XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/49

Modelagem tridimensional de pavimentos reforçados com geossintéticos sobre cavidades

Bryan Robin Sanchez Ramirez
Mestrando, EESC-USP, São Carlos, Brasil, bryan.sanchez@usp.br

Bruna Martins de Melo
Mestranda, EESC-USP, São Carlos, Brasil, brunamartins2024@usp.br

Marcell Gustavo Chagas Santos
Professor Doutor, EESC-USP, São Carlos, Brasil, marcell.gustavo@usp.br

Jefferson Lins da Silva
Professor Associado, EESC-USP, São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: A presença de cavidades no subsolo compromete a estabilidade e o desempenho de obras de pavimentação, em razão da migração de partículas de solo para o seu interior e da consequente perda de suporte. Nesse contexto, torna-se essencial a busca por soluções técnica e economicamente viáveis para mitigação dos efeitos causados por cavidades subterrâneas. Entre as alternativas disponíveis, destaca-se o uso de geossintéticos posicionados entre o subleito e o pavimento, atuando como elemento de reforço e promovendo maior estabilidade do sistema. Diante dessa aplicação, o presente estudo tem como objetivo quantificar os esforços desenvolvidos nos geossintéticos empregados na estabilização de pavimentos sujeitos à presença de cavidades subterrâneas. Para tal, foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional baseado no Método dos Elementos Finitos, representando a interação entre o pavimento e a cavidade. As cargas aplicadas sobre o geossintético foram consideradas estáticas, correspondentes ao peso próprio da estrutura do pavimento e à pressão exercida pelos pneus de um veículo padrão na superfície. Para determinar a carga mais crítica a ser aplicada sobre a cavidade, foi realizada a avaliação de cada eixo do caminhão padrão utilizando uma área de contato equivalente sobre um modelo tridimensional de elementos finitos. Os diâmetros das cavidades avaliadas variaram entre 1,0 m e 3,0 m. Também foi realizada uma avaliação da espessura do pavimento com o objetivo de quantificar o efeito da distribuição de tensões em profundidade. A estrutura do pavimento e o subleito foram representados através do modelo constitutivo Elasto-plástico com critério de ruptura Mohr-Coulomb, enquanto o geossintéticos foi modelado como um material elástico isotrópico. Os resultados obtidos por meio da simulação numérica foram comparados com formulações analíticas equivalentes de Giroud et al. (1990), Vidal et al (2002), e *British Standards Institution* (2010). A abordagem numérica empregada permitiu compreender o mecanismo envolvido na determinação dos esforços dos geossintéticos sobre cavidades.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Cavidades, Pavimentos, Elementos Finitos.

ABSTRACT: The presence of cavities in the subsoil compromises the stability and performance of pavements, due to the migration of soil particles into them and the consequent loss of support. In this context, it is essential to find technical and economically viable solutions to mitigate the effects caused by underground cavities. One of the available alternatives is the use of geosynthetics positioned between the subgrade and the pavement, acting as a reinforcing element and promoting greater stability of the system. Given this application, the present study aims to quantify the stresses developed in the geosynthetics used to stabilize pavements subject to the presence of underground cavities. To this purpose, a three-dimensional numerical model based on the Finite Element Method was developed, representing the interaction between the pavement and the cavity. The loads applied to the geosynthetics were considered static, corresponding to the weight of the pavement structure itself and the pressure exerted by the tires of a standard vehicle on the surface. To determine the most critical load to be applied to the cavity, each axle of the standard truck was evaluated using an equivalent contact area on a three-dimensional finite element model. The diameters of the evaluated cavities ranged from 1.0 m to 3.0

m. An evaluation of the pavement thickness was also performed to quantify the effect of stress distribution at depth. The pavement structure and subgrade were represented using the Elasto-plastic constitutive model with Mohr-Coulomb failure criterion, while the geosynthetics were modeled as an isotropic elastic material. The results obtained through numerical simulation were compared with equivalent analytical formulations by Giroud et al. (1990), Vidal et al. (2002), and the British Standards Institution (2010). The numerical approach employed allowed for an understanding of the mechanism involved in determining the stresses of geosynthetics on cavities.
KEYWORDS: Geosynthetics, Cavities, Pavements, Finite Elements.

1 INTRODUÇÃO

O surgimento de cavidades pode estar associado a processos naturais ou antropogênicos, tais como a erosão e a dissolução de rochas solúveis (ex: calcário ou evaporitos). Em infraestruturas rodoviárias, tais ocorrências podem comprometer a integridade da via, resultando em colapsos que a tornam parcial ou totalmente inutilizável. A Figura 1 ilustra a evolução de uma cavidade conforme Augarde et al. (2003): inicialmente, observa-se uma pequena cavidade na interface rocha-solo, expandida pela percolação de água; em seguida, surge uma abertura superficial que serve como indicativo da magnitude real da cavidade subterrânea; por fim, ocorre o colapso do solo subjacente, culminando na formação de uma depressão em funil chamada cavidade.

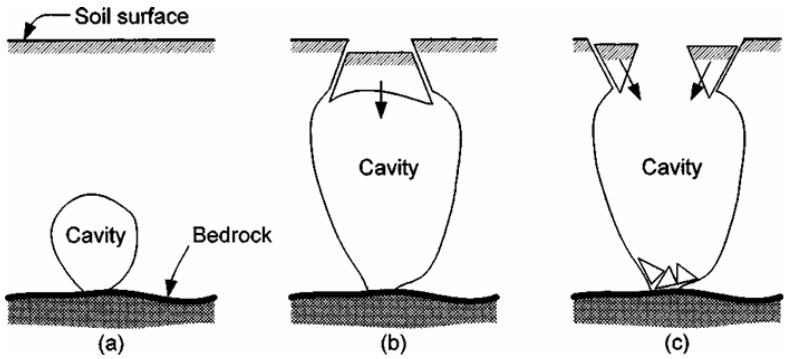


Figura 1. Formação de buracos a partir de cavidades subterrâneas, Augarde et al (2003).

Diante desse cenário, o emprego de geossintéticos surge como uma alternativa técnica e economicamente viável para mitigar os riscos associados ao colapso de cavidades. Estes materiais atuam como reforço, conferindo suporte à estrutura do pavimento e garantindo a continuidade do tráfego superficial através da redistribuição das tensões.

Este estudo analisa a eficácia de tais soluções, comparando as respostas de modelos numéricos tridimensionais com formulações analíticas consagradas, como as de Giroud et al. (1990), Vidal (2002) e a norma BSI 8006 (2010). A análise concentra-se na avaliação da influência de parâmetros como o diâmetro da cavidade, a rigidez do geossintético e a espessura do pavimento no comportamento do sistema.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelos 3D

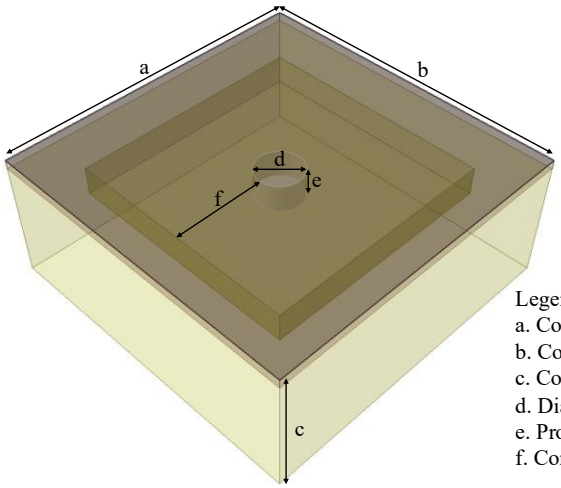
Um modelo tridimensional foi empregado para avaliar a influência de diversos parâmetros nas deformações e tensões do geossintético de reforço posicionado sobre uma cavidade. O diâmetro da referida cavidade variou entre 1,00 m e 3,00 m, sendo o limite superior definido com base na largura padrão de uma faixa de rodagem. No presente estudo, a estrutura do pavimento foi simplificada e representada por um revestimento flexível de 0,05 m de espessura, sobreposto a uma camada de base granular de 0,45 m. Os parâmetros e valores adotados na modelagem encontram-se detalhados a seguir.

2.1.1 Dimensões

As dimensões gerais do modelo tridimensional foram determinadas com base nas recomendações práticas de Lees (2016). O comprimento de ancoragem do geossintético foi assumido entre 3,00 m até 5,00 m, dependendo das dimensões do modelo e da cavidade, esta distância é considerada desde a borda da cavidade até o limite do geossintético. A profundidade da cavidade adotada nos modelos foi de 1,50 m. Em situações reais, essa profundidade pode ser significativamente maior; entretanto, para os propósitos deste estudo, o volume vazio considerado é suficiente para permitir a deformação livre do geossintético, atendendo aos objetivos da análise. O software utilizado para realizar os cálculos foi o RS3 da Rocscience. A Tabela 1 apresenta o resumo das dimensões dos modelos tridimensionais em elementos finitos. A Figura 2 mostra um desenho esquemático do modelo de análise.

Tabela 1. Resumo das dimensões do modelo tridimensional.

Dimensão	M1	M2	M3	M4	M5
Espessura do pavimento (m)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Diâmetro da cavidade (m)	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
Comprimento eixo X e Y (m)	7,00	10,50	14,00	17,50	21,00
Comprimento eixo Z (m)	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00
Comprimento de ancoragem (m)	3,00	3,00	5,00	5,00	5,00



Legenda:
a. Comprimento eixo X
b. Comprimento eixo Y
c. Comprimento eixo Z
d. Diâmetro da cavidade
e. Profundidade da cavidade
f. Comprimento de ancoragem

Figura 2. Desenho das dimensões do modelo tridimensional.

2.1.2 Parâmetros

Em projetos de pavimentos, é prática comum caracterizar a elasticidade dos materiais a traves do módulo resiliente (M_R). O M_R é determinado com base na aplicação de cargas repetidas (cargas cíclicas) no ramo elástico do material em regime de pequenas deformações. Por essa razão, os valores do módulo resiliente são, em geral, significativamente superiores aos valores dos módulos elásticos obtidos a partir de ensaios com carregamento monotônico, usualmente empregados em outras aplicações geotécnicas. Os parâmetros elásticos considerados neste estudo foram definidos com base nos valores reportados por Papagiannakis & Masad (2024). Os parâmetros de resistência do pavimento foram assumidos pelo autor, com base em valores representativos de projeto. A Tabela 2 apresenta um resumo dos parâmetros de elasticidade e resistência dos materiais.

Quanto à rigidez do geossintético, adotou-se uma ampla faixa de valores (Tabela 3), compreendida entre 1.000 kN/m e 5.000 kN/m. Tal variação visa avaliar, por meio de um estudo paramétrico, a influência dessa propriedade no comportamento mecânico do sistema.

Tabela 2. Resumo dos parâmetros de elasticidade e resistência.

Material	γ (kN/m^3)	M_R (MPa)	ν	C (kPa)	Φ (°)
Pavimento flexível	23	2.750	0,30	-	-

Base granular	20	275	0,35	0	36
Subleito	18	75	0,35	20	28

Abreviatura: γ: massa específica aparente; M_R: módulo resiliente; ν: módulo de Poisson; C: coesão; Φ: Ângulo de atrito.

Tabela 3. Resumo dos valores de rigidez.

Geossintético	J1	J2	J3	J4	J5
J (kN/m)	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000

Com base nas informações apresentadas nas Tabela 1 e Tabela 3, define-se a nomenclatura adotada neste estudo, a qual reflete as dimensões do modelo e a rigidez do geossintético considerada. Por exemplo, o modelo M3–J4 corresponde as dimensões do modelo M3 com à rigidez do geossintético J4.

2.1.3 Tensão aplicada no pavimento

A tensão aplicada no pavimento foi escolhida para representar a condição crítica, por esse motivo a representação das cargas não é assumida como uniforme em toda extensão do modelo numérico. Neste estudo, foi calculado a tensão estática aplicada nos pneus do caminhão-trator 6x2 com semirreboque (*six axle tractor semi trailer*). O camião escolhido tem três tipos de eixos, cada um deles com diferentes capacidades de carga e número de pneus.

Para simplificar a representação das cargas no modelo numérico tridimensional, foi utilizada uma área equivalente retangular. Na estimativa da área de contato dos pneus foi empregada a Equação (1) apresentada por Huang (2004).

$$L = \sqrt{A_c / 0{,}5227} \quad (1)$$

Onde L é o comprimento da área real de contato, A_c é a área de contato como apresentado na Figura 3. A área de contato do pneu na superfície do pavimento pode ser representada pela área equivalente de um retângulo de comprimento 0,8712L e largura 0,6L.

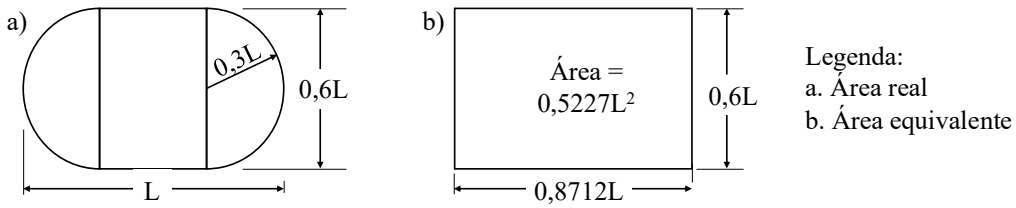


Figura 3. Dimensões da área de contato do pneu, adaptado de Huang (2004).

Para os cálculos foi usado um pneu de largura 0,6L = 0,452 m, resultando em uma área equivalente de 0,452 m x 0,656 m. A carga máxima em cada eixo foi obtida do CONTRAN (2021). A Tabela 4 apresenta os valores de tensão nos pneus do camião padrão empregado neste estudo.

Tabela 4. Resumo dos valores de tensão aplicada no pavimento.

Parâmetro	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3
Carga máxima (Ton)	7	16	23
Número de pneus	2	8	12
Area total de contato (m^2)	0,593	2,373	3,560
Tensão aplicada em cada pneu (Ton/m^2)	10,11	6,74	6,46
Tensão aplicada em cada pneu (kPa)	101	68	65

No Eixo 1 encontra-se a maior tensão aplicada sobre o pavimento. No entanto, este valor distribui-se em uma área pequena, em relação ao Eixo 2 e Eixo 3. As análises preliminares mostraram que a condição de tensão crítica ocorre no eixo 3, onde a carga transmitida para o pavimento é maior, embora a tensão seja a menor dos três eixos analisados. O que é pouco intuitivo, mas para esta aplicação em particular, não só a tensão

final aplicada deve ser considerada. Nos casos em que a cavidade analisada não cobria a totalidade dos pneus, procurou-se localizar as cargas na posição crítica, cobrindo o máximo da área possível da cavidade.

2.1.4 Sequência de análise

A modelagem numérica foi conduzida em cinco etapas distintas. A primeira etapa corresponde à condição *in situ*, sendo necessária para o estabelecimento das tensões geostáticas do modelo, associadas ao subleito. Na segunda etapa, foi realizada a instalação do geossintético, seguida da construção da camada de base granular. A terceira etapa consistiu na execução do pavimento flexível. Na quarta etapa, foi simulada a formação da cavidade sob o pavimento. Por fim, a quinta etapa corresponde à aplicação da tensão na superfície do pavimento. Ressalta-se que todos os resultados apresentados nos parágrafos seguintes se referem à etapa final da análise. Por fim, foi avaliada a influência da espessura do pavimento sobre a cavidade. Para essa análise, adotou-se como referência o modelo M5-J1, por apresentar o maior diâmetro de cavidade entre os casos estudados. A espessura do pavimento foi avaliada entre 0,50 m e 2,00 m.

2.2 Formulações analíticas

2.2.1 Giroud et al. (1990)

O método de Giroud et al. (1990) combina duas teorias fundamentais. Teoria da Membrana Tensionada, aplicada ao geossintético, que se estira e mobiliza sua resistência à tração para suportar as cargas verticais. E Teoria do Abaulamento ou Arco de Solo, aplicada às camadas de solos, onde a deflexão gera um arco de solo que transfere parte da carga aplicada para longe da área da cavidade. Sendo assim, Equação (2) permite determinar o valor da tração no geossintético:

$$T = \mathrm{p}\cdot\mathrm{r}\cdot\Omega \tag{2}$$

Onde p é a tensão normal no geossintético sobre a cavidade, r é o rádio da cavidade quando considerada circular, e Ω é um parâmetro adimensional que depende da relação entre o rádio da cavidade e a deformação na superfície. O método emprega uma carga uniforme sobre a cavidade. Maiores detalhes sobre o método podem ser encontrados na referência Giroud et al. (1990).

2.2.2 Vidal et al. (2002)

O artigo de Vidal et al. (2002) propõe um método de projeto para condições de deformação plana. Este método combina: (i) A Teoria do efeito arco de Terzaghi para estimar as tensões verticais no solo sobre a cavidade; (ii) A Teoria da membrana tensionada para calcular a tensão de tração no reforço, assumindo que este se deforma em forma de arco circular ou parabólica. Sendo assim, a Equação (3) permite determinar o valor da tração no geossintético:

$$T = {}^{\sigma_v\cdot \mathrm{B}}/_{\sin(\theta)} \tag{3}$$

Onde B é metade da largura da cavidade, σ_v é a tensão normal no geossintético sobre a cavidade, e θ é o valor do ângulo que consegue o equilíbrio das equações complementares do método. Maiores detalhes sobre o método podem ser encontrados na referência Vidal et al. (2002).

2.2.3 British Standards Institution (2010)

A norma inglesa apresenta um método para determinar a tração no geossintético com um cálculo mais detalhado incluindo fatores parciais de segurança. A Equação (4) permite determinar o valor da tração no geossintético:

$$T = 0{,}5\cdot\lambda\left(f_{fs}\cdot\gamma\cdot H + f_q\cdot w_s\right)\mathrm{D}\cdot\sqrt{1+{}^{1}/_{6\varepsilon}} \tag{4}$$

Onde λ é um coeficiente que depende se o suporte de reforço, f_{fs} é o fator de carga parcial para o peso unitário do solo, γ é o peso unitário do aterro, H é a altura do aterro, f_q é o fator de carga parcial para cargas externas aplicadas, w_s é a sobrecarga no topo do aterro, D é o diâmetro da cavidade, ε é a deformação no

reforço. Maiores detalhes sobre o método podem ser encontrados na referência *British Standards Institution* (2010).

As formulações analíticas apresentadas previamente consideram o peso do veículo como uma sobrecarga uniformemente distribuída. Para fins de comparação entre os métodos avaliados neste estudo, adotou-se a distribuição do peso total do veículo sobre a sua área de projeção, resultando em um valor de aproximadamente 10 kPa.

3 RESULTADOS

O resultado dos 25 modelos analisados é representado na Figura 4, onde se resume a deformação relativa (Def. Vertical/Diâmetro) e as tensões do geossintético (tração). Em muitos dos casos analisados, observaram-se deformações significativamente elevadas, conforme ilustrado na Figura 4a, inclusive superiores aos limites admissíveis estabelecidos pelos critérios de deformação máxima para pavimentos flexíveis (DNIT, 2006). Esses níveis de deformação foram alcançados sem o atingimento dos critérios de falha definidos no modelo numérico. Ressalta-se que, neste estudo, tanto o pavimento quanto o geossintético foram modelados com comportamento elástico.

As deformações tendem a reduzir quando são utilizados geossintéticos mais rígidos para suportar e redistribuir as tensões. Nos modelos estudados, os valores de tração são inferiores a 10 kPa. A variação dos valores de tração apresentada na Figura 4b está relacionada à área carregada pelos pneus sobre as cavidades e à variação dos diâmetros destas. Isso é influenciado pelo comprimento da ancoragem, pelos diâmetros das cavidades e pela distribuição das tensões desde a superfície até a profundidade do geossintético. A tensão aplicada à superfície do pavimento também foi alternada em cada modelo numérico, de modo a representar a condição de carregamento crítica sobre a cavidade. Tal abordagem explica o fato de a tração no geossintético não evoluir proporcionalmente ao aumento do diâmetro da cavidade.

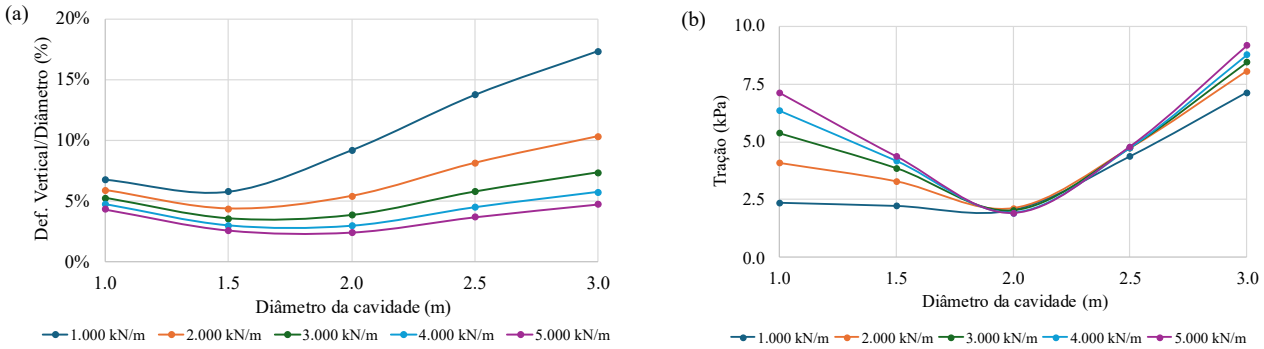


Figura 4. Resultados do modelo tridimensional sobre o geossintético (a) deformação relativa, (b) tração máxima.

A fim de verificar o efeito da aplicação de carga sobre a cavidade, avaliou-se um modelo tridimensional utilizando o geossintético J1 sob uma sobrecarga superficial uniforme de 10 kPa, simulando a carga de um veículo padrão. Os resultados expostos na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** corroboram o comportamento típico esperado: observa-se que o incremento no diâmetro da cavidade resulta em um aumento progressivo tanto da deformação vertical (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**a) quanto dos esforços de tração (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**b).

Com o intuito de analisar a influência da espessura do pavimento nas deformações e valores de tração do geossintético, foram desenvolvidos três modelos adicionais derivados do cenário M5-J1, variando-se a espessura total do pavimento até o limite de 2,0 m. Conforme ilustrado na Figura 6a, observa-se uma redução na deformação vertical, independentemente do incremento do peso próprio da camada de pavimento. Tal comportamento decorre da maior capacidade de redistribuição das tensões superficiais ao longo da estrutura, atenuando a solicitação direta sobre o geossintético. Já a Figura 6b demonstra que a tração tende a reduzir em espessuras superiores a 1,0 m, corroborando o efeito da redistribuição de tensões proporcionado pelo aumento da rigidez do conjunto.

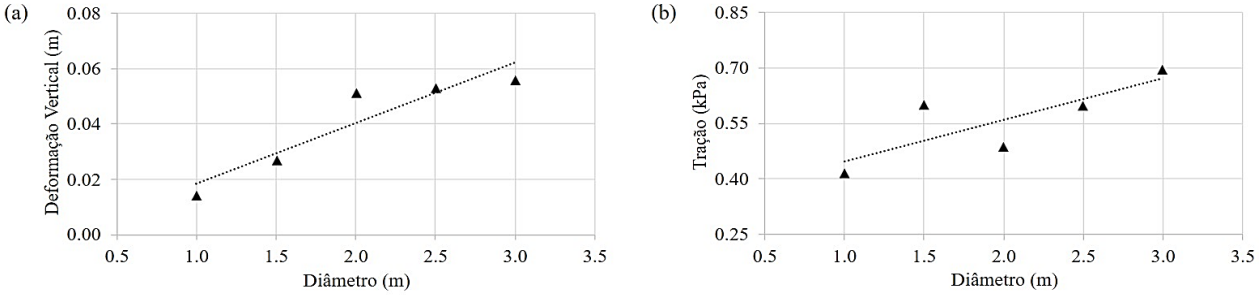


Figura 5. Resultados do geossintético do modelo M1-J1 até M5-J1 com sobrecarga uniforme e variação do diâmetro da cavidade.

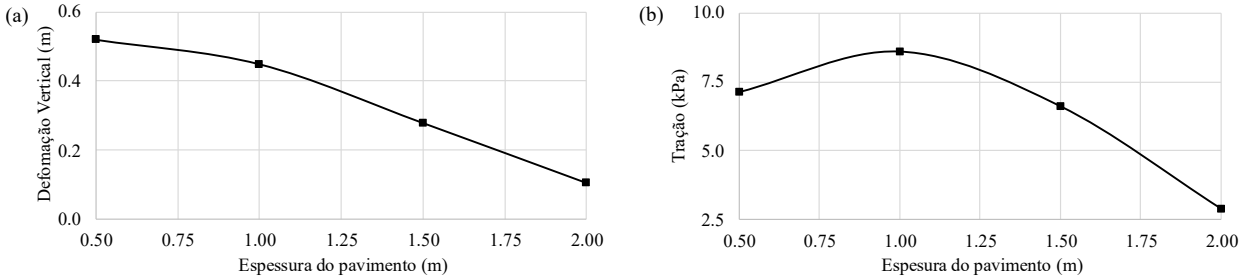


Figura 6. Resultados do geossintético do modelo M5-J1 variando a espessura do pavimento (a) deformação vertical máxima, (b) tração máxima.

Por fim, compara-se o esforço de tração das formulações analíticas apresentadas com a resposta do modelo numérico da série J1. A fim de comparar os esforços de tração determinados pelas formulações analíticas, adotou-se o nível de deformação vertical obtido no modelo numérico tridimensional. Tal procedimento garante que a comparação entre os esforços ocorra sob condições equivalentes de deformação. Como descrito previamente, a sobrecarga uniforme adotada tem um valor de 10 kPa. A Figura 7 mostra a comparação dos resultados dos três métodos analíticos e do modelo numérico. Observa-se que os três métodos analíticos superestimaram os valores de tração em comparação aos resultados obtidos via modelagem numérica tridimensional. Dentre as formulações avaliadas, o método de Vidal (2002) destacou-se por apresentar as maiores discrepâncias, fornecendo os valores de tração mais elevados em todo o intervalo do diâmetro da cavidade analisado.

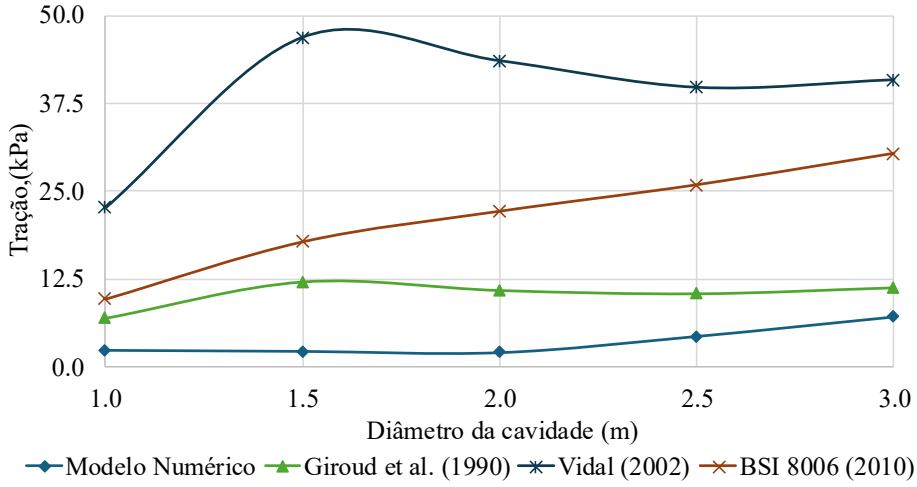


Figura 7. Esforços de tração determinados por formulações analíticas e por análises de tensão-deformação dos modelos M1-J1 até M5-J1.

4 CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas nos modelos numéricos tridimensionais de elementos finitos e nas formulações de Giroud et al. (1990), Vidal et al (2002) e British Standards Institution (2010), pode-se concluir:

A análise comparativa revelou que as formulações analíticas tendem a ser conservadoras. Os três métodos analíticos avaliados (Giroud et al., 1990, Vidal, 2002 e BSI 8006, 2010) superestimaram os valores de tração quando comparados aos resultados da modelagem numérica tridimensional. O método de Vidal (2002) apresentou as maiores discrepâncias, fornecendo os valores de tração mais elevados em todo o intervalo de diâmetros analisado. Essa divergência ocorre porque as fórmulas analíticas não conseguem representar adequadamente a distribuição das tensões desde a superfície até à profundidade do geossintético. A variação da tração está intrinsecamente ligada à área carregada (contato dos pneus) e ao diâmetro da cavidade.

O aumento da espessura total do pavimento no modelo numérico resultou em uma redução da deformação vertical. Isso ocorre devido à maior capacidade de redistribuição das tensões superficiais ao longo da estrutura, o que atenua a solicitação direta sobre o reforço geossintético.

O uso de geossintéticos com maior rigidez demonstrou ser eficaz na redução das deformações, pela sua capacidade de suportar e distribuir as tensões de forma mais eficiente.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Augarde, C. E., Lyamin, A. V., & Sloan, S. W. (2003). *Prediction of undrained sinkhole collapse*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(3), 197–205. <http:// https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:3(197)>

British Standards Institution. *BS 8006: Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*. London, pp. 196-202, 2010.

Conselho Nacional de Trânsito (2021). *Resolução CONTRAN nº 882, de 13 de dezembro de 2021. Diário Oficial da União*. <http:// https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-contran-n-882-de-13-de-dezembro-de-2021-370017699>

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006). *Manual de restauração de pavimentos asfálticos* (IPR Publ. 720). Ministério dos Transportes.

Giroud, J. P.; Bonaparte, R.; Beech, J. F. e Gross, B. A. (1990) *Design of soil layer-geosynthetic overlying voids*, Geotextiles and Geomembranes, vol. 9, pp. 11-50.

Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Pearson/Prentice Hall.

Lees, A. (2016). *Geotechnical finite element analysis: A practical guide*. ICE Publishing.

Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2024). *Pavement design and materials* (2nd ed.). Wiley.

Vidal, Delma de M. e Fabrin, T. W. (2002) *A contribution to geosynthetics design in subsidence problems*, ICG 7 - Nice France - Volume 1 - Geotechnical engineering and reinforced structures.