumas propriedades do solo, como granulometria e densidade.

TABELA 7. Modelos ajustados para a Flecha na estrada III sem geossintético (SG), com geotêxtil não tecido (GNT), geotêxtil tecido (GT) e geogrelha (GG). **Rut depth fitted models for road section III without geosynthetic material (SG), with geosynthetic nonwoven material (GNT), with geosynthetic woven material (GT) and with geogrid (GG).**

Tratamento	Equação ajustada	R^2
SG	$y = 1,3683x^{0,5664}$	0,9955
GNT	$y = 0,8841x^{0,5891}$	0,9646
GT	$y = 0,7295x^{0,5827}$	0,9781
GG	$y = 1,2772x^{0,5152}$	0,9967

A razão de benefício de tráfego para o trecho da estrada 3, utilizando diferentes geossintéticos, está apresentada na Tabela 8. Para a relação desse solo com os reforços, há benefício de tráfego mesmo com baixo número de passadas, e os valores de razão de benefício de tráfego são maiores que os resultados alcançados para os trechos da estrada I e da estrada II, mostrando que, dependendo do tipo de solo, a interação solo-reforço apresenta maior eficiência.

Observe que o valor de razão de benefício de tráfego para esse tipo de solo aumentou, chegando a até 2,59 para o reforço com geossintético tecido. Esse resultado corrobora PALMEIRA & ANTUNES (2010) e HAN et al. (2011), que ao utilizar o geossintético como reforço, verificaram razão de benefício de tráfego acima de 2,3 e 0,4, respectivamente.

TABELA 8. Razão de benefício de tráfego para a estrada III, sem geossintético (SG), com geotêxtil não tecido (GNT), geotêxtil tecido (GT) e geogrelha (GG). **Traffic benefit ratio (TBR) for road section III without geosynthetic material (SG), with geosynthetic nonwoven material (GNT), with geosynthetic woven material (GT) and with geogrid (GG).**

Flecha (mm)	Número de Passadas (SG)	Número de Passadas (GNT)	Razão de benefício de tráfego (GNT)	Número de Passadas (GT)	Razão de benefício de tráfego (GT)	Número de Passadas (GG)	Razão de benefício de tráfego (GG)
2,14	2	5	2,50	6	3,00	3	1,50
4,00	7	13	1,86	19	2,71	9	1,29
7,50	20	38	1,90	55	2,75	31	1,55
10,65	38	68	1,79	99	2,61	61	1,61
14,19	62	111	1,79	163	2,63	107	1,73
18,59	100	176	1,76	259	2,59	181	1,81

CONCLUSÕES

O geossintético não tecido contribuiu de modo significativo para a redução das flechas nos trechos das estradas I e III, o geossintético tecido contribuiu no trecho da estrada III e a geogrelha não contribuiu para a redução das flechas.

A razão de benefício de tráfego para os reforços utilizados foi superior a um, com valores médios de 1,28 para o trecho da estrada I reforçado com geossintético não tecido, 1,54 para o trecho da estrada II reforçado com geossintético tecido e de 2,7 para o trecho da estrada III reforçado com geossintético tecido.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7182*: solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9895*: solo - Índice de suporte Califórnia - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.
- ABU-FARSAKH, M.Y.; CHEN, Q. Evaluation of geogrid base reinforcement in flexible pavement using cyclic plate load testing. *International Journal of Pavement Engineering*, Philadelphia, v.12, n.3, p.275-288, 2011.
- BHANDARI, A.; HAN, J. Investigation of geotextile-soil interaction under a cyclic vertical load using the discrete element method. *Geotextiles and Geomembranes*, London, v.28, n.1, p.33-43, 2010.
- BHANDARI, A.; HAN, J. PARSONS, R.L. Two-dimensional DEM analysis of behavior of geogrid-reinforced uniform granular bases under a vertical cyclic load. *Acta Geotechnica*, Berlin, v.10, n.4, p.469-480, 2015.
- CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. *Boletim Estatístico Abril 2015*. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/Boletins_Detalhes.aspx?b=3>. Acesso em: 18 jun. 2015.
- CORREA, V.H.C.; RAMOS, P. A Precariedade do Transporte Rodoviário Brasileiro para o escoamento da Produção de Soja do Centro-Oeste: situação e perspectivas. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Piracicaba, v.48, n.2, p.447-472, 2010.
- COSTA, C.M.L.; LODI, P.C.; COSTA, Y.D.J; BUENO, B.S. Avaliação de recomendações normativas sobre o uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos, v.18, n.2, p.158-169, 2008.

- COUTO, R.F.; REIS, E.F.; VIANA, P.M.F.; HOLTZ, V.; OLIVEIRA, L.A.; ALVES, S.M.F. Compactação e recalque superficial de um Latossolo Vermelho em condição de campo e laboratório. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 17, n.11, p.1239-1245, 2013.
- DAS, B.M. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. São Paulo: Editora Cengage Learning, 2011.
- DEB, K. A mathematical model to study the soil arching effect in stone column-supported embankment resting on soft foundation soil. *Applied Mathematical Modelling*, New York, v.34, n. 12, p.3871-3883, 2010.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. *Norma DNIT 009/2003 PRO: avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2003.
- EMBRAPA SOLOS. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.
- FERREIRA, D.F. SISVAR: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- GIROUD, J.; HAN, J. Design method for Geogrid-Reinforced unpaved roads. I. Development of Design Method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v. 130, n. 8, p. 775-786, 2004.
- GÓNGORA, I.A.G. *Estradas não Pavimentadas Reforçadas com Geossintéticos: Influência de Propriedades Físicas e Mecânicas do Reforço*. 2015. 115 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- GÓNGORA, I.A.G.; PALMEIRA, E.M. Influence of fill and geogrid characteristics on the performance of unpaved roads on weak subgrades. *Geosynthetics International*, St. Paul, v. 19, n.2, p.191-199, 2012.
- HAN, J.; ZHANG, Y.; PARSONS, R.L. Quantifying the Influence of Geosynthetics on Performance of Reinforced Granular Bases in Laboratory. *Geotechnical Engineering Journal*, Bangkok, v.42, n. 1, p. 1-10, 2011.
- LATHA, G.M.; ASHA M.N.; HEMALATHA, M.S. Performance of geosynthetics in unpaved roads. *International Journal of Geotechnical Engineering*, London, v.4, n.3, p.337-349, 2010.
- OLIVEIRA, R.J.; MACHADO, C.C.; CORDEIRO, S.A; LEITE, H. G.; SILVA, J.V. Análise de Processo Hierárquico para Gerir as Estradas Florestais. *Floresta e Ambiente*, Seropédica, v.20, n. 1, p.38-44, 2013.
- PALMEIRA, E.M.; ANTUNES, L.G.S. Large Scale Tests on Geosynthetic Reinforced Unpaved Roads Subjected to Surface Maintenance. *Geotextiles and Geomembranes*, Barking, v.28, n.6, p.547-558, 2010.
- PERKINS, S.; CHRISTOPHER, B.; LACINA, B.; KLOMPMAKER, J. Mechanistic-empirical modeling of geosynthetic-reinforced unpaved roads. *International Journal of Geomechanics*, Boca Raton, v.12, n.4, p.370-380, 2012.
- PERKINS, S. Mechanical response of geosynthetic-reinforced flexible pavements. *Geosynthetics International*, St. Paul, v.6, n.5, p. 347-382, 1999.
- SADREKARIMI, J.; ABBASNEJAD, A. Arching effect in fine sand due to base yielding. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, v.47, n. 3, p.366-374, 2010.
- SUN, X.; HAN, J.; KNON, J.; PARSONS, R.L.; WAYNE, M.H. Radial stresses and resilient deformations of geogrid-stabilized unpaved roads under cyclic plate loading tests. *Geotextiles and Geomembranes*, Barking, v.43, n.5, p.440-449, 2015.
- YANG, X.; HAN, J.; POKHAREL, S.K.; MANANDHAR, C.; PARSONS, R.L.; LESHEHINSKY, D.; HALAHMI, I. Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocell-reinforced sand bases. *Geotextiles and Geomembranes*, Barking, v.32, p.95-103, 2012.