

Análise numérica do comportamento de estradas não pavimentadas após manutenções superficiais

Numerical analysis of the behaviour of unpaved roads after surface maintenance

Camila P. J. Pinto, Ennio M. Palmeira & Juan F. R. Rebolledo

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasil, camilapaatricia@gmail.com

RESUMO: As estradas não pavimentadas são importantes meios de locomoção de pessoas e mercadorias. Basicamente, sua estrutura é formada por uma camada de aterro e outra de subleito. Os carregamentos cíclicos produzidos pelos veículos e as intempéries geram deslocamentos superficiais e deformações permanentes na estrutura. Isso precisa ser controlado para que as estradas mantenham suas condições de conforto e segurança e, por isso, elas passam por manutenções superficiais. Quando a estrutura não possui a capacidade de suporte necessária, uma das formas de viabilizar a realização da obra é a utilização de materiais de reforço como os geossintéticos. O presente estudo utilizou o software Plaxis 2D para reproduzir e estimar o comportamento de estradas não pavimentadas com manutenções superficiais sob carregamento cíclico, não reforçadas e reforçadas com geossintéticos. Uma adaptação do Método da Degradação da rigidez foi utilizada e resultados experimentais foram comparados com os numéricos obtidos. Essa comparação mostrou uma boa concordância nas curvas de deslocamento *versus* número de ciclos, mas nem tanto nas curvas de tensões verticais devido ao aumento da plastificação da estrutura simulada. A eficiência do geossintético também foi observada.

PALAVRAS-CHAVE: estrada não pavimentada, geossintéticos, manutenções superficiais, análise numérica.

ABSTRACT: Unpaved roads are important means of transportation for people and goods. Basically, its structure is formed by a layer of fill on the subgrade. The cyclic loads produced by the vehicles and the weather generate surface displacements and permanent deformations of the structure. This needs to be controlled so that the roads maintain their conditions of comfort and safety and therefore the need for surface maintenance is reduced. When the structure does not have the necessary support capacity, one of the ways to enable the realization of the work is the use of reinforcement materials such as geosynthetics. This study used the Plaxis 2D software to reproduce and estimate the behaviour of unpaved roads with surface maintenance under cyclic loading, unreinforced and reinforced with geosynthetics. An adaptation of the Stiffness Degradation method was used and experimental results were compared with the obtained numerical results. This comparison showed a good agreement, particularly for the surface displacements but not so much for the vertical stresses due to the increase in the plastification of the simulated structure. The efficiency of geosynthetics was also observed.

KEYWORDS: unpaved road, geosynthetic, surface maintenance, numerical analysis.

1 INTRODUÇÃO

As estradas não pavimentadas são responsáveis por uma grande parte da economia mundial pelo fato delas serem muito utilizadas para ligar as áreas rurais às urbanas. De forma simplificada, elas consistem de uma camada de aterro sobre o subleito, sendo a primeira a que recebe diretamente as cargas e ações externas. O subleito é o solo presente in loco, podendo também ser chamado de camada de fundação, e o aterro é formado por um material retirado de uma jazida, sendo recomendado o uso de material granular de boa resistência.

Os geossintéticos muitas vezes são utilizados como material de reforço para as estruturas onde o subleito não apresenta uma capacidade de suporte suficiente para as necessidades do projeto. Normalmente, eles são colocados na interface entre as camadas com o objetivo de reforçar e, se necessário, fazer a separação dos materiais para que eles não se misturem. Dentre os tipos de geossintéticos, os mais aplicados em obras viárias são os geotêxteis e as geogrelhas.

Nas estradas não pavimentadas é mais comum que os veículos trafeguem sobre a mesma trajetória (Palmeira, 2018). Isso acelera a degradação, formando as trilhas de roda, que posteriormente precisarão passar por manutenções superficiais. Essas deformações e deslocamentos são transmitidas para o interior da estrutura. Além do papel de reforço que o geossintético apresenta, ele também faz com que as tensões geradas sejam melhor distribuídas no sistema.

Os ensaios experimentais têm por objetivo entender o comportamento dessas estruturas, porém uma análise numérica também pode ser muito útil para fazer previsões de deslocamentos e tensões nas estradas não pavimentadas. Realizando-se uma boa definição das condições de contorno, das etapas de análise e utilizando um modelo constitutivo adequado, é possível que simulações numéricas apresentem concordância com resultados experimentais. Os custos e praticidade com uma modelagem feita em um software podem ser mais vantajosos que ensaios experimentais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estradas não pavimentadas

As estradas não pavimentadas são vias responsáveis por ligar o meio rural ao urbano, escoando produtos e dando a possibilidade das pessoas que moram em áreas mais afastadas de terem acesso a serviços básicos de saúde e educação. A superfície de rolamento dessas estradas é normalmente uma camada de aterro que está assentada sobre uma camada de subleito. A estrutura não apresenta uma camada superficial de pavimento, então as rodas dos veículos têm contato direto com o solo de aterro.

O problema surge quando a camada de subleito apresenta uma baixa capacidade portante. Algumas formas de melhorar as propriedades geotécnicas são, por exemplo, compactá-la, estabilizar com cimento, pré-adensá-lo, etc. Outra alternativa é a utilização dos geossintéticos como materiais de reforço, mais comumente as geogrelhas e os geotêxteis. Esses materiais possuem boa resistência à tração, que são esforços aos quais os solos praticamente não resistem. Khodakaramil & Moghaddam (2017) afirmam que, de forma geral, as geogrelhas apresentam melhores resultados que os geotêxteis.

Palmeira (2018) cita alguns benefícios que os geossintéticos fornecem para as estradas não pavimentadas: aumento de capacidade de carga da estrutura, menor mistura dos materiais das camadas, menores deformações superficiais e laterais da camada de aterro. O uso desses materiais ainda prolonga a vida útil das estradas e diminui a quantidade necessária de manutenções superficiais. Leonardi et al. (2020) afirmam que o efeito do interlocking, ou embricamento, gerado por geogrelhas minimiza as deformações laterais e verticais do sistema, aumenta o módulo da base e melhora a resistência na interface do geossintético.

2.1.1 Estudos anteriores

Fannin (1986) realizou testes monotônicos e cíclicos em modelos variando a espessura da camada granular, a presença ou não de reforço e a resistência não drenada. Foi observado que os casos reforçados apresentaram maior capacidade de carga do que os sem reforço. O autor também fez uma análise qualitativa e concluiu que o geossintético atuava melhor sobre solos mais fracos. Para os mais resistentes, o reforço tornava a estrutura mais dúctil, evitando uma ruptura repentina.

Trabalhos mais recentes também apresentam os benefícios da utilização de geossintéticos em estradas não pavimentadas. Palmeira & Góngora (2016) realizaram ensaios experimentais sob carregamento cíclico em uma camada granular sobre um subleito compressível. Os pesquisadores utilizaram geogrelha ou geotêxtil nos casos reforçados e observaram que os geotêxteis mostraram menos eficácia que as geogrelhas, porém ainda assim obtendo-se bem melhor desempenho que no caso sem reforço.

Pedroso et al. (2022) fizeram sete experimentos em uma estrutura composta por uma camada de base de pedregulho laterítico, ou material granular, sobre um subleito de material coesivo. Eles também utilizaram geossintéticos como reforço e a simulação foi feita com uma carga rolante. Eles observaram que a presença do geossintético melhorou a distribuição de carga e as deformações recuperáveis. Além disso, também concluíram que a tensão vertical máxima medida na interface das camadas foi reduzida com a inserção do reforço.

2.1.2 Simulações numéricas

Para que uma simulação numérica seja bem realizada, as condições de contorno e outras características precisam estar bem definidas. Definir, por exemplo, a geometria do problema, as propriedades dos materiais, o modelo constitutivo, o tipo de carregamento e as etapas de cálculo são aspectos que precisam ser levados em consideração em uma modelagem numérica (Pimentel, 2007). O método dos elementos finitos é a base de muitos softwares disponíveis para análises de estruturas geotécnicas. Exemplos desses programas são o Plaxis e o ABAQUS, muito utilizados em estudos geotécnicos.

Alguns pesquisadores utilizaram ferramentas numéricas para realizar estudos sobre as estradas não pavimentadas não reforçadas e reforçadas com geossintéticos. Leng & Gabr (2005) realizaram estudos no software ABAQUS e observaram que além da presença da geogrelha melhorar a distribuição da tensão vertical no subleito ela também diminuía a deformação vertical superficial. Os autores também notaram que a interação do reforço com o material de aterro afetava as tensões e deformações transferidas para a camada de subleito. Nuñez (2015) utilizou o programa Plaxis 2D para simular os ensaios experimentais de Góngora (2011), com e sem reforço, sob carregamentos monotônicos equivalentes. Foi observado que a simplificação do carregamento com a equivalência gerava erros de até 66% nas tensões verticais medidas no interior do subleito.

Leonardi et al. (2020) analisou, utilizando o ABAQUS, duas seções de estrada não pavimentada sob carregamento repetido, uma com geogrelha e outra sem reforço e viu que o melhor comportamento do sistema reforçado era quando o geossintético era colocado na interface do subleito com a base. Mourão (2022), com o Plaxis 2D, também realizou simulações nessas estradas sob carga monotônica. Em seu estudo, uma das suas análises foi comparar a quantidade de material utilizado nas manutenções do caso reforçado e não reforçado.

2.2 Método da degradação da rigidez

Analisar modelos que levam em consideração o número de ciclos de carga é uma necessidade para o aperfeiçoamento dos estudos em estradas não pavimentadas. Huurman (1997) descreve o comportamento da deformação permanente considerando a quantidade de ciclos e as tensões. Achmus et al. (2009), em seus estudos observou que, no decorrer dos ciclos de carga, as deformações plásticas poderiam ser associadas com uma redução da rigidez secante do solo. Os autores consideraram a fórmula de Huurman (1997) (equação 1) e aplicaram essa redução da rigidez secante e, assim, definiram a deformação permanente para N ciclos ($\epsilon_{cp,N}^a$) considerando a deformação permanente para o primeiro ciclo ($\epsilon_{cp,N=1}^a$), o número de ciclos (N), as tensões principais máximas para o estados de tensões cíclico ($\sigma_{1,cyc}$) e de ruptura estática ($\sigma_{1,sf}$), bem como os parâmetros materiais do modelo (b_1 , b_2), como mostrado na Equação 1.

$$\epsilon_{cp,N}^a = \epsilon_{cp,N=1}^a \cdot N^{b_1} \left(\frac{\sigma_{1,cyc}}{\sigma_{1,sf}} \right)^{b_2} \quad (1)$$

3 METODOLOGIA

As simulações numéricas realizadas foram as de ensaios experimentais realizados por Antunes (2008). O equipamento utilizado foi uma caixa metálica de dimensões 1.6 m x 1.6 m x 1.2 m. Foi aplicada uma carga cíclica de 40 kN em uma placa rígida de 30 cm de diâmetro, equivalente a uma pressão de 560 kPa, sob uma frequência de 1 Hz. A camada de aterro/base foi uma brita e possuía uma espessura de 20 cm, sendo colocada acima de uma camada de subleito/fundação, um material coesivo e com uma espessura total de 60 cm. Nos ensaios reforçados, os geossintéticos foram colocados na interface subleito-base e ancorados na camada de base.

A instrumentação foi composta por LVDTs localizados na superfície da camada de aterro que mediam os deslocamentos verticais superficiais. Tensões totais e deformações também foram medidas por células de tensão e extensômetros localizados a 0,30, 0,50 e 0,70 m de profundidade no subleito. Três casos experimentais foram realizados: um caso sem reforço, outro reforçado com geotêxtil e outro com geogrelha. Cada caso foi dividido em três ensaios: ensaio padrão, ensaio 1, ensaio 2. O critério de parada de cada ensaio foi um deslocamento vertical superficial de 25 mm. Atingido esse valor, o ensaio era parado, a região deformada era preenchida com a mesma brita do aterro inicial, caracterizando a chamada manutenção 1. A aplicação do carregamento cíclico era novamente iniciada, e assim o ensaio 1 era feito com o mesmo critério de parada até a segunda manutenção ser necessária, a partir da qual se realizava o ensaio 2.

Os três casos descritos foram simulados numericamente no programa Plaxis sob condição de deformações axissimétricas. Apenas o ensaio padrão e o ensaio 1 foram simulados numericamente, pois ao final deste último a estrutura já estava extremamente plastificada e os valores de tensões obtidos estavam muito imprecisos. O modelo constitutivo utilizado para as duas camadas de solo foi o de Mohr-Coulomb e para os geossintéticos, o modelo elástico. As propriedades dos solos variaram a cada fase, o módulo de rigidez a tração da geogrelha foi de 600 kN/m e do geotêxtil 450 kN/m. Os geossintéticos foram modelados com o

elemento *geogrid* instalado entre o aterro e o subleito, seguindo o realizado no ensaio experimental.

O método da degradação da rigidez foi adaptado, pois ele só considera a rigidez secante. No presente estudo também foi considerado a degradação dos parâmetros de resistência das camadas de solo. A densidade da malha de elementos finitos escolhida foi a média, consistindo em elementos triangulares de 15 nós e 12 pontos de Gauss e na área mais próxima ao carregamento houve um refinamento. As condições de contorno das laterais tiveram restrições de deslocamento horizontal, na base houve restrição de deslocamento horizontal e vertical e, no topo, nenhuma restrição. Os deslocamentos que chegam às bordas foram pequenos, sendo assim, a influência das condições de contorno não foi significativa. Vale ressaltar que as condições de contorno respeitaram àquelas do ensaio simulado.

Cada fase do software foi equivalente a uma quantidade de ciclos e as camadas de solo receberam propriedades referentes àquela fase. Com o passar das fases houve uma degradação dos parâmetros de resistência e do módulo de elasticidade dos materiais. Para cada fase da simulação numérica obtiveram-se os valores de deslocamentos superficiais máximos e os valores de tensões a 0,30 m de profundidade. A partir desses resultados, construíram-se as curvas de deslocamento superficial *versus* número de ciclos e tensão a 0,30 m de profundidade *versus* número de ciclos. Os resultados numéricos foram então comparados com os experimentais.

As Figuras 1 e 2 mostram alguns resultados típicos obtidos. Para facilitar a compreensão, a nomenclatura dos ensaios experimentais e numéricos seguiram o formato AA-BB-CC (Tabela 1).

Tabela 1. Nomenclatura - ensaios experimentais e numéricos.

Grupo	Nomenclatura	Abreviação
AA	SEM REFORÇO	SR
	COM GEOTÊXTEL	GT
	COM GEOGRELHA	GR
BB	ENSAIO PADRÃO	EP
	ENSAIO 1	E1

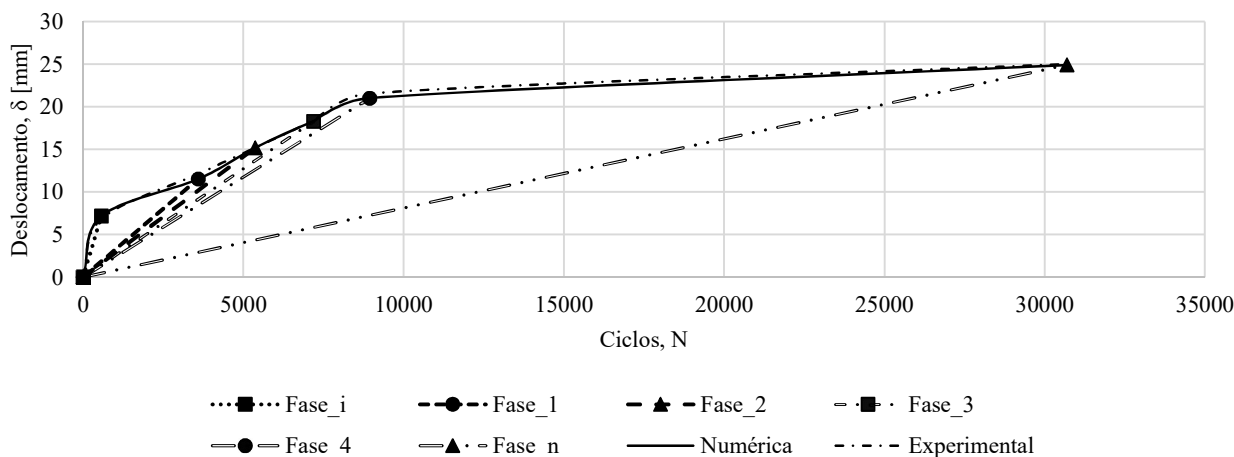


Figura 1. Curva numérica obtida a partir dos resultados de deslocamentos verticais superficiais referentes a cada fase e comparativo com a curva experimental.

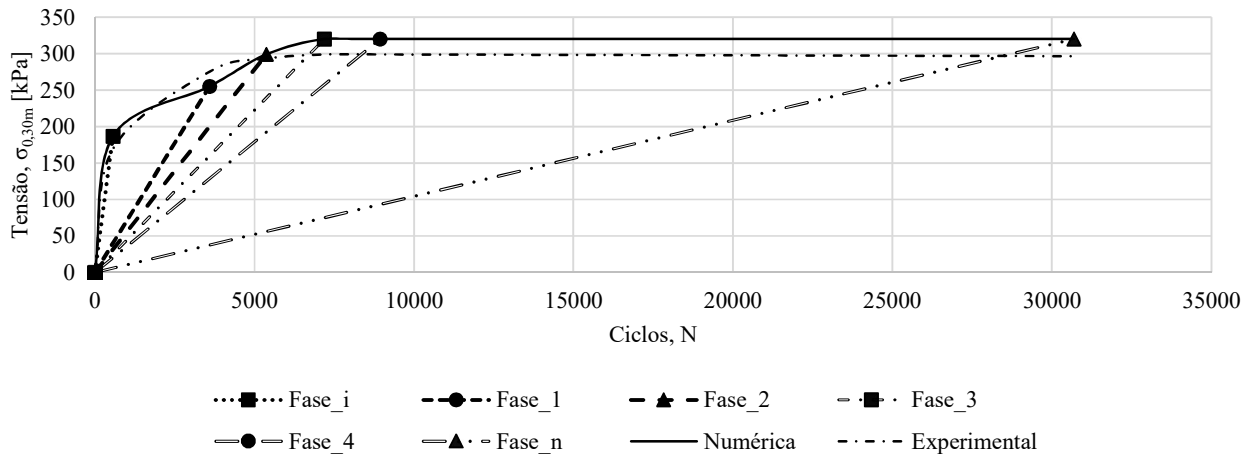


Figura 2. Curva numérica obtida a partir dos resultados de tensões verticais a 0,30 m de profundidade referentes a cada fase e comparativo com a curva experimental.

Grupo	Nomenclatura	Abreviação
CC	SIMULAÇÃO NUMÉRICA X	NX
	EXPERIMENTAL	EXP

O ensaio experimental do caso sem reforço atingiu 30.691 ciclos no ensaio padrão e depois mais 25.164 ciclos no ensaio 1. Já o caso reforçado com geotêxtil atingiu 89.822 ciclos no ensaio padrão e depois mais 58.709 ciclos no ensaio 1. Por fim, o caso com geogrelha atingiu 310.862 ciclos no ensaio padrão e depois mais 207.253 ciclos no ensaio 1.

O caso sem reforço no ensaio padrão foi composto das fases: Fase Inicial, Fase 1, Fase 2 ..., Fase 10. No ensaio 1 ele foi formado pelas fases: Fase M1-Inicial, Fase M1-1, Fase M1-2..., Fase M1-8. O caso com geotêxtil no ensaio padrão foi composto das fases: Fase Inicial, Fase 1, Fase 2 ..., Fase 9. No ensaio 1 ele foi formado pelas fases: Fase M1-Inicial, Fase M1-1, Fase M1-2..., Fase M1-8. O caso com geogrelha no ensaio padrão foi composto das fases: Fase Inicial, Fase 1, Fase 2 ..., Fase 8. No ensaio 1 ele foi formado pelas fases: Fase M1-Inicial, Fase M1-1, Fase M1-2..., Fase M1-8.

Ao realizar a retroanálise para encontrar as propriedades de cada fase nas camadas de solo, as simulações passaram por uma análise de refinamento para que as curvas numéricas de deslocamento e as de tensões verticais concordassem com as experimentais.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Foi observado que a presença do geotêxtil e da geogrelha aumentavam a capacidade de suporte da estrutura como um todo, fazendo com que o sistema conseguisse suportar mais ciclos de carga para o mesmo critério de parada de 25 mm de deslocamento vertical superficial. A Figura 3 apresenta as curvas de variação dos deslocamentos verticais superficiais para os três casos no ensaio padrão. Enquanto o caso sem reforço atingiu 25 mm para apenas 30.691 ciclos, o caso com geotêxtil atingiu esse mesmo valor para 89.822 ciclos e o caso com geogrelha, 310.862 ciclos. Ou seja, o caso reforçado com geogrelha suportou, aproximadamente, dez vezes mais ciclos que o caso sem reforço para se atingir o mesmo valor de deslocamento. Além disso, a partir da Figura 3 é possível

ver que os resultados das simulações numéricas concordaram bem com as medições dos ensaios experimentais.

A Figura 4 mostra os resultados numéricos para as tensões verticais a 0,30 m de profundidade para o ensaio padrão de cada caso. Observa-se que no caso sem reforço se atingiu em torno de 320 kPa para aproximadamente 25.000 ciclos, no caso com geotêxtil se atingiu 250 kPa para pouco menos de 90.000 ciclos e no caso com geogrelha se atingiu aproximadamente 270 kPa para mais de 310.000 ciclos. Isso indica que a presença do reforço reduziu as tensões que chegam no subleito mesmo para uma maior quantidade de ciclos. A Figura 4 também mostra uma comparação entre os resultados numéricos e os experimentais, com padrões de comparações semelhantes aos da Figura 3.

Os platôs, no caso reforçado com geogrelha, observados nas Figuras 3 e 4 são explicados pelo que aconteceu no ensaio. Inicialmente, a geogrelha estava funcionando de forma eficiente como reforço até que, a partir de em torno de 243.114 ciclos, os grãos de brita do aterro começaram a quebrar de forma significativa. Este fato levou a um aumento brusco nos deslocamentos superficiais e nas tensões verticais a 0,30 m de profundidade.

A Tabela 2 mostra os parâmetros utilizados nas fases da simulação no início e no final de cada ensaio (ensaio padrão e ensaio 1) nos três casos. Ao final do ensaio 1, a estrutura já se encontrava extremamente plasticada e a redução que os parâmetros tiveram que sofrer representou isso. Os valores de módulo de elasticidade, tanto da camada de aterro quanto do subleito, passaram a ser menores ou iguais a 6.000 kPa. Os ângulos de atrito da camada do aterro terminaram com valores em torno de 40° e da camada do subleito em torno de 25°. O valor final da coesão do subleito foi de, aproximadamente, 12 kPa. A camada de manutenção atingiu valores de 38° de ângulo de atrito em todos os casos simulados.

A redução dos parâmetros se deu de forma diferente nos três casos, principalmente pelo fato de que as fases correspondiam a quantidade de ciclos diferente. Como anteriormente citado, a presença do reforço aumentou a capacidade de suporte da estrutura

e isso também foi representado pelo ângulo de atrito da camada de aterro na fase inicial dos casos reforçados.

geotêxtil. Ao final de cada ensaio padrão a rigidez do aterro foi próximo a 6.000 kPa.

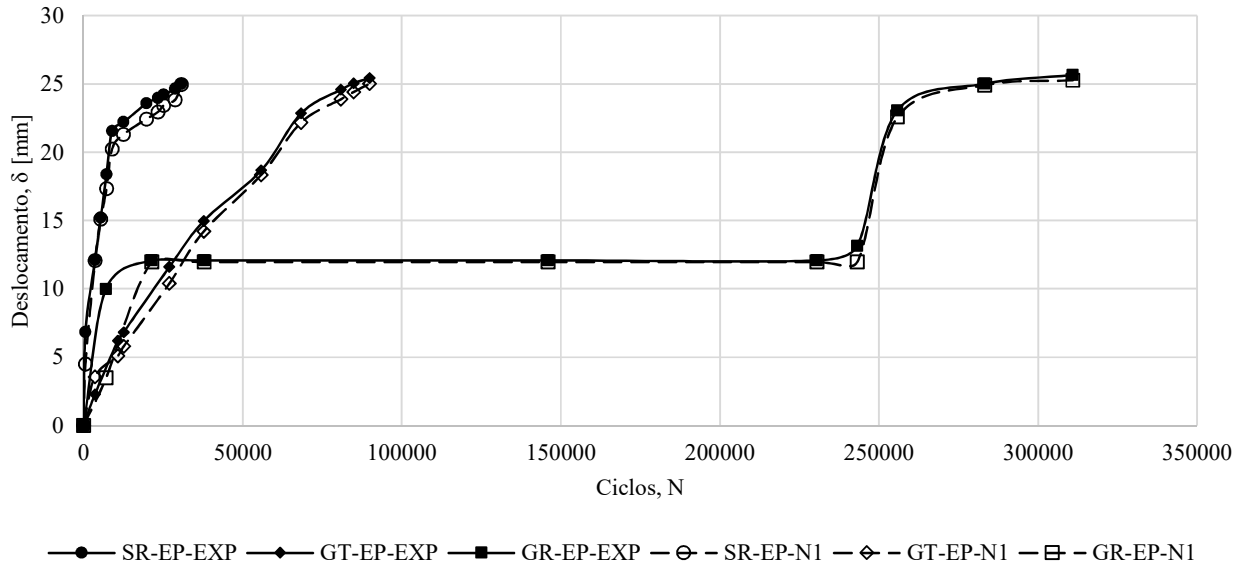


Figura 3. Variação do deslocamento vertical superficial com o número de ciclos no ensaio padrão.

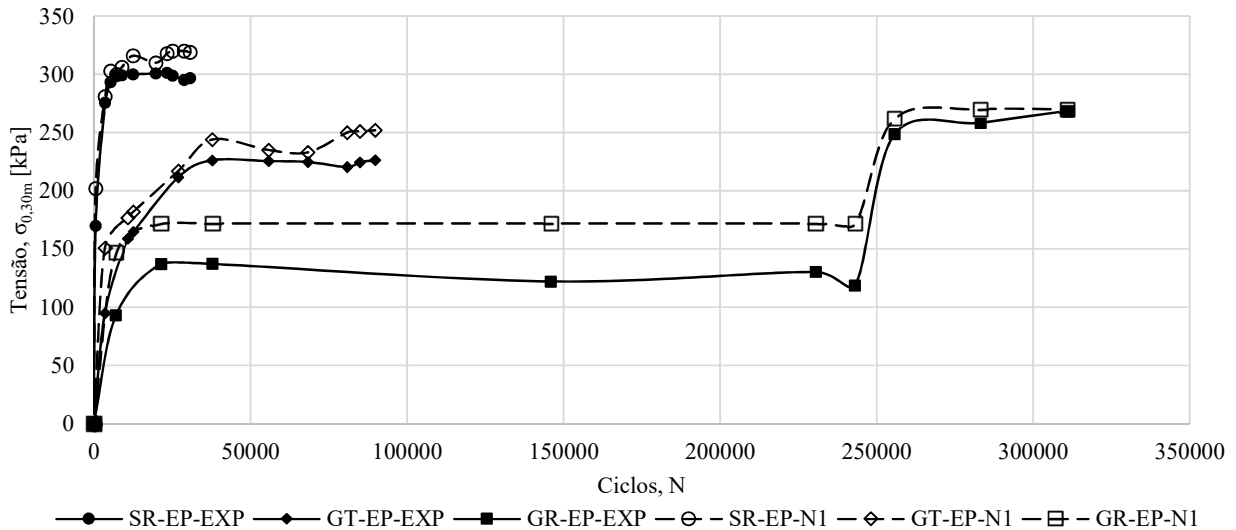


Figura 4. Variação das tensões verticais a 0,30 m de profundidade com o número de ciclos no ensaio padrão.

4.1 Redução dos valores de módulo de elasticidade

A Figura 5 mostra a redução do módulo de elasticidade das camadas de aterro e de subleito. Uma queda brusca ocorreu, aproximadamente, nos primeiros 3.500 ciclos no caso sem reforço, 21.000 ciclos do caso com geogrelha e 11.000 ciclos no caso com

Em relação ao subleito, o valor do seu módulo de elasticidade também sofreu redução, mas, em geral, não foi tão brusca quanto a do aterro, isso porque a camada de aterro era a que recebia diretamente o impacto do carregamento. O módulo do subleito foi em torno de 9.000 kPa para 31.250 ciclos no caso sem reforço, 45.000 ciclos no caso com geotêxtil e 243.000 ciclos no caso com geogrelha.

Observa-se que a tendência de redução dos valores de módulo de elasticidade do aterro e do subleito ao longo dos ensaios no caso reforçado com geogrelha foi similar. O caso sem reforço foi o que apresentou maiores diferenças nessa tendência.

4.2 Redução dos valores de ângulo de atrito

Em relação ao ângulo de atrito do aterro, os valores nos três casos foram bem distintos. As curvas de variação com o número de ciclos apresentaram formatos parecidos. Ou seja, a tendência de redução aparenta ser similar entre estruturas sem reforço e com reforço. A camada de aterro apresentou um valor de 40° para 31.250 ciclos no

Tabela 2. Variação dos parâmetros de cada camada no início e final de cada ensaio para cada caso.

Caso	Fase	Ciclos	Aterro		Subleito			Manutenção I	
			E [kPa]	ϕ [°]	E [kPa]	ϕ [°]	c [kPa]	E [kPa]	ϕ [°]
SR-EP-N1	Inicial	569	55.000	52	20.000	33	40	-	-
	10	30.691	5.900	44	10.000	30	20	-	-
SR-E1-N1	M1-Inicial	559	5.800	41	8.750	26	17	55.000	52
	M1-8	25.164	5.500	41	5.500	26	13	5.000	38
GT-EP-N1	Inicial	3.552	55.000	63	20.000	33	40	-	-
	9	89.822	5.900	51	5.900	30	20	-	-
GT-E1-N1	M1-Inicial	5.428	5.900	44	5.900	25	15	8.000	44
	M1-8	58.709	5.900	40	5.900	25	12	5.900	38
GR-EP-N1	Inicial	7.060	55.000	65	20.000	33	40	-	-
	8	310.862	6.000	47	7.300	30	20	-	-
GR-E1-N1	M1-Inicial	3.345	6.000	44	7.000	30	20	10.000	45
	M1-8	207.253	5.900	40	6.000	25	11	5.000	38

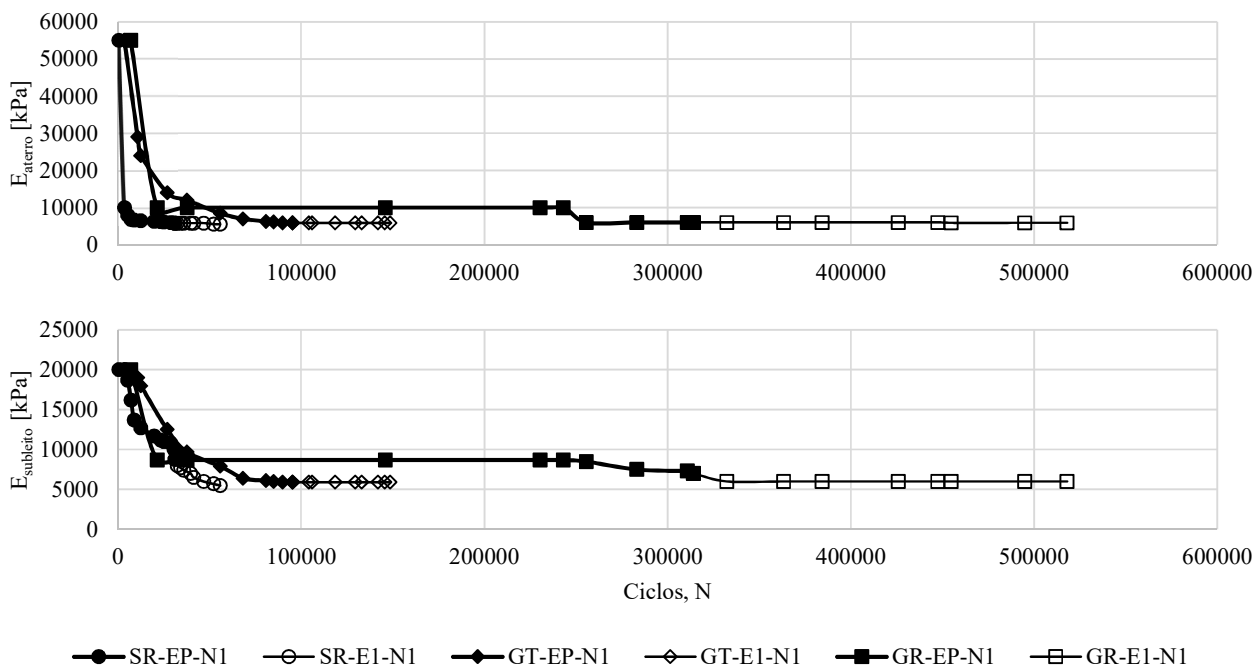


Figura 5. Redução dos valores de módulo de elasticidade do aterro e do subleito com o número de ciclos.

caso sem reforço, 130.000 ciclos no caso com geotêxtil e 426.000 ciclos no caso com geogrelha (valores de número de ciclos aproximados). A passagem dos ensaios padrão para os ensaios 1 foram acompanhados também de uma redução de valores desses ângulos de atrito (Figura 6).

Já se referindo ao ângulo de atrito do subleito, o comportamento não foi o mesmo do aterro. Durante uma grande faixa de número de ciclos, os três casos apresentaram valores iguais. Além disso, as curvas de variação também apresentaram formatos semelhantes. A partir da Figura 6, observa-se que o valor de 30° foi atingido nos três casos entre 9.000 e 30.500 ciclos para o caso sem reforço, 38.000 e 90.000 ciclos para o caso com geotêxtil e entre 21.500 e 314.000 ciclos para o com geogrelha.

4.3 Redução dos valores de coesão

Por fim, a coesão do subleito apresentou formatos de curva de variação similares às do ângulo de atrito da camada. No entanto, os valores entre os três casos foram muito distintos. A coesão de 20 kPa, por exemplo, ocorreu entre 9.000 e 30.500 ciclos no caso sem reforço, 27.000 e 90.000 ciclos para o caso com geotêxtil e entre 256.000 e 314.000 ciclos para o caso com geogrelha (Figura 7).

5 CONCLUSÕES

A simulação numérica se mostrou satisfatória, apesar de certas

limitações identificadas. As curvas de variação do deslocamento superficial em função do número de ciclos apresentaram uma significativa concordância com os resultados obtidos experimentalmente. Por outro lado, as medições das tensões verticais a 0,30 m de profundidade não mostraram uma concordância tão robusta. Alguns desvios entre as previsões numéricas e os resultados experimentais podem ter sido influenciados por possíveis imprecisões nas medições realizadas durante os ensaios, principalmente no que diz respeito às células de tensões totais.

Os casos reforçados apresentaram resultados significativamente melhores em comparação aos casos sem reforço. A redução de parâmetros foi mais acentuada na camada de aterro, devido ao seu contato direto com o carregamento. Os resultados obtidos mostraram que reduções mais significativas nos parâmetros foram necessárias no caso sem reforço, em comparação aos casos reforçados com geossintéticos, para se estabelecer uma comparação satisfatória entre as previsões e as medições. Isso ressalta a contribuição do reforço em retardar a redução de valores dos parâmetros geotécnicos relevantes para o desempenho de estradas não pavimentadas sobre subleitos fracos.

6 AGRADECIMENTOS

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

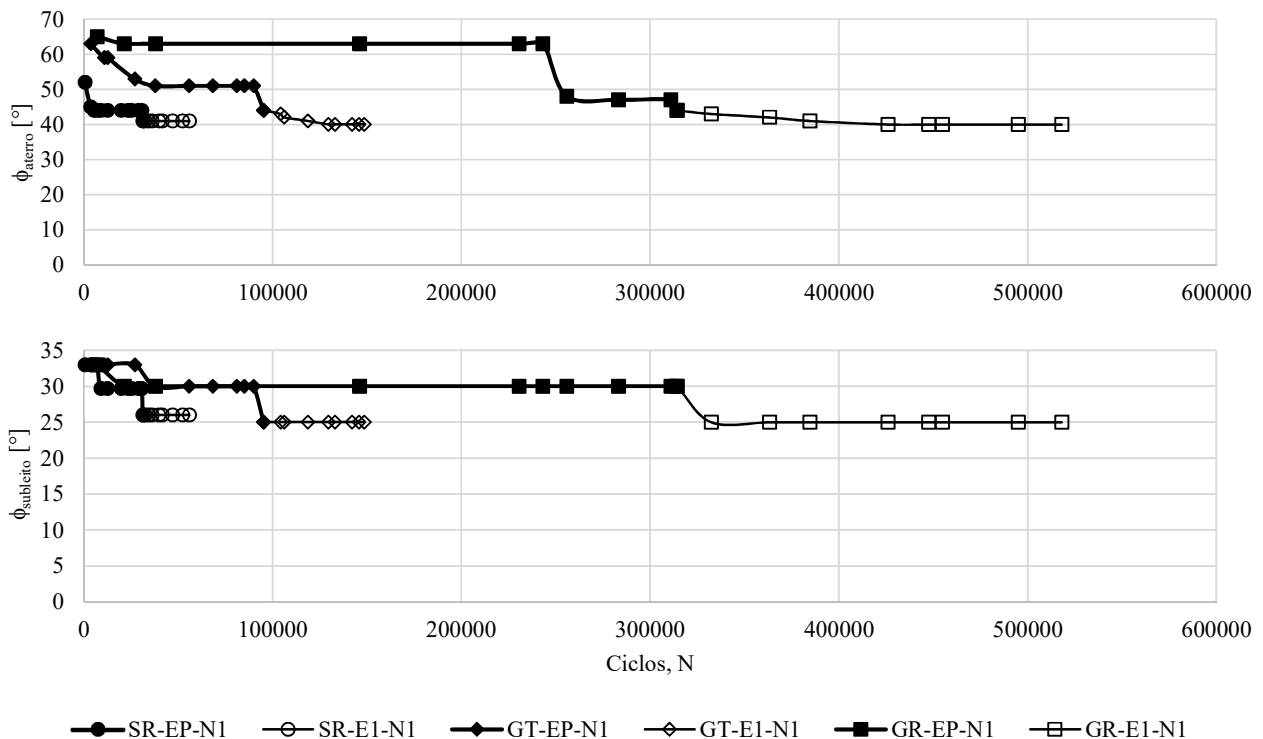


Figura 6. Redução dos valores de ângulo de atrito do aterro e do subleito com o número de ciclos.

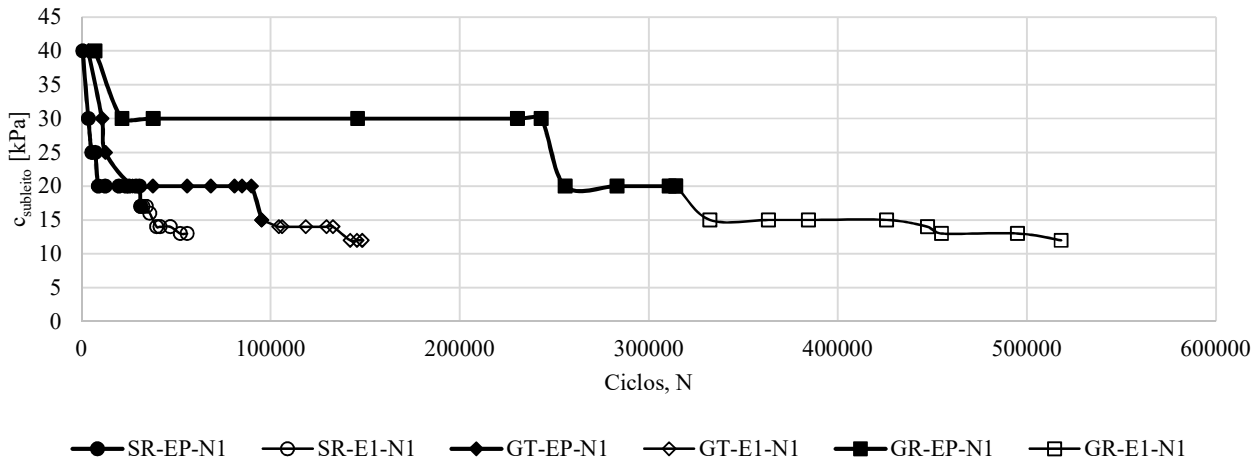


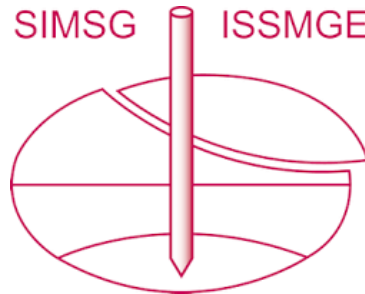
Figura 7. Redução dos valores de coesão do subleito com o número de ciclos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achmus, M., Kuo, Y., Rahman, K. A. (2009). Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load. *Computer and Geotechnics*, 36 (2009) 725-735.
- Antunes, L.G.S. (2008). Reforço de Pavimentos Rodoviários com Geossintéticos. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-166/08, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 158p.
- Calvarano, L.S., Leonardi, G., Palamara, R. (2017). Finite element modelling of unpaved road reinforced with geosynthetics. *Procedia Engineering*, 189 (2017): 99-104.
- Fannin, R.J. (1986). Geogrid reinforcement of granular layers on soft clay. PhD Thesis, University of Oxford, England.
- 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, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 76p.
- Huurman, M. (1997). Permanent deformation in concrete block pavements. PhD Thesis, Delft University of Technology, 423p.
- Khodakaramil, M.I., Moghaddam, H.K. (2017). Evaluation the Performance of Rehabilitated Roadway Base with Geogrid Reinforcement in the Presence of Soil-Geogrid-Interaction. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 5:33-46.
- Leng, J., Gabr, M.A. (2005). Numerical analysis of stress-deformation response in reinforced unpaved road sections. *Geosynthetics International*, 2005(12), 111-119.
- Leonardi, G., Lo Bosco, D., Palamara, R., Suraci, F. (2020). Finite Analysis of Geogrid-Stabilized Unpaved Roads. *Sustainability* 2020, 12, 1929.
- Mourão, B.G. (2022). Análise Numérica de Estradas não Pavimentadas Submetidas a Manutenções Superficiais, Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-380/22, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80p.
- Naylor, D.J., Pande, G.N., Simpson, B., Tabb, R. (1981). Finite elements in geotechnical engineering, Swansea: Pineridge Press, U.K., 245p.
- Núñez, J. F. J. (2015). Contribuições ao Estudo do Comportamento de Estradas não Pavimentadas com e sem Reforço Geossintético por meio de Análises Numéricas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-

- Palmeira, E.M., Góngora, I.A.G. (2016). Assessing the influence of soil-reinforcement interaction parameters on the performance of a low fill on compressible subgrade. part I: fill performance and relevance of interaction parameters. *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.*, 2(1):1-17.
- Pedroso, G.O.M., Ramos, G., Silva, J.L. (2022). Evaluating geosynthetic base stabilization on lateritic gravel and granular material under cyclic moving wheel loads. *Case Studies in Construction Materials*, 16: e00880.
- Pimentel, K.C.A. (2007). Estradas Não-pavimentadas e Ferrovias Reforçadas com Geossintéticos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-042/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 293p.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.