

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Análise numérica de estradas não pavimentadas submetidas a manutenções superficiais

Bárbara Gonçalves Mourão

Mestranda em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, barbara.mourao@hotmail.com

Ennio Marques Palmeira

Professor Titular, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, palmeira@unb.br

Juan Felix Rodriguez Rebolledo

Professor Adjunto, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, jrodriguezr72@unb.br

RESUMO: Os geossintéticos têm se mostrado benéficos no reforço de solos, sobretudo em problemas de grandes deformações, tais como estradas não pavimentadas construídas sobre solos moles e submetidas a elevadas solicitações. Devido ao tráfego de maquinários pesados, essa situação ocorre ainda no período de construção da via, em que é necessário realizar manutenções superficiais para a execução das camadas de aterro. Diversos estudos experimentais indicaram uma melhora no desempenho mecânico de estradas não pavimentadas quando submetidas a restaurações superficiais. A presente pesquisa teve como objetivo estudar numericamente o comportamento de estradas não pavimentadas com e sem reforço submetidas a manutenções superficiais. As análises consistiram nas seguintes etapas: determinação das tensões geostáticas no subleito; inclusão da camada de aterro, bem como do reforço geossintético na interface entre os materiais; aplicação de um carregamento distribuído sobre o aterro; descarregamento; execução da manutenção superficial a partir da configuração deformada do aterro; e reaplicação do carregamento. Os resultados indicam que o comportamento mecânico dessas estradas será melhor representado pela sequência descrita. Ademais, foram obtidas informações relevantes como tração no reforço e influências das propriedades dos materiais.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Estrada Não Pavimentada, Grandes Deformações, Manutenção Superficial, Análise Numérica.

ABSTRACT: Geosynthetics have proven to be beneficial in reinforcing soils, especially in problems with large deformations, such as unpaved roads built on soft soils and subjected to high loads. Due to heavy machinery traffic, this situation occurs even during the construction period of the road, in which is necessary to perform surface maintenance to the execution of the fill layers. Several experimental studies have indicated an improvement in the mechanical performance of unpaved roads when subjected to surface maintenance. The present research aimed at numerically investigate the behavior of unreinforced and reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance. The analyses consisted of the following steps: determination of geostatic stresses in the subgrade; inclusion of the fill layer, as well as the geosynthetic reinforcement at the interface between the materials; application of a distributed load on the fill; unloading; execution of the surface maintenance from the deformed configuration of the fill; and reapplication of the load. The results indicate that the mechanical behavior of these roads will be better represented by the sequence described. Furthermore, relevant information on loads in the reinforcement and influence of material properties were obtained.

KEYWORDS: Geosynthetics, Unpaved Road, Large Deformations, Surface Maintenance, Numerical Analysis.

1 Introdução

As estradas não pavimentadas, predominantes no modal rodoviário do país, têm importante papel socioeconômico para os moradores do campo, bem como para a indústria florestal, da mineração e da agricultura. Essas estradas, especialmente quando constituídas por subleitos de baixa resistência e submetidas a elevadas solicitações, configuram um problema de grandes deformações, motivando o uso de alternativas de



reforço como os geossintéticos. Dentre os seus benefícios, estão o aumento da vida útil da estrada, uma diminuição do custo de construção, por meio da diminuição da espessura da camada de aterro, além de um aumento do tempo necessário para a realização de manutenções periódicas (Calvarano *et al.*, 2016).

Os tipos de geossintéticos mais usados como reforço em estradas não pavimentadas são os geotêxteis e as geogrelhas. Os reforços, particularmente as geogrelhas, melhoram o desempenho das estradas sobretudo por realçarem o mecanismo de confinamento lateral, garantido pelo intertravamento entre geossintético e agregados, e pelo efeito membrana, mobilizado a partir do formato ondulado do geossintético, quando submetido a grandes deformações (Hana & Thakur, 2015). No caso de geotêxteis, estes podem também contribuir como elemento de separação, minimizando a contaminação do material de aterro por finos do subleito.

Em virtude do tráfego de maquinários pesados, esse cenário de grandes deformações ocorre ainda no período de construção das estradas, sendo necessário um contínuo preenchimento de trilhas de rodas durante a execução das camadas de aterro (Palmeira, 1998). Diversos autores mostraram, de forma experimental, os benefícios das restaurações superficiais no desempenho mecânico das estradas, particularmente em casos reforçados, devido à tração adicional proporcionada no geossintético (Cunha, 1991; Ferreira, 1995; Antunes, 2008; Góngora, 2011).

Diversos trabalhos numéricos avaliaram o desempenho dos geossintéticos como elementos de reforço utilizando a formulação Lagrangiana do Método de Elementos Finitos, proposta por Bathe (1982), para modelar com sucesso os mecanismos de grandes deformações (Burd, 1995; Lai *et al.*, 2018; Meta & Shah, 2021). Essa formulação considera a atualização das coordenadas nodais dos elementos durante a análise, embora não se restrinja a isso (PLAXIS, 2021). Por outro lado, se desconhecem resultados de análises numéricas que considerem as manutenções superficiais necessárias desde a fase de execução da estrada.

O objetivo desse trabalho é avaliar numericamente o desempenho de estradas não pavimentadas construídas sobre solos moles, com e sem a presença de reforço geossintético, após restaurações superficiais devido a deformações excessivas. Para tanto, foram simulados os ensaios realizados por Cunha (1991).

2 Ensaio experimental

Cunha (1991) desenvolveu um modelo reduzido construído na escala 1/10, conforme apresentado na Figura 1. O referido modelo é composto basicamente pelos seguintes itens: caixa metálica com face frontal em acrílico e dimensões de 80 cm × 22 cm × 30 cm; camada drenante inferior e superior; camadas de aterro, subleito e reforço geossintético; prensa automática e duas placas metálicas para aplicação de cargas, sendo uma destas utilizada apenas na etapa de adensamento do solo mole empregado no subleito.

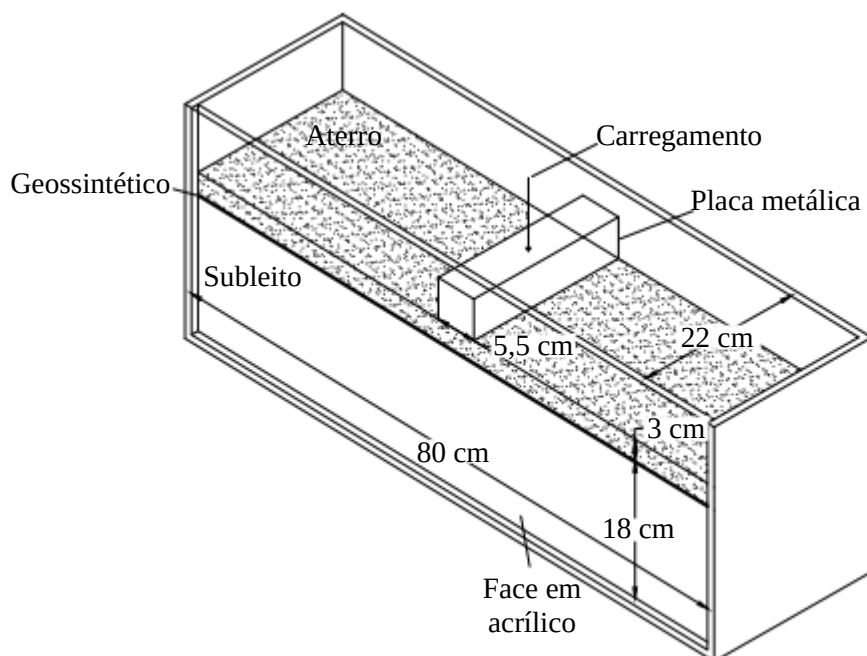


Figura 1. Modelo experimental (Cunha, 1991 – modificado).

A preparação do ensaio consistia na montagem de sucessivas camadas no interior da caixa metálica, iniciando-se pelo geossintético que atuava como drenagem de fundo e posteriormente pelas camadas de subleito, de reforço do tipo geotêxtil não tecido (quando aplicável) e da camada drenante superior para evitar a saída de material durante o adensamento, o qual foi realizado neste estágio do processo usando-se uma placa que cobria toda a área da caixa. Em seguida, procedia-se com a execução da camada de aterro pelo método de “chuva de areia”. O solo mole de fundação foi obtido por uma mistura de água e caulim, enquanto o material do aterro era composto por uma mistura de caulim e areias de fina a média.

A placa metálica era então posicionada sobre as camadas para aplicação de um carregamento monotônico centrado a uma taxa de deslocamento vertical constante de 1,5 mm/min, o que garantia a condição de rompimento não drenado do solo mole. Após atingida a capacidade de carga da estrada, a superfície do aterro era restaurada com o mesmo material utilizado inicialmente, realizando-se, portanto, o preenchimento do afundamento gerado pela sapata. Por fim, era realizada uma nova fase de carregamento, análoga à primeira. A ruptura da estrada ocorria para deslocamentos verticais da ordem de 0,15 m a 0,25 m.

3 Simulação numérica

Foram realizadas análises tensão-deformação, em condição de deformação plana, utilizando o Método dos Elementos Finitos por meio do software PLAXIS 2D. As propriedades dos materiais foram modeladas apropriadamente em função do fator de escala geométrico utilizado.

3.1 Geometria e condições de contorno

Aproveitou-se a simetria do modelo experimental para representação de apenas metade da geometria nas análises. Nas laterais do modelo foram restringidos os deslocamentos horizontais, enquanto na base restringiu-se os deslocamentos de ambas as direções (vertical e horizontal). Foi adotada uma malha, com elementos de 15 nós, refinada nas regiões próximas à aplicação do carregamento.

Os ensaios foram simulados com e sem a opção *Updated mesh* selecionada, a qual considera a formulação Lagrangiana do Método dos Elementos Finitos. Foram adotadas as seguintes etapas: determinação das tensões geostáticas na camada correspondente ao subleito; inclusão da camada de aterro, bem como do reforço geossintético e respectivos elementos de interface (no caso das análises com reforço); aplicação de um



carregamento distribuído sobre placa rígida na superfície do aterro; remoção do carregamento aplicado; inserção da camada de manutenção superficial; e reaplicação do carregamento. A Tabela 1 apresenta as etapas supracitadas numeradas em sequência e detalhadas por tipo de análise do PLAXIS 2D.

Tabela 1. Etapas da análise numérica sem reforço.

Etapa	Tipo de análise	Geometria	Carregamento
1	Procedimento K0	Subleito	-
2	Plástica	Subleito e aterro	-
3	Plástica	Subleito e aterro	Primeiro carregamento
4	Plástica	Subleito e aterro	Descarregamento
5	Plástica	Subleito, aterro e manutenção superficial	-
6	Plástica	Subleito, aterro e manutenção superficial	Segundo carregamento

A geometria da manutenção superficial, ativada na etapa 5, foi definida a partir da configuração deformada do aterro na etapa 4, ou seja, quando presente no modelo apenas a parcela de deformação plástica resultante da solicitação aplicada. Para tanto, foi incluída na geometria inicial da análise um polígono (inativado na primeira etapa de carregamento) cujo material correspondente se ajustasse à região de afundamento no aterro, de modo a simular sua restauração. A Figura 2 apresenta a disposição do aterro ao final da etapa 5, para um caso sem reforço, com destaque para as regiões de origem e destino do material de manutenção durante a simulação. Essas regiões foram identificadas, respectivamente, pelas letras “A” e “B”.

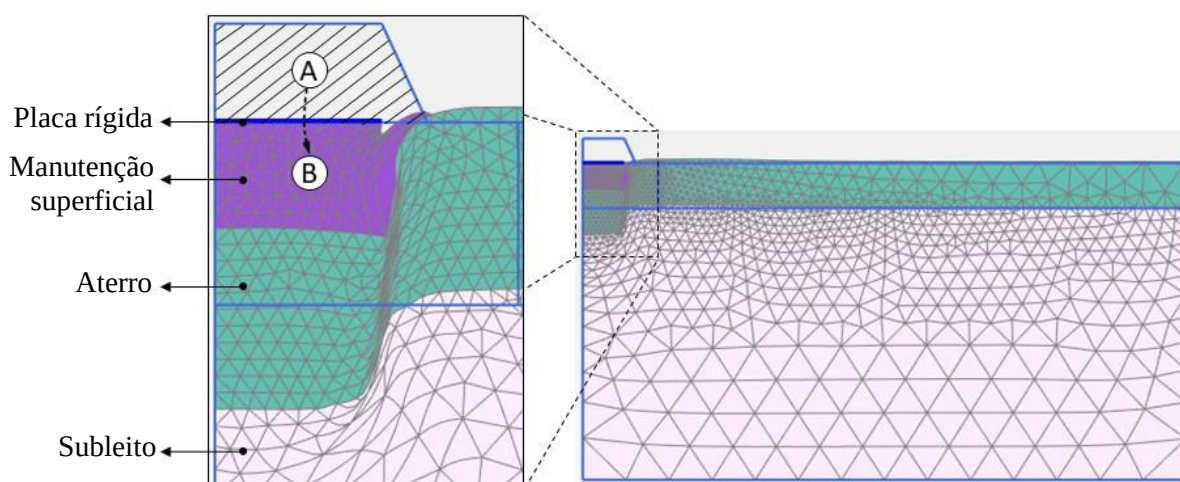


Figura 2. Geometria de um ensaio sem reforço geossintético.

3.2 Modelos constitutivos e parâmetros

Os materiais do aterro e subleito foram representados pelo modelo elástico perfeitamente plástico de Mohr-Coulomb. Os valores dos parâmetros elásticos de coeficiente de Poisson (ν) e módulo de elasticidade (E) foram obtidos por retroanálise de ensaios sem reforço geossintético. Por outro lado, os valores de coesão (c'), ângulo de atrito (ϕ') e peso específico (γ) foram obtidos a partir do trabalho de referência. Ressalta-se que, apesar de o aterro não ser constituído por um material coesivo, foi atribuído um baixo valor de coesão por motivos numéricos.

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os parâmetros utilizados nas camadas de solo. No presente trabalho, foi utilizado um valor médio de resistência não drenada para ajuste dos resultados. Adotou-se o valor observado na profundidade B', a partir de resultados do ensaio de palheta linearmente crescentes com a profundidade, onde B' é a base do trapézio de distribuição de tensões verticais na base do aterro para um ângulo de espraio (θ) de 15°. Este valor foi obtido pelos ensaios de Cunha (1991) para as estradas sem



reforço. Desta forma, a profundidade utilizada na determinação da resistência não drenada média foi obtida pela Equação 1, onde “h” é a altura da camada de aterro e “B” é a largura da placa metálica.

$$B' = B + 2 h \operatorname{tg}(\theta) = 0,071 \text{ m} \quad (1)$$

Tabela 2. Parâmetros do material do aterro.

Material	c' (kN/m ²)	φ' (°)	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν
Aterro	0,3	50	21	750	0,3

Tabela 3. Parâmetros do material do subleito.

Material	S _u (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν
Subleito	3,3	21	205	0,49

O modelo constitutivo utilizado para o reforço geossintético foi o modelo elástico, tendo como único parâmetro de entrada a rigidez à tração (EA) na ruptura. Utilizou-se na simulação o valor de 4,9 kN/m, conforme apresentado por Cunha (1991). Quanto aos elementos de interface, foi atribuído um valor igual a 0,85 para o coeficiente de interação R_{inter} do PLAXIS 2D.

4 Resultados

O desempenho das estradas foi representado por meio de gráficos de pressão na base da placa (p) em função do deslocamento vertical da superfície da estrada (δ). A pressão “p” foi normalizada pela resistência não drenada característica definida no ensaio experimental (S_u), enquanto o deslocamento “δ” foi normalizado pela largura da placa de carregamento (B), conforme apresentado nas Figuras 3 e 4.

Conforme concluído experimentalmente, as análises com restaurações superficiais, sobretudo aquelas com a função *Updated mesh*, apresentaram maior capacidade de carga última da estrada quando comparadas às análises sem manutenções. Observou-se ainda que as análises com *Updated mesh* se mostraram mais coerentes com os resultados experimentais em comparação com as análises sem essa função, sendo observada uma diferença mais pronunciada no ensaio com reforço geossintético, cujo ganho de capacidade de carga é potencializado principalmente pelo efeito membrana, mobilizado a grandes deformações.

Os resultados dessas análises (com a presença de reforço e a função *Updated mesh*) indicaram que as manutenções superficiais realizadas foram responsáveis por um aumento da força máxima de tração exercida pelo geossintético (N_{MÁX}). O valor de 0,54 kN/m encontrado na etapa 3 (primeiro carregamento) passou para 0,80 kN/m na etapa 6 (segundo carregamento), conforme apresentado na Figura 5, em que é apresentada, por etapa de carregamento, a força axial no reforço da região próxima ao eixo de simetria. Observa-se ainda que o reforço, apesar de representado pelo modelo elástico, mantém-se tracionado após a fase de descarregamento (N_{MÁX}=0,26 kN/m), o que se deve à configuração plástica do aterro posicionado logo acima e à aderência aterro-geossintético.

Quanto aos parâmetros utilizados, a resistência não drenada do subleito apresentou grande influência na capacidade de carga atingida, como esperado, mostrando a importância da adequada determinação desse parâmetro.

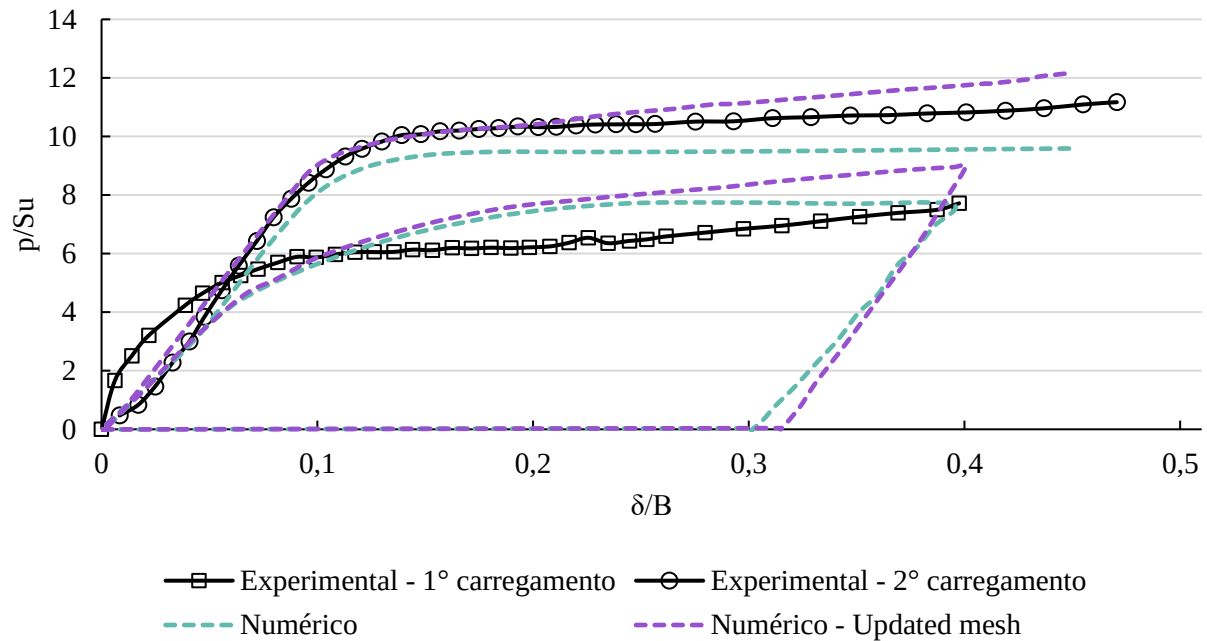


Figura 3. Ensaio sem reforço geossintético.

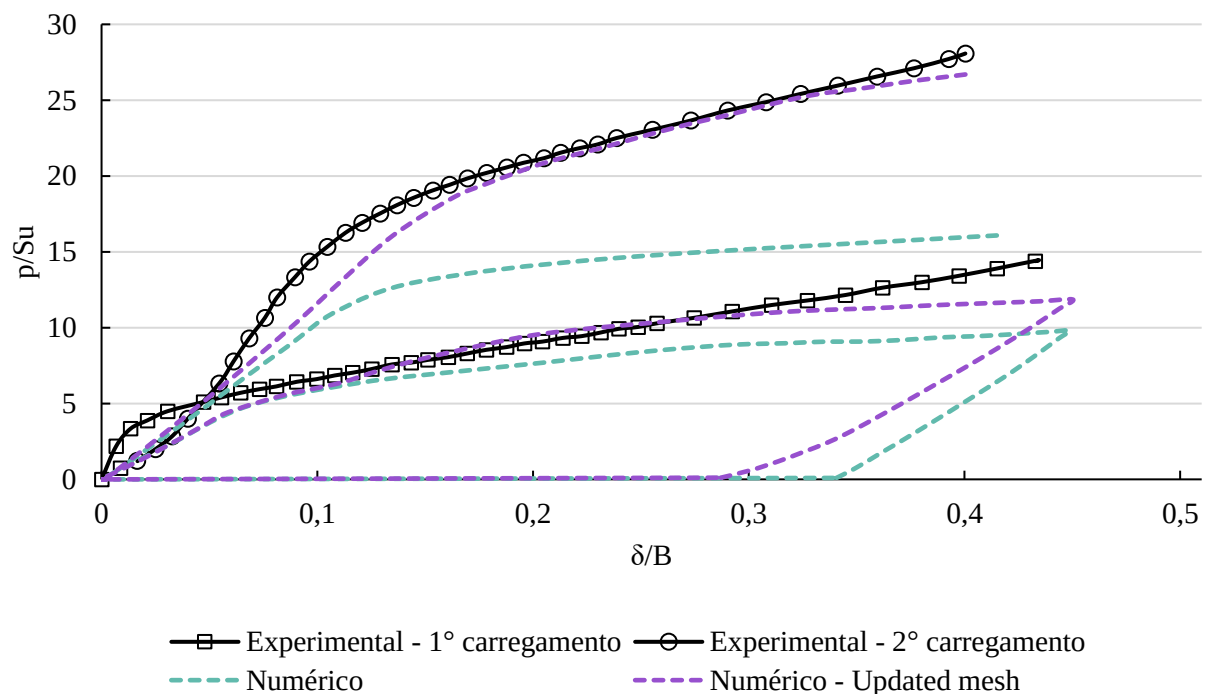


Figura 4. Ensaio com reforço geossintético.

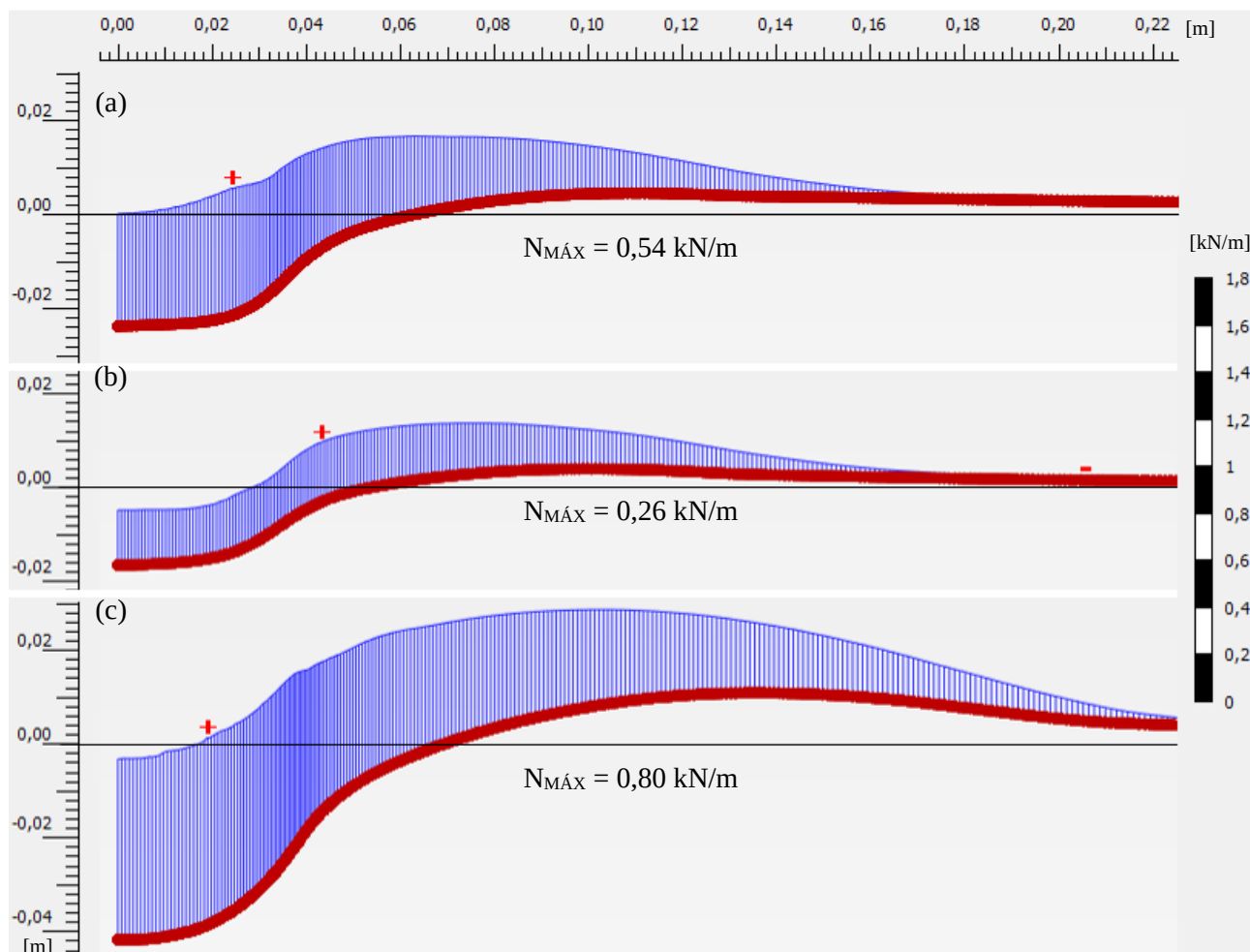


Figura 5. Força de tração no geossintético, com indicação do local de valor máximo, nas etapas de: (a) primeiro carregamento (etapa 3); (b) descarregamento (etapa 4); (c) segundo carregamento (etapa 6).

5 Considerações finais

O presente trabalho confirmou os resultados experimentais que indicam aumento da capacidade de carga de estradas não pavimentadas reforçadas e submetidas a restaurações superficiais. Ademais, pela simulação numérica e por análises paramétricas foi possível obter informações relevantes como cargas de tração no geossintético, que não puderam ser medidas nos ensaios, e influência das propriedades dos demais materiais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de Brasília e ao CNPq pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antunes, L.G.S. (2008). *Reforço de Pavimentos Rodoviários com Geossintéticos*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM- 166/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 158 p.
- Bathe, K.J. (1982). *Finite element analysis in engineering analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

- Burd, H.J. (1995). Analysis of membrane action in reinforced unpaved roads. *Canadian Geotechnical Journal*, 32: 946–956.
- Calvarano, L.S., Palamara, R., Leonardi, G., Moraci, N. (2016). Reinforced unpaved roads: parametrical analysis of design procedures, 6th European Geosynthetics Congress, 158: 296-301.
- Cunha, M.G. (1991). *Estudo do Comportamento de Estradas Vicinais Reforçadas com Geotêxtil Através de Modelos Físicos*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-001A/91, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 130 p.
- Ferreira Jr., L.G.F. (1995). *Estudo da Influência do Reforço (Geotêxtil) dos Mecanismos de Deformação e Ruptura de Estradas Não Pavimentadas Através de Modelos Físicos*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-021A/95, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 181 p.
- Góngora, I.A.G. (2011). *Utilização de Geossintéticos como Reforço de Estradas não Pavimentadas: Influência do Tipo de Reforço e do Material de Aterro*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-190/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 86 p.
- Hana, J. & Thakur, J.K. (2015). Sustainable roadway construction using recycled aggregates with geosynthetics. *Sustainable Cities and Society*, 14(1): 342–350.
- Lai, F., Chen, F., Li, D. (2018). Bearing capacity characteristics and failure modes of low geosynthetic-reinforced embankments overlying voids. *International Journal of Geomechanics*, 18(8): 0401805.
- Mehta, S. & Shah, M. V. (2021). Analysis of geogrid reinforced sub-base under grade slab for different material stacking condition by numerical modelling. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 8(7): 166-172.
- Palmeira, E.M. (1998). Geosynthetic reinforced unpaved roads on very soft soils: construction and maintenance effects. Sixth International Conference on Geosynthetics, 885–890.
- PLAXIS (2021). PLAXIS - CONNECT Edition V21.01 - Reference Manual. Delft, Netherlands.