



SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ENSAIOS DE CARGAS CÍCLICAS PARA UMA SEÇÃO NÃO PAVIMENTADA COM REFORÇO DE GEOGRELHA

Gabriel Orquizas Mattiello Pedroso

gabpedroso@hotmail.com

Doutorando na Universidade de São Paulo

Rua Trabalhador São-Carlense, 400, 13566-590, Parque Arnold Schmidt, São Carlos, Brasil.

Jefferson Lins da Silva

jefferson@sc.usp.br

Professor na Universidade de São Paulo

Rua Trabalhador São-Carlense, 400, 13566-590, Parque Arnold Schmidt, São Carlos, Brasil.

Abstract.

A existência de subleitos de baixa capacidade de suporte em estradas não pavimentadas demandam técnicas construtivas para melhorar seu desempenho estrutural. Atualmente, a utilização de geossintéticos como reforço entre a base e o subleito contribui para aumentar a vida útil ou reduzir a espessura da base para o mesmo número de repetições de carga. Neste trabalho foi desenvolvido um método de elementos finitos (MEF) com a finalidade de validar ensaios de cargas cíclicas e avaliar as tensões e deformações ao longo da profundidade de cada configuração testada, a fim de, verificar os benefícios do uso da geogrelha como reforço no meio da base e na interface base/subleito. Para tal, comparou-se o modelo elasto-plástico desenvolvido no programa de elementos finitos, e a teoria de sistemas de camadas elásticas (TSCE). Os resultados das análises numéricas mostraram que o modelo elástico-plástico forneceu previsões mais realistas da deflexão, deformações laterais, e tensões verticais, em comparação ao linear elástico. Além disso, as análises em MEF revelaram que a posição mais eficiente para a geogrelha foi na interface entre a base e o subleito, mostrando que o reforço reduz a deformação da superfície e melhora a distribuição da tensão vertical nas camadas inferiores.

Keywords: *Geossintético, Simulação numérica, Elementos finitos.*

1 INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O aumento no volume de tráfego e custo dos materiais ocasionam diversos problemas nas estradas pavimentadas ou não. Desta forma, torna-se fundamental o desenvolvimento de métodos alternativos para a sua construção e reabilitação. Desde as últimas décadas uma destas alternativas é a aplicação de geossintéticos com o objetivo de garantir maior estabilidade. Como exemplo, cita-se o reforço com geogrelhas que são utilizadas em conjunto com os agregados da base para melhorar o desempenho da camada de base flexível.

Diversos estudos foram realizados em caixas de grandes dimensões simulando as condições reais de um pavimento. No âmbito internacional, destacam-se os trabalhos de Perkins (1999) e Siriwardane *et al.* (2010), e no nacional Antunes (2008); Kakuda (2010); Góngora (2011) e Miranda (2013). Estes trabalhos mostraram que a geogrelha aumenta a rigidez e a estabilidade da base, além de reduzir as deformações permanentes da estrutura. De acordo com Perkins e Ismeik (1997), a melhoria fornecida pelo reforço no desempenho de pavimentos é atribuída a dois mecanismos descritos abaixo e apresentados na Fig. 1:

- *Restrição lateral dos deslocamentos*: a interação entre o agregado da base e o geossintético permite a transferência dos esforços de tração da base para o geossintético. Ou seja, evita o deslocamento horizontal do material, mantendo seu confinamento.
- *Efeito membrana*: os geossintéticos assumem um formato de membrana tensionada quando estão sobre carregamento vertical perpendicular ao seu plano. As tensões desenvolvidas no geossintético contribuem para o suporte das cargas e reduzem os esforços verticais no subleito. Entretanto, são necessárias altas deformações para mobilizar essa resistência.

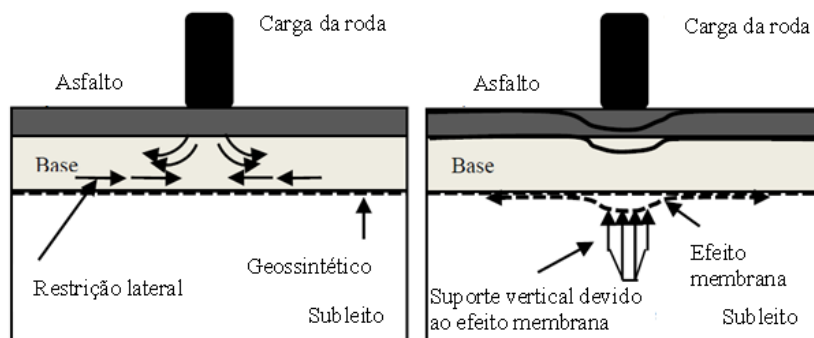


Figura 1. Funções de reforço dos geossintéticos em pavimentos (PERKINS; ISMEIK, 1997).

Apesar da melhoria proporcionada pela aplicação das geogrelhas em pavimentos os projetistas ainda cogitam uma certa insegurança. Para Christopher *et al.* (2001) isto ocorre, pois, há uma falta de conhecimento detalhado dos mecanismos pelos quais os geossintéticos fornecem reforço; as informações de custo-benefício não foram estabelecidas; e as soluções de projeto aceitáveis não estão disponíveis. Além disso, a ausência de metodologias adequadas limita o uso do geossintético em estradas, tanto nas empreiteiras, como em agências estatais de alto nível.

A otimização do método de dimensionamento mecanístico-empírico (M-E) é uma das soluções para estas limitações. No Brasil, foi desenvolvido o programa SisPav para cálculo de tensões e deformações (Franco, 2007), e na atualização do DER SP (2006) foi acrescentado este método. Neste contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de modelos mecanicistas e procedimentos de projetos mecânicos para avaliar os benefícios que a inclusão dos geossintéticos em pavimentos flexíveis proporciona.

Em relação ao desenvolvimento destes modelos mecanicistas, Balbo (2007) adverte que para uma análise consistente, deve-se considerar a compatibilidade entre os modelos tensão e deformação, e constitutivo com os problemas analisados. E além disso é essencial que exista a calibração experimental para os modelos de desempenho.

Diversos estudos numéricos foram realizados para analisar as seções de pavimento e melhorias proporcionada pela aplicação do geossintético: Kwon *et al.* (2009); Perkins *et al.* (2009); Leng & Gabr (2005) e Calvarano *et al.* (2017). A maioria destes estudos foram elaborados utilizando o método de elementos finitos (MEF) através dos programas ABAQUS ou PLAXIS, com o objetivo de identificar os requisitos de geometria e material da estrutura do pavimento, possibilitando desta forma, o máximo aproveitamento dos benefícios proporcionados pelo uso de geossintéticos como reforço.

Com base nos conceitos levantados, este artigo tem por objetivo principal desenvolver a simulação numérica dos ensaios realizados por Kakuda (2010). Como objetivos específicos citam-se: *i)* determinar a geometria adequada para garantir a eficiência da geogrelha; e *ii)* elaborar um modelo numérico mecânico para auxiliar o desenvolvimento de um modelo de desempenho de pavimentos reforçados com geogrelha.

2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A simulação (3D) se caracteriza como uma das melhores formas de analisar o comportamento da estrada não pavimentada. Entretanto, devido ao carregamento cíclico, esta simulação demandaria muito tempo e portanto limitaria a possibilidade de rodar múltiplos casos. Cho *et al.* (2000) mostraram que o uso de método de elementos finitos em duas dimensões é uma alternativa eficaz para os problemas apresentados e garante a precisão necessária. Assim sendo, optou-se por uma simulação (2D) axissimétrico de elementos finitos desenvolvido no programa ABAQUS.

A simulação numérica adotado possui geometria idêntica aos protótipos ensaiados por Kakuda (2010), ou seja, 750 mm de largura por 700 mm de altura, sendo que esta altura é composta de 500 mm de solo argiloso que representa o subleito e 200 mm de solo-brita que compõe a base. Foram desenvolvidos modelos numérico com a utilização do reforço e sem o reforço, ou seja, analisou-se três configurações: *i)* sem geogrelha; *ii)* com geogrelha na interface base/subleito; e *iii)* com geogrelha disposta no meio da base.

Adotou-se como condições de contorno, um suporte fixo no fundo da caixa restringindo o movimento horizontal e vertical ($U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$), e nas bordas restringiu-se o movimento na horizontal ($U_1=UR_2=UR_3=0$).

Por se tratar de um modelo axissimétrico, o carregamento foi representado como circular e adotou-se um raio de 150 mm a partir do eixo de simetria. Baseado nos ensaios realizados por Kakuda (2010), adotou-se um carregamento cíclico com amplitude de 40 kN (resultando em uma pressão de 550 kPa); frequência igual a 1.0 Hertz com duração do pulso de 1 segundo; e 1000 ciclos de repetição de carga (N_{ciclos}).

Os materiais modelados no ABAQUS foram base, subleito e geossintético. Os dois primeiros foram modelados como elementos *solid homogeneous* e o geossintético como *continuum shell* com espessura de 30 mm. As malhas utilizadas foram primeiramente com elementos globais de tamanho “10”, e em seguida foi realizado o refinamento próximo ao carregamento e o elemento de geossintético. A Fig. 2 representa o modelo utilizado.

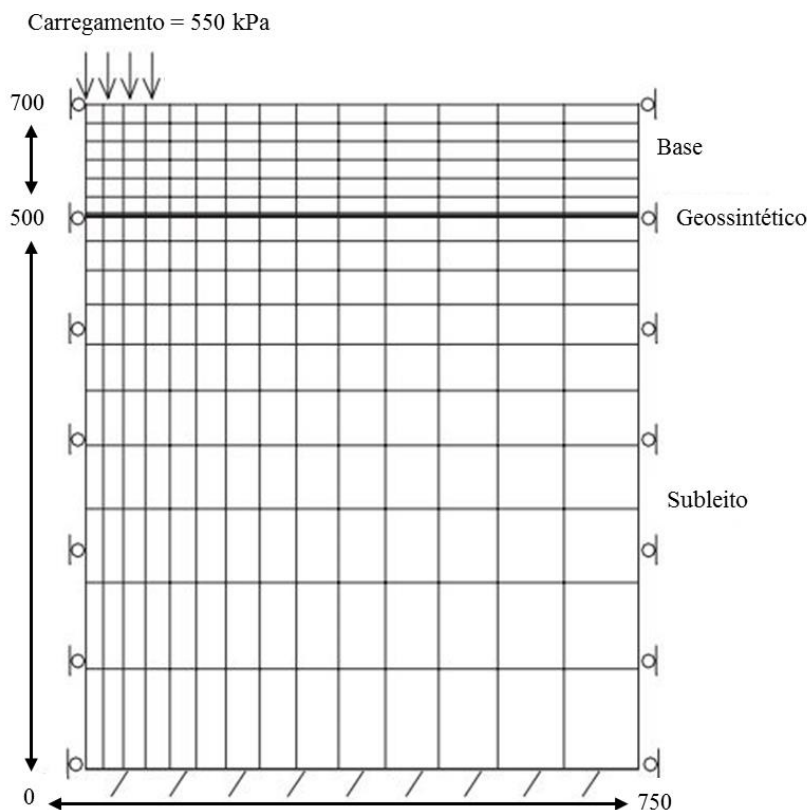


Figura 2. Modelo axissimétrico.

2.1 Modelo constitutivo dos materiais

As cargas de tráfego ocasionam grandes deformações nas estruturas não pavimentadas devido ao comportamento elástico-plástico das camadas de base e subleito. Wathugala *et al.* (1996), realizaram simulações numéricas de um pavimento flexível com reforço de geossintético através de modelos lineares elásticos, e concluíram que os valores obtidos de tensões e deformações foram irrealistas, além de subestimar o uso do reforço com geossintético. Portanto, é fundamental utilizar modelos constitutivos que simulem materiais sobre grandes deformações (CALVARANO *et al.*, 2017).

Para simular o comportamento não linear dos materiais, utilizou-se o modelo Drucker-Prager extendido com critério de ruptura hiperbólico, disponível no programa ABAQUS. O

critério de ruptura hiperbólico é uma combinação contínua de um *cut-off* para baixos níveis de confinamento e uma condição linear para altos níveis de confinamento (Leng & Gabr, 2005), assim como representado na Fig. 3. O critério de ruptura é expressado pela Eq. (1):

$$F = \sqrt{(d'_0 - p_{t0} \tan \beta)^2 + q^2} - p \tan \beta - d' \quad (1)$$

Em que, p e q são tensões invariantes; p_{t0} é a pressão hidrostática inicial do material; d'_0 é o valor inicial de d' (parâmetro relacionado ao endurecimento das tensões); e β é a inclinação da superfície de escoamento no plano p - q (relacionado ao ângulo de atrito do material).

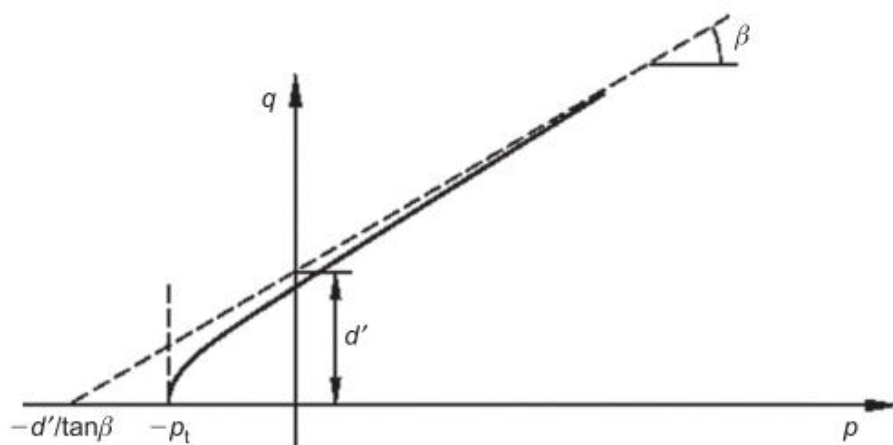


Figura 3. Critério de ruptura hiperbólico do modelo Drucker-Prager extendido (Leng & Gabr, 2005).

Utilizou-se o modelo constitutivo elástico-plástico isotrópico para os três materiais que constituem o modelo: base, subleito e geossintético. O modelo plástico com critério de ruptura hiperbólico Drucker-Prager extendido foi utilizado para a base e subleito. E o geossintético foi modelado como um material normal elástico-plástico. Os parâmetros adotados estão listados na Tabela 1. Os parâmetros adotados no modelo Drucker-Prager, correspondem aos parâmetro $\phi = 40^\circ$ e $c = 30$ kPa da base; e $\phi = 24^\circ$ e $c = 10$ kPa do subleito.

Tabela 1. Parâmetros dos materiais utilizados nas análises.

Material	Modelo	γ (g/cm ³)	E (MPa)	ν	Tensão de escoamento (kPa)
Drucker-Prager					
Base	B = 40°, $p_{t0} = 20$ kPa, $\psi = 10^\circ$	2.63	280	0.4	150
Drucker-Prager					
Subleito	B = 24°, $p_{t0} = 10$ kPa, $\psi = 0^\circ$	2.66	37	0.35	50
Geogrelha	Elástico-plástico	-	250	0.3	-

O valor do módulo de 300 MPa adotado para o geossintético foi baseado na Eq. (2):

$$E_{\text{geossintético}} = J/t \quad (2)$$

Em que, J representa a rigidez do geossintético = 750 kN/m; e t a espessura do material = 30 mm.

3 RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA

O método de elementos finitos utilizado neste artigo tem a finalidade de comparar as bacias de deflexões obtidas numericamente com as dos ensaios de compressão cíclica realizados por Kakuda (2010). Além disso, tal método busca avaliar as tensões e deformações ao longo das camadas do pavimento, com o intuito de verificar os benefícios do uso da geogrelha como reforço no meio da base e na interface base/subleito.

As análises foram realizadas para as três configurações: *i)* sem geogrelha; *ii)* geogrelha na interface base/subleito; e *iii)* geogrelha no meio da base. Para tal, comparou-se os resultados dos ensaios de Kakuda (2010) com o modelo elasto-plástico desenvolvido no programa de elementos finitos ABAQUS, e a teoria de sistemas de camadas elásticas (TSCE) desenvolvida por Burmister (1944), através do programa KENLAYER.

O KENLAYER não permite a utilização de um elemento de geossintético como um dado de entrada, entretanto, adotou-se como parâmetro de entrada os módulos de elasticidade equivalentes ao benefício estrutural proporcionado pela geogrelha. Estes módulos foram obtidos por Kakuda (2010), por meio da retroanálise das bacias de deflexões dos ensaios executados. A Tabela 2, mostra os parâmetros adotados na análise pela TSCE.

Tabela 2. Parâmetros adotados na análise TSCE.

Material	Sem geogrelha	Geogrelha no horizonte médio da base	Geogrelha na interface base/subleito
Base	280	390	490
Subleito	37	30	30

3.1 Deflexão

Nas análises mecanicistas utiliza-se a deflexão como parâmetro de avaliação do desempenho de pavimentos, e por isso se caracteriza como dos principais critérios na avaliação dos benefícios proporcionados pela geogrelha. Inicialmente serão apresentados os resultados da comparação dos valores reais de ensaio com o método de elementos finitos e a TSCE, em seguida a modelagem de elementos finitos para as três configurações e a análise dos benefícios decorrentes do uso da geogrelha.

A Fig. 4 apresenta as comparações das deflexões obtidas por meio dos programas com as medidas reais. Os resultados mostram que há um melhor ajuste no método de elementos

finitos, e a TSCE superestima as deflexões reais. Este resultado se justifica, pois, o modelo constitutivo dos materiais leva em conta a não linearidade física da região plástica.

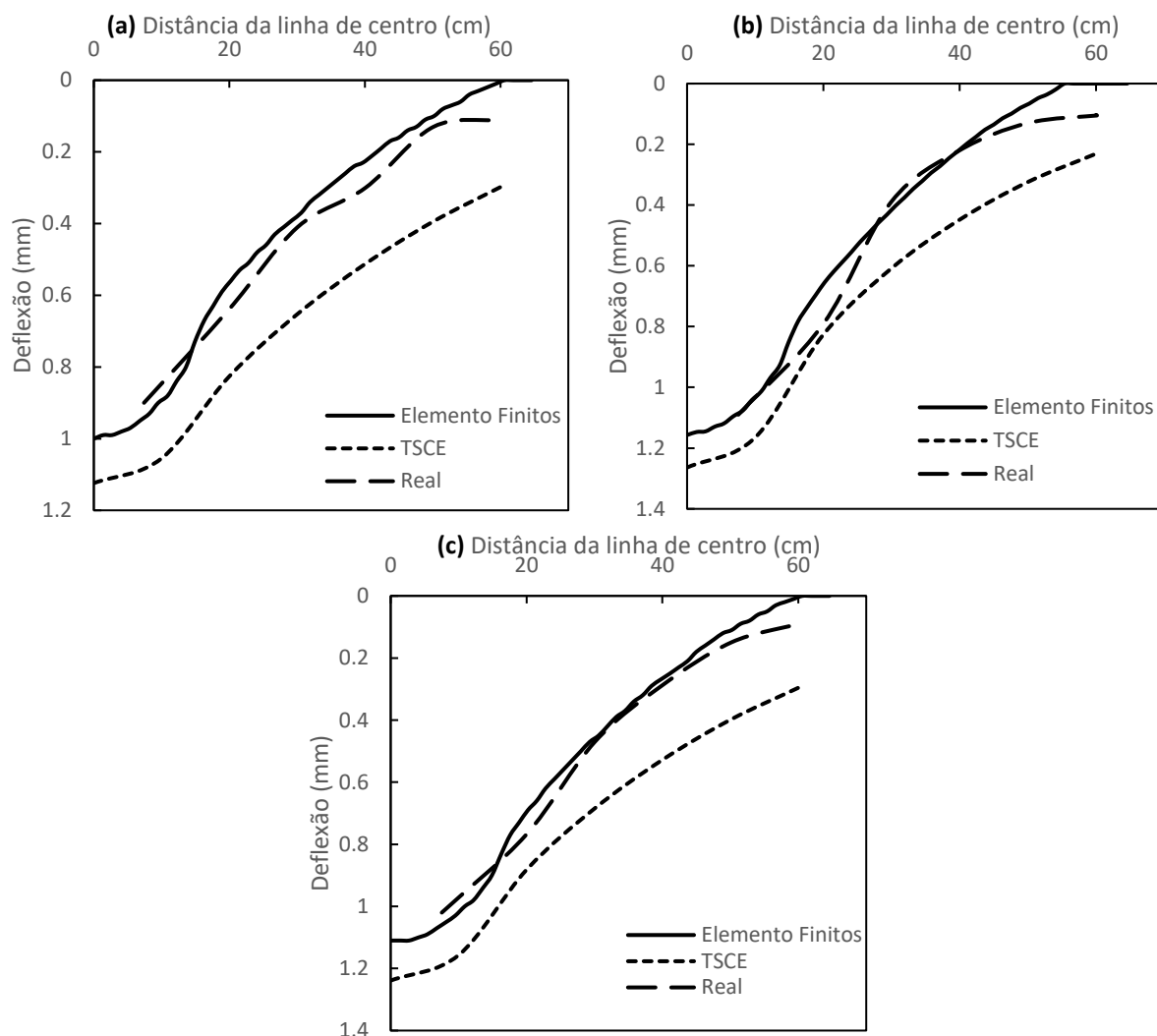


Figura 4. a) Deflexão com geogrelha inserida na interface base/subleito ; b) Deflexão sem geogrelha; c) Deflexão com geogrelha no horizonte médio da base.

A Fig. 5 mostra a influência da posição da geogrelha na redução das deflexões no método de elementos finitos. Os resultados mostram que a geogrelha inserida na interface da base/subleito apresenta menor valor de deflexão quando comparado com as outras geometrias. Isto ocorre devido ao aumento do ângulo de distribuição das tensões das camadas superiores para as inferiores, resultando em menores deformações verticais.

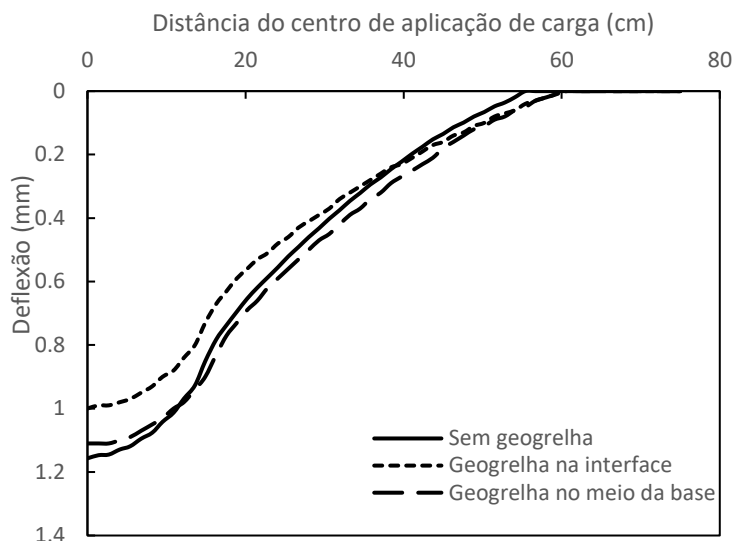


Figura 5. Influência da geogrelha na deflexão.

3.2 Deformação lateral

Para comparar a deformação lateral na linha central do pavimento ao longo da sua profundidade foram considerados os métodos de elementos finitos e TSCE. A Fig. 6 apresenta os resultados obtidos e evidenciam uma diferença entre as três configurações analisadas. Verifica-se uma conformidade entre os valores obtidos sem a presença do geossintético, o que não ocorre nas demais configurações.

Na Fig. 7 observa-se que ao inserir a geogrelha na interface base/subleito há uma diminuição da deformação lateral. Este resultado acontece quando a camada da base é carregada por uma tensão, e o agregado tende a se mover (deslizando), ou seja, se espalhando lateralmente. No entanto, com a colocação do reforço na interface, ele retém o agregado por meio da fricção na superfície da geogrelha e, particularmente, por meio do bloqueio das partículas dentro de suas aberturas. Como resultado, esse mecanismo minimiza o movimento lateral do agregado e diminui a deformação lateral da base.

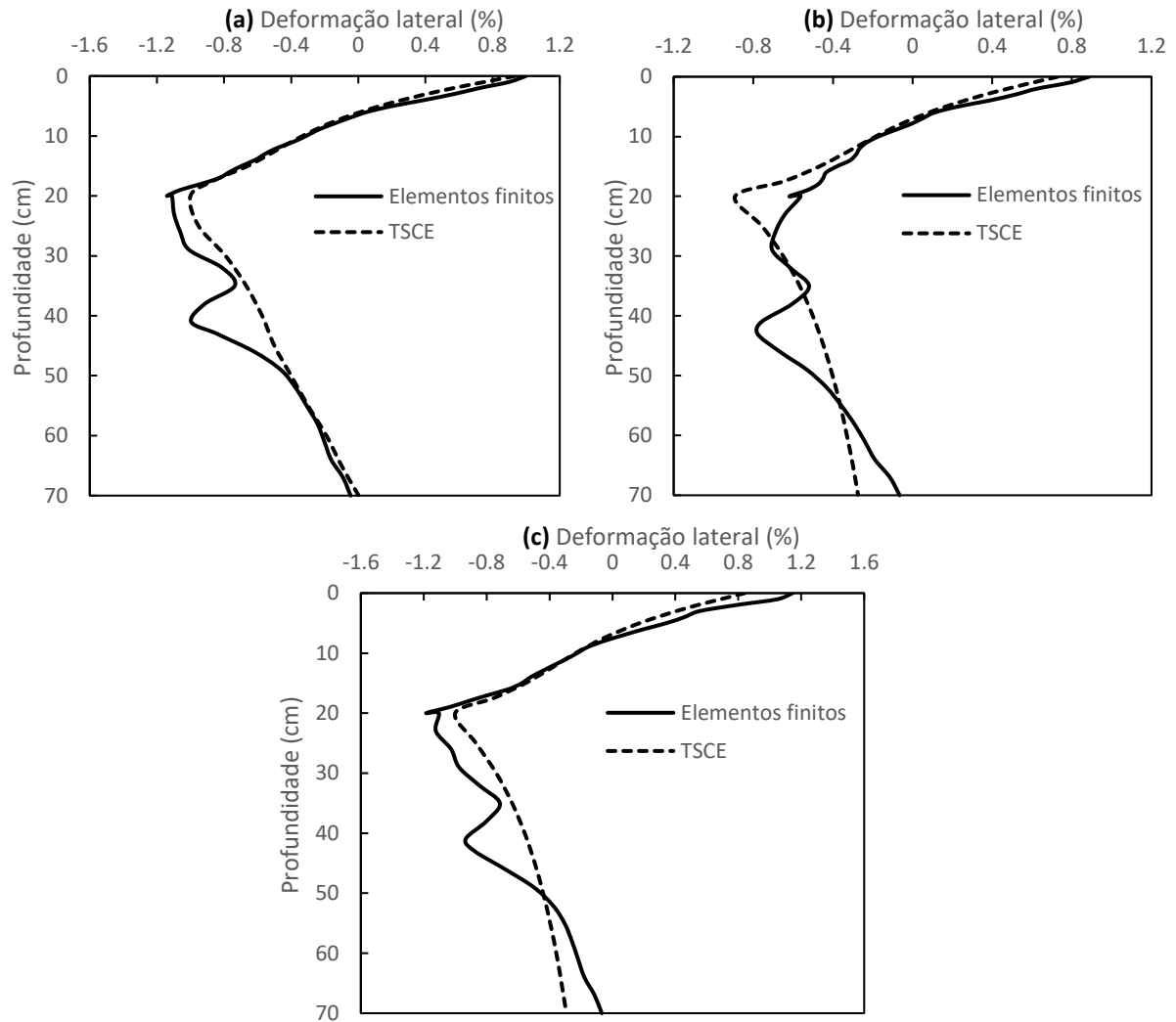


Figura 6. a) Deformação lateral sem geogrelha; b) Deformação lateral com geogrelha inserida na interface base/subleito; c) Deformação lateral com geogrelha no horizonte médio da base.

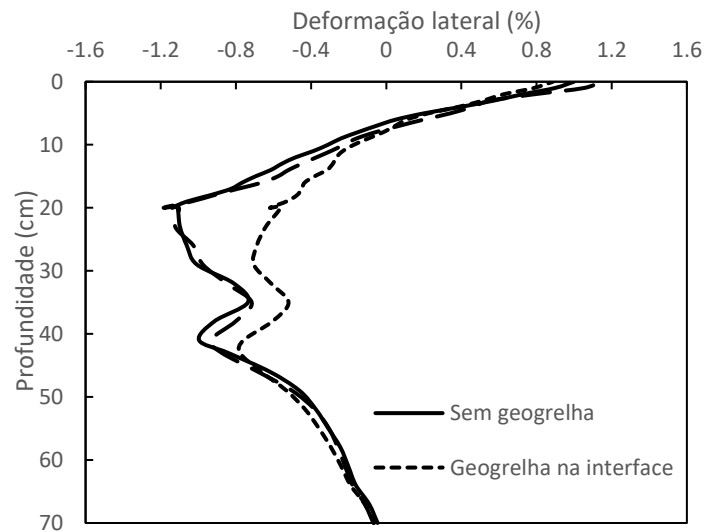


Figura 7. Influência da geogrelha na deformação lateral.

3.3 Tensão vertical

Nesta análise comparativa também foram considerados o método de elementos finitos e TSCE, apresentados na Fig. 8. Assim como nos resultados obtidos para a deformação lateral os valores de tensão vertical revelam uma similaridade para as configurações sem geossintético. No entanto, ao utilizar o geossintético no método de elementos finitos e TSCE, os resultados são diferentes, indicando que a tensão vertical resultante da análise elástica (TSCE) tende a ser maior quando comparada com o ABAQUS.

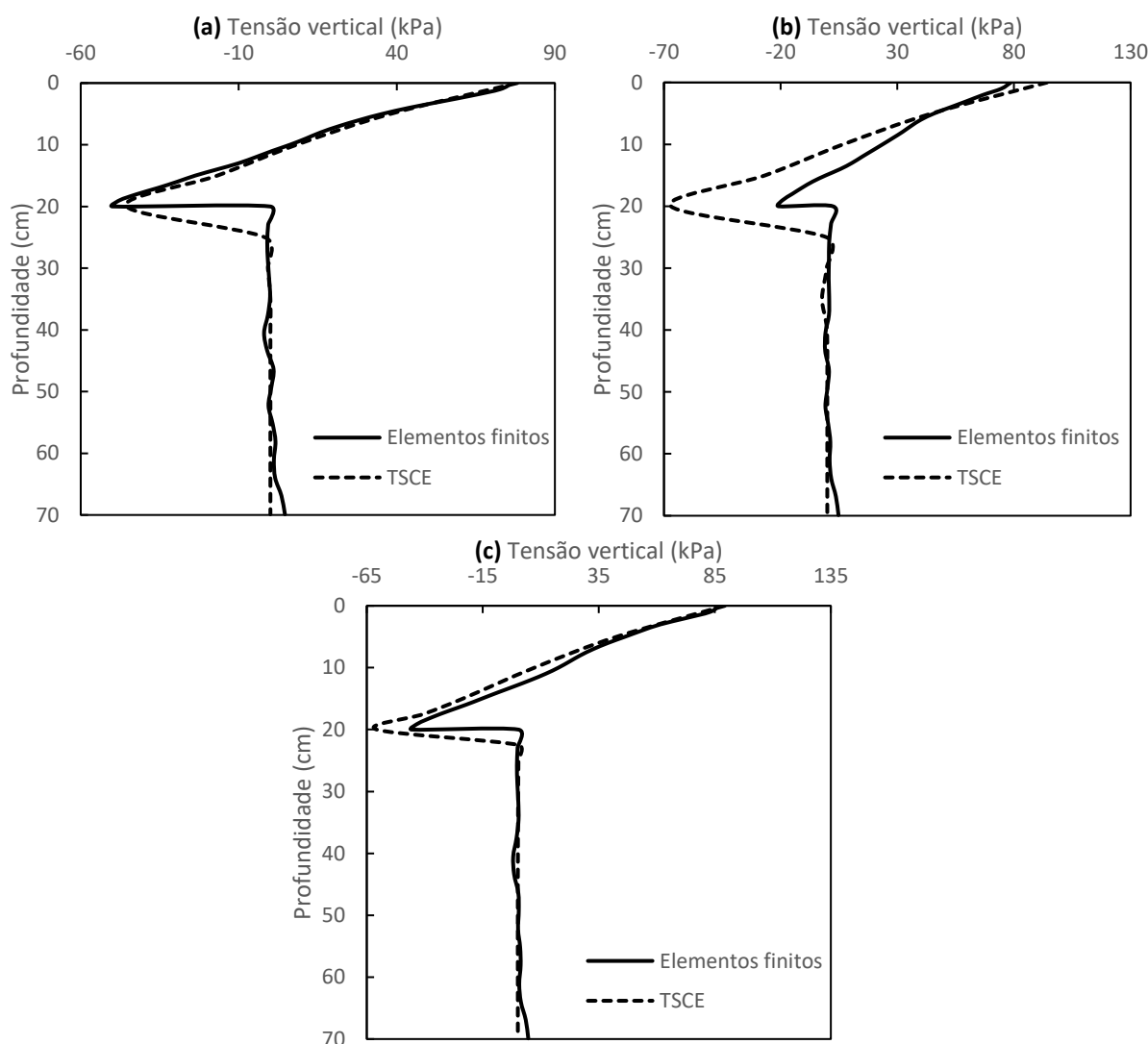


Figura 8. a) Tensão vertical sem geogrelha; b) Tensão vertical com geogrelha inserida na interface base/subleito; c) Tensão vertical com geogrelha no horizonte médio da base.

As tensões verticais distribuídas no centro da área de carregamento considerando as três configurações são apresentadas na Fig. 9. Verifica-se que ao posicionar a geogrelha na interface base/subleito ocorre a redução na transferência da tensão vertical para o subleito (profundidade 20 cm).

Segundo Perkins *et al.* (2005) isto se justifica pois a mobilização da tensão na geogrelha depende da deformação das camadas adjacentes, portanto, quanto maior a rigidez da geogrelha e maior a deformação para mobilizá-la, maior será o ganho estrutural. Isto implicará em menores deflexões, tensões verticais no subleito e deformação lateral na base.

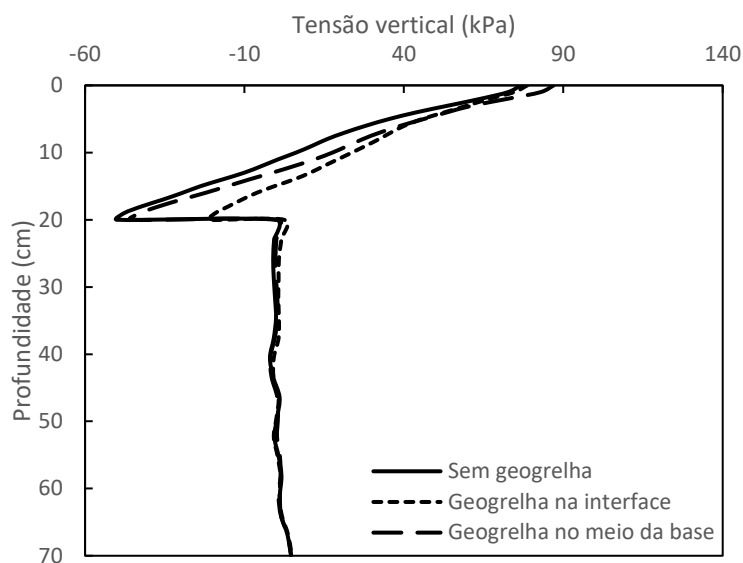


Figura 9. Influência da geogrelha nas tensões verticais.

4 CONCLUSÃO

Os ensaios realizados por Kakuda (2010) foram simulados numericamente utilizando o programa de elementos finitos ABAQUS, e também o programa baseado na teoria de sistema de camadas elásticas, KENLAYER. Comparando os resultados das análises realizadas pelos dois programas, o modelo elástico-plástico forneceu previsões mais realistas da deflexão, deformações laterais, e tensões verticais. Este fato se justifica, pois, o modelo constitutivo dos materiais na simulação por elementos finitos incorpora a análise física não linear com a aplicação de cargas cíclicas.

As análises numéricas revelaram que a posição mais eficiente para a geogrelha foi na interface entre a base e o subleito. A partir desta configuração ocorre uma redução de 14% na deflexão e 45% na deformação lateral no topo do subleito. Além de melhorar a distribuição das tensões nas camadas de base e subleito, reduzindo a tensão vertical no topo do subleito de 50 kPa para 20 kPa.

Analisando os resultados obtidos neste trabalho, verifica-se que os benefícios proporcionados pela geogrelha nos pavimentos são decorrentes de dois fatores: confinamento lateral das camadas adjacentes a geogrelha; e intertravamento entre o agregado da base e a geogrelha. Consequentemente, estes fatores aumentam o módulo de elasticidade da base, reduzindo a magnitude das deformações.

A simulação numérica desenvolvida mostrou-se eficiente para representar os benefícios promovidos pelo uso da geogrelha nos pavimentos. Além disso, o estudo mecanicista é fundamental para o desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho, pois, auxiliam a compreensão dos mecanismos de deterioração do pavimento. Desta forma estes estudos podem

ser utilizados como novas abordagens de projeto. Por fim, recomenda-se o desenvolvimento de um modelo numérico que represente melhor a interface base/geossintético/subleito, assim como, um modelo constitutivo específico que caracterize com maior precisão os materiais.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos e a USP-EESC pelo apoio e incentivo ao longo deste projeto.

REFERÊNCIAS

- Antunes, L. G. S. Reforço de Pavimentos Rodoviários com Geossintéticos. 2008. *Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília*, Brasília, DF. 2008.
- Balbo, J. T. 2007. Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração. São Paulo. *Oficina de Textos*. 588p.
- Burmister, D.M., 1945. The general theory of stresses and displacements in layered systems. *International Journal of Applied Physics*, 16 (2), 89–96, 16(3), pp. 126–127, 16(5), 296–302.
- Calvarano, L. S., Palamara, R., Leonardi, & Moraci, N. 2017. Finite element modelling of unpaved road reinforced with geosynthetics. *VII Italian Conference of Researchers in Geotechnical Engineering CNRIG 2017, Procedia Engineering*, 189, pp 99-104.
- Christopher, B. R., Berg, R. R. & Perkins, S. W. 2001. *Geosynthetic Reinforcement in Roadway Sections*, NCHRP Synthesis for NCHRP Project 20-7, Task 112, Final Report. National Cooperative Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 119 pp.
- Cho, Y., McCullough, B. F., & Weissmann, J., 2000. Consideration on finite-element method application in pavement structural analysis. *Transportation Research Record 1539, TRB national Research Council*, Washington, DC, pp. 96-101.
- Departamento de estrada e rodagem do estado de São Paulo - DER, 2006. *Projeto de pavimentação*. São Paulo, 53p.
- Franco, F. A. C. D. P. 2007. Método de dimensionamento mecanístico - empírico de pavimentos asfálticos - SisPav. *Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Góngora, I. A. G. 2011. Utilização de Geossintéticos como reforço de estradas não pavimentadas: Influencia do tipo de reforço e do material do aterro. *Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília*, Brasília, DF..
- Kakuda, F. M. 2010 Desenvolvimento e a utilização de um equipamento de grandes dimensões na análise do comportamento mecânico de uma seção de pavimento sob carregamento cíclico. *Tese de Doutorado. USP/SP*, São Carlos, Brasil.
- Kwon, J., Tutumluer, E., Al-Qadi, L. 2009. Validated mechanistic model for geogrid base reinforced flexible pavements. *Journal of transportation engineering*. Vol. 135, pp. 915-926.

- Leng, J., & Gabr, M. A. 2005. Numerical analysis of stress-deformation response in reinforced unpaved road sections. *Geosynthetics International*, 12, 2, pp. 111-119.
- Miranda, L. P. 2013. Análise do comportamento mecânico de pavimento reforçado com geossintético sob carregamento cíclico em modelo físico de verdadeira grandeza. *Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Perkins, S. W. & Ismeik, M. 1997. A synthesis and evaluation of geosynthetic-reinforced base layers in flexible pavements: Part II. *Geosynthetics International*, 4, No. 6, pp. 605–621.
- Perkins, S. W. 1999. Mechanical response of geosynthetic-reinforced flexible pavements. *Geosynthetics International*, 6, No. 5, pp. 347–382.
- Perkins, S. W., Christopher, B. R., Eiksund, G. R., Schwartz, C. S. & Svanø, G. 2005. Modeling effects of reinforcement on lateral confinement of roadway aggregate. In *CD Proceedings of GeoFrontiers 2005, G-I Specialty Conference*. American Society of Civil Engineering, Austin, TX
- Perkins, S.W., Christopher, B. R., Cuelho, E. L., Eiksund, G. R., Schwartz, C. S., and Svanø, G. 2009. A mechanistic-empirical model for base reinforced flexible pavements. *International Journal Pavement Engineering*, 10(2), pp. 101–114.
- Siriwardane, H., Gondle, R. e Bora, K. 2010. Analysis of flexible pavements reinforced with geogrids. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28, No. 3, pp. 287-297.
- Wathugala, G. W., Huang, B. & Pal, S. 1996. Numerical simulation of geosynthetic reinforced flexible pavement. *Transportation Research Record*, 1534, pp. 58–65.