

ANÁLISE NUMÉRICA DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE UM ATERRO ESTAQUEADO REFORÇADO COM GEOGRELHA SOBRE SOLO COMPRESSÍVEL

Ítalo Santos Guimarães (FECIV-UFU) E-mail: italosantos1203@gmail.com
Giovana Bizão Georgetti (FECIV-UFU) E-mail: ggeorgetti@ufu.br

Resumo: A execução de aterros sobre solos compressíveis apresenta grandes preocupações em relação aos deslocamentos e tensões. Para mitigar tais problemas, os aterros estaqueados se mostram uma solução interessante. A técnica em questão consiste em utilizar estacas para controlar recalques e transmitir o carregamento do aterro para camadas do solo mais resistentes, além de utilizar geogrelhas para aumentar a eficiência desse processo. Neste contexto, este trabalho faz uso da modelagem numérica para contribuir com o entendimento da atuação dos reforços de estacas e geogrelha na estabilidade dos aterros sobre solos com baixa capacidade de suporte. O modelo foi baseado em um perfil de terreno da cidade de Uberaba-MG, que contém uma camada de 13 m de argila com baixo N_{spt} , e seguiu métodos tradicionais de dimensionamento para então ser executada uma análise paramétrica. Os resultados indicaram que a presença das estacas e a altura do aterro foram determinantes para o controle dos recalques diferenciais. Além disso, a presença da geogrelha teve papel mais determinante na segurança contra a ruptura do aterro do que no controle de recalques. Por fim, conclui-se que ambos os elementos de reforço, estacas e geogrelha, contribuíram para a estabilidade do aterro sobre o solo argiloso.

Palavras-chave: Aterro estaqueado, geogrelha, análise numérica, solo compressível.

NUMERICAL ANALYSIS OF STRESS-STRAIN IN A PILED EMBANKMENT REINFORCED WITH GEOGRID OVER COMPRESSIBLE SOIL

Abstract: The construction of embankments over compressible soils raises significant concerns regarding displacements and stresses. To mitigate these issues, piled embankments present an interesting solution. This technique involves using piles to control settlements and transfer the embankment load to more resistant soil layers, as well as using geogrids to increase the efficiency of this process. In this context, this study employs numerical modeling to enhance the understanding of the role of pile and geogrid reinforcements in the stability of embankments over low-bearing-capacity soils. The model was based on a soil profile from the city of Uberaba, MG, which contains a 13 m layer of clay with low N_{spt} values, and followed traditional design methods before conducting a parametric analysis. The results indicated that the presence of piles and the height of the embankment were critical in controlling differential settlements. Additionally, the geogrid played a more decisive role in the safety against embankment failure than in settlement control. Finally, it is concluded that both reinforcement elements, piles and geogrid, contributed to the stability of the embankment on clayey soil.

Keywords: Piled embankments, geogrid, numerical analysis, compressible soil.

1. INTRODUÇÃO

Projetos de aterros sobre solos moles são um dos mais complexos e desafiadores dentro da engenharia geotécnica. As técnicas construtivas desenvolvidas para esse tipo de situação são diversas, mas quando não se dispõe de muito tempo para se estabilizar a área de implantação com solo mole, há, dentre as opções de soluções, uma que permite que a construção do aterro possa ser iniciada logo após a aplicação da solução (ALMEIDA e MARQUES, 2010). A técnica em questão é o aterro sobre estacas, que consiste na utilização de colunas para aumentar a resistência na camada compressível e garantir a estabilização do aterro. Nesse processo, as tensões são transmitidas para as estacas pelo efeito de arqueamento (TERZAGHI, 1943) e dessas para um solo competente, em profundidade.

O sucesso do sistema está na transmissão das cargas do aterro para as estacas, que está diretamente relacionada com o espaçamento entre as colunas, ou seja, quanto mais próximas estiverem, melhor será o caminhamento de tensões para a estacas.

A eficiência dessa solução pode ser aumentada utilizando reforço sobre as estacas, geralmente geogrelhas. O reforço é disposto sobre os capitéis de forma a distribuir para as estacas as cargas que não foram transmitidas devido ao efeito de arqueamento, possibilitando assim um maior espaçamento entre as estacas (ALMEIDA e MARQUES, 2010).

Entretanto, para o correto dimensionamento do aterro estaqueado com plataforma de geogrelha, é preciso considerar diversas variáveis envolvendo os materiais e elementos, tais como: distância entre capitéis, módulo de rigidez das geogrelhas, altura de aterro, parâmetros do aterro (BS 8006, 2010).

Assim, há na literatura trabalhos que discutem este assunto como, por exemplo, o artigo produzido por Giffoni et al. (2016), no qual traz uma discussão acerca de um aterro estaqueado analisando resultados de recalques e distribuição de tensões. O artigo, por conseguinte, trouxe análises que relacionam a altura do aterro com a presença dos deslocamentos verticais diferenciais de modo a verificar a existência da altura crítica para se obter recalques diferenciais nulos. Além disso, discutiu sobre a distribuição de cargas no aterro, no qual concluiu-se que há uma concentração de tensões verticais sobre os capitéis.

Ademais, os estudos feitos por Carreira et al. (2016) e McGuire et al. (2020), também discutem o comportamento de aterros estruturados, complementando as análises de recalque e tensão de Giffoni et al. (2016). Carreira et al. (2016) observaram a grande influência do espaçamento no controle de recalques, enquanto McGuire et al. (2020) verificaram uma baixa eficiência do reforço de geogrelha na redução dos valores de recalques e tensões.

Neste contexto, este trabalho explora as variáveis altura de aterro, espaçamento entre as estacas e resistência do reforço no dimensionamento de aterros estaqueados com aplicação de geogrelha utilizando da modelagem numérica em um estudo paramétrico a fim de se analisar o comportamento das tensões, recalques e estabilidade global do aterro.

2. CARACTERÍSTICAS DO MODELO

Para a análise, considerou-se um galpão retangular de dimensões 20 m x 20 m, que aplica uma sobrecarga uniformemente distribuída de 60 kPa (valor usual para galpões) sobre um aterro de 3 m de espessura e taludes laterais com inclinação de 1:2,5, apoiado sobre um subsolo de baixa capacidade de suporte (Figura 1). O subsolo corresponde a um perfil de terreno da cidade de Uberaba-MG, no qual os primeiros 13 m são classificados como argila siltosa muito mole de $N_{spt} = 2$, seguidos por uma camada de argila siltosa de $N_{spt} > 20$, aqui denominada solo competente, na qual foi interrompido o ensaio. O nível d'água foi localizado a 8 metros de profundidade.

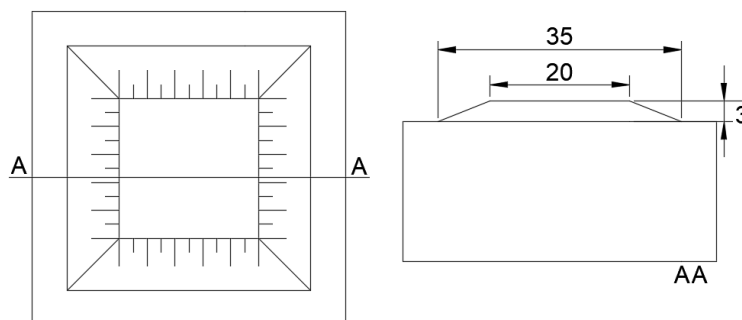


Figura 1 – Dimensões do aterro sobre o subsolo.

Os parâmetros geotécnicos do subsolo foram estimados a partir dos valores de N_{spt} , de acordo com Joppert (2007). Já para a parametrização do solo de aterro e do concreto das estacas, foram tomados valores usuais. Considerando que na modelagem numérica, os materiais foram representados pelo modelo elástico-linear e o critério de resistência de Mohr-Coulomb, na Tabela 1 são apresentados os parâmetros necessários, sendo peso específico (γ), coesão (c), ângulo de atrito (ϕ), coeficiente de Poisson (ν) e módulo de elasticidade (E) para cada material.

Tabela 1 – Parâmetros dos materiais.

Material	γ	c	ϕ	ν	E
	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	-	[MPa]
Aterro	18	0	30	0,3	20
Solo compressível	17	5	20	0,4	1,25
Solo competente	20	50	25	0,3	20
Concreto	25	45	30	0,2	30000

A partir da geometria inicial e parâmetros dos materiais, as estacas foram dimensionadas usando o método de Aoki e Veloso (1975) para capacidade de carga da estaca isolada e o método de Feld (FELD, 1943 *apud* ALBURQUERQUE e GARCIA, 2022) para a eficiência da resistência lateral da estaca em grupo. Constatou-se a necessidade de 100 estacas de diâmetro 0,5 m e comprimento 13 m, que foram dispostas em 10 linhas de 10 unidades equiespaçadas de 2,45 m. Além disso, foi adotado o uso de capitéis quadrados com 1,0 m de lado e 0,3 m de espessura. Na Figura 2 é ilustrada a geometria resultante.

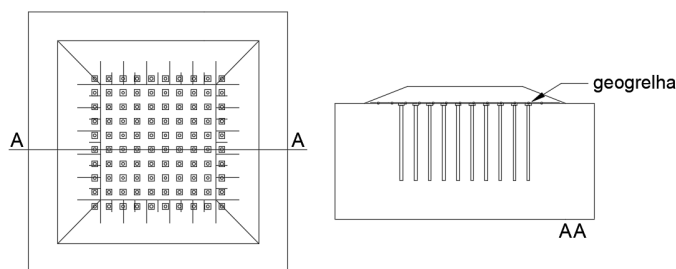


Figura 2 – Configuração do estaqueamento e posição do reforço em geogrelha.

Em seguida, foi realizado o dimensionamento do reforço com geogrelha pela BS 8006 (2010). A resistência mínima para o reforço, posicionado sobre os capitéis, foi calculada em 200 kN/m. Para modelagem numérica, foram utilizadas como referência as geogrelhas disponíveis no acervo do *software*, o que resultou na escolha de uma geogrelha com resistência à tração característica (T_k) de 200 kN/m e módulo de rigidez (J) de 2222 kN/m.

O modelo numérico para análise do problema em elementos finitos foi gerado no *software* RS2 (Figura 3), no qual foi considerado o estado plano de tensões. A malha, com aproximadamente 10000 elementos, foi definida em elementos triangulares de 6 nós. As restrições de deslocamento nos limites do modelo foram contra deslocamentos horizontais nas laterais e contra deslocamentos verticais e horizontais em sua base (Figura 4).

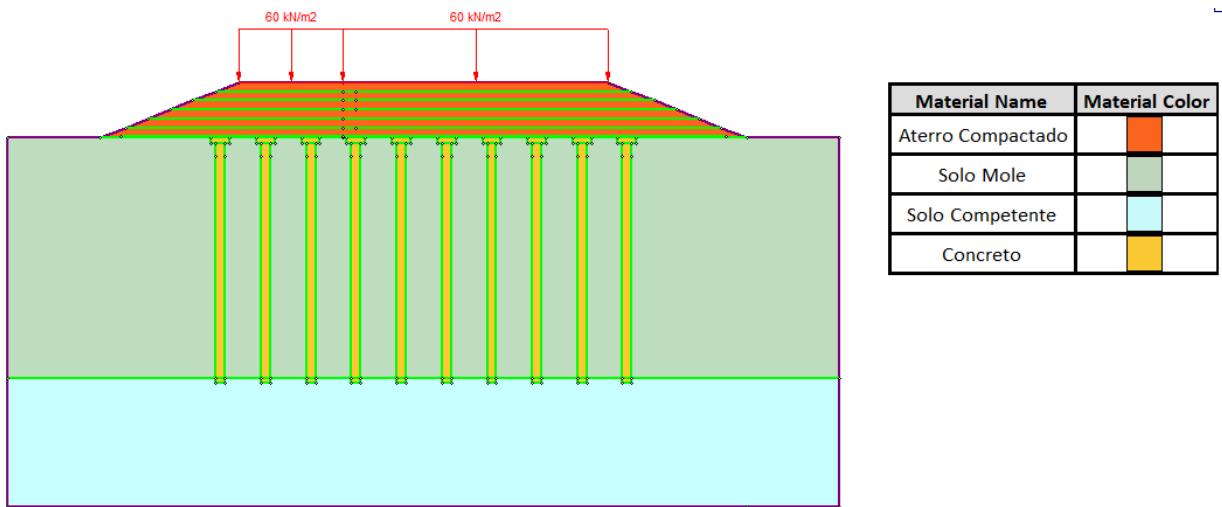


Figura 3 – Seção AA com definição dos materiais.

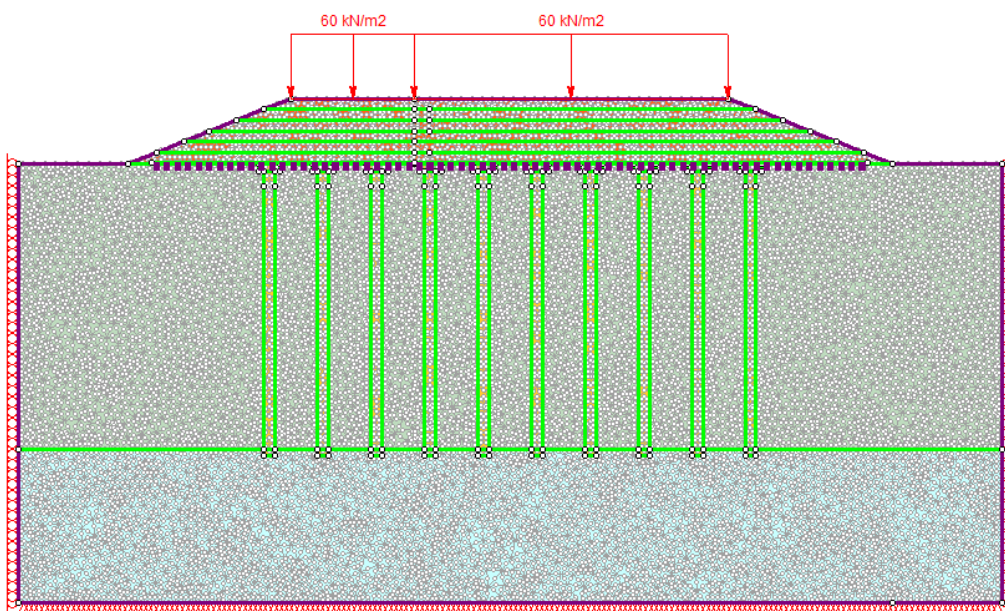


Figura 4 – Modelo numérico produzido.

A fim de se analisar a influência das variáveis de altura do aterro, quantidade de estacas e resistência da geogrelha sobre o comportamento da estrutura, foram testados os cenários apresentados na Tabela 2. As siglas que definem cada cenário foram compostas pelas informações de quantidade de estacas usadas no modelo, resistência da geogrelha (RG) ou ausência desta (SG) e altura do aterro, nesta ordem.

Tabela 2 – Cenários testados.

Cenário	Quantidade de estacas	Resistência da geogrelha [kN/m]	Altura do aterro [m]
10RG200-3,0 (Cenário padrão)	10	200	3,0
10RG200-2,5	10	200	2,5
10RG200-2,0	10	200	2,0
10RG200-1,5	10	200	1,5
10RG200-1,0	10	200	1,0
10RG200-0,5	10	200	0,5
10RG400-3,0	10	400	3,0
10RG400-2,5	10	400	2,5
10RG400-2,0	10	400	2,0
10RG400-1,5	10	400	1,5
10RG400-1,0	10	400	1,0
10RG400-0,5	10	400	0,5
5RG200-3,0	5	200	3,0
5RG200-1,5	5	200	1,5
5RG200-0,5	5	200	0,5
0RG200-3,0	0	200	3,0
0RG200-1,5	0	200	1,5
0RG200-0,5	0	200	0,5
10SG-3,0	10	-	3,0
10SG-2,5	10	-	2,5
10SG-2,0	10	-	2,0
10SG-1,5	10	-	1,5
10SG-1,0	10	-	1
10SG-0,5	10	-	0,5
0SG-3,0	0	-	3,0
0SG-1,5	0	-	1,5
0SG-0,5	0	-	0,5

Para a definição dos cenários, foi tomada como padrão a configuração obtida via dimensionamento e, a partir dela, foram definidas condições mais críticas no que se refere às variáveis supramencionadas. Com isso, a quantidade de estacas foi reduzida de 10 para 5 e para zero, e a altura do aterro foi reduzida de 3,0 m para até 0,5 m. Para a resistência da geogrelha, que se mostrou um parâmetro de menor sensibilidade, foi testado tanto o aumento de 200 kN/m para 400 kN/m como a ausência do reforço (resistência zero). Em todos os casos foram mantidos o padrão equiespaçado para a

distribuição das estacas, as definições de sobrecarga, malha e restrições de deslocamentos do modelo numérico.

Por fim, foi conduzida uma análise de estabilidade global no software Slide2, na qual foi modelada a mesma seção AA (Figura 2). O método usado para busca do menor fator de segurança foi o de Bishop-Simplificado, cuja superfície de ruptura é circular e desconsidera a interação entre as lamelas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Tensões

Para a análise de resultados, inicialmente verificou-se a distribuição de tensões verticais no cenário padrão, apresentada na Figura 5.

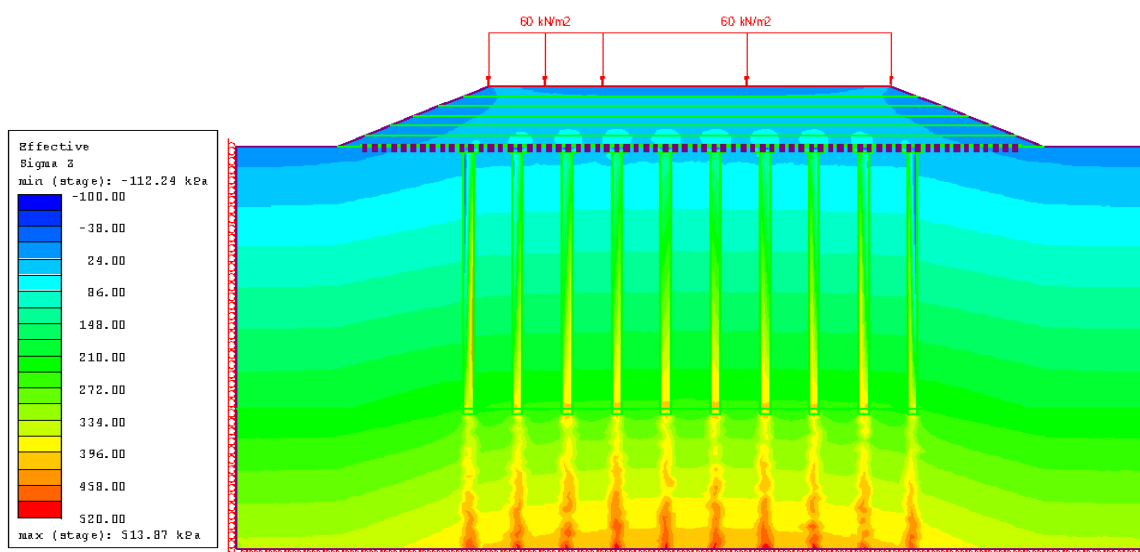


Figura 5 – Tensões verticais no cenário padrão.

É possível verificar na Figura 5 que nas estacas e abaixo delas há uma concentração de tensões verticais, indicando que de fato são estes elementos que transmitem as cargas da superfície para a profundidade do terreno. Observa-se que as tensões máximas registradas nos elementos de estacas e na camada de solo competente são da ordem de 500 kPa. Os valores de tensões registrados na camada de solo compressível são correspondentes ao peso próprio do maciço. Nota-se também um acréscimo de tensões no topo dos capiteis, o que é o desejável que ocorra no aterro estaqueado, sendo as maiores tensões suportadas pelas estacas e não pelo solo compressível.

Na Figura 6, é apresentado o diagrama de solicitações axiais na geogrelha, hachurado abaixo da linha pontilhada. Nele é possível perceber a ativação do reforço e verificar que os vãos entre as estacas são as regiões de maiores solicitações. Este comportamento foi previsto pelo método de cálculo utilizado para o dimensionamento da geogrelha (BS 8006, 2010). A tração máxima obtida pela modelagem numérica foi de 16,5 kN, cerca de 8% do suportado pelo material (200 kN/m). Uma baixa ativação da tração no reforço também foi verificada por Carreira *et al.* (2016), que concluiu que mesmo que o reforço não esteja sendo solicitado axialmente, sua presença deve contribuir na uniformização dos recalques do aterro.

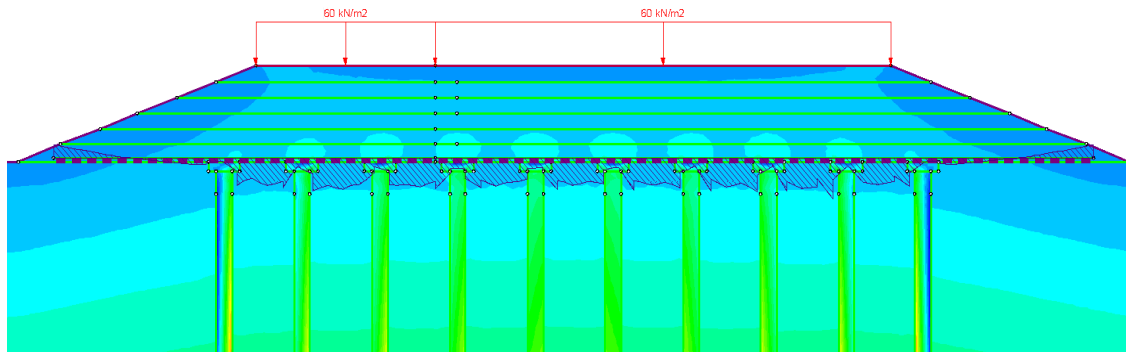


Figura 6 – Força axial atuante na geogrelha.

3.2 Deslocamentos

Para a análise de deslocamentos, tem-se na Figura 7 os deslocamentos verticais do cenário padrão, sendo que os valores negativos correspondem a deformações de compressão e os valores positivos correspondem à expansão. O máximo recalque no topo do aterro, cerca de 3 cm, foi verificado na região central do aterro e é representado pela cor azul escura. Percebe-se na figura que o recalque do aterro é contido pelas estacas e geogrelha, já que os deslocamentos mais negativos se situam no aterro e não no solo compressível. Além disso, nota-se o efeito de arqueamento do solo entre as estacas centrais, evidenciado pela formação de bulbos entre os capitéis.

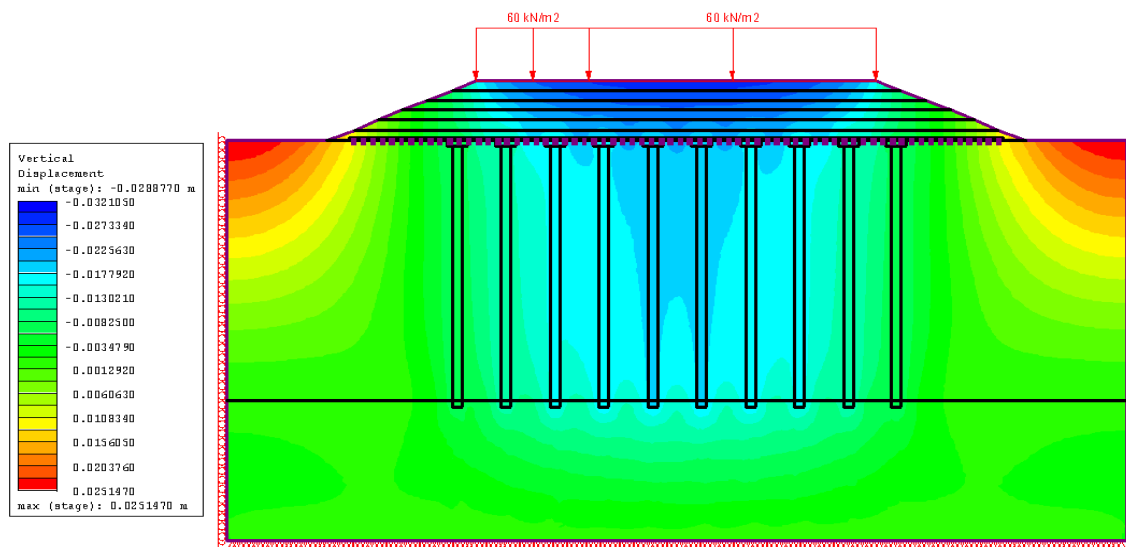


Figura 7 – Deslocamentos verticais no cenário padrão.

Além do cenário padrão, foram verificados os deslocamentos nos cenários relacionados na Tabela 2, e as Figuras 8 e 9 apresentam os recalques diferenciais máximos obtidos na superfície do aterro, observando a diferença de recalque entre o meio da estaca e o meio do vão entre estacas, em função da presença e da resistência da geogrelha (Figura 8), bem como da quantidade de estacas (Figura 9).

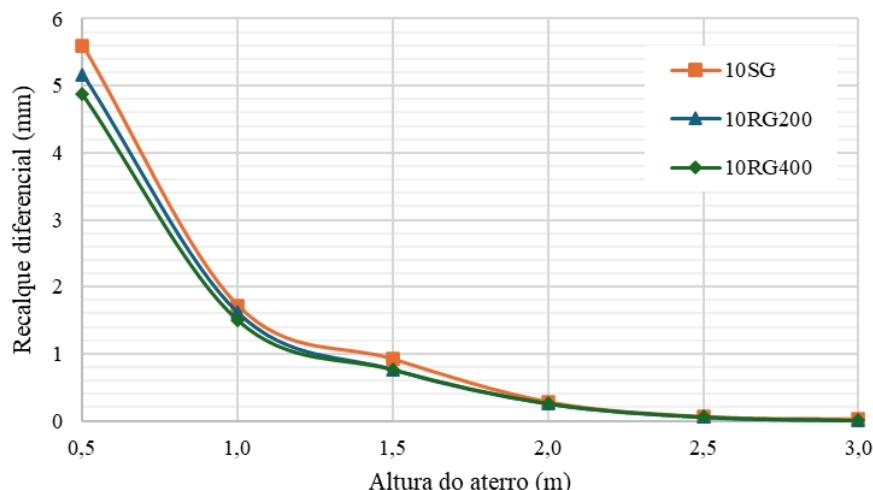


Figura 8 – Variação do recalque diferencial em função da altura do aterro considerando a presença de 10 estacas.

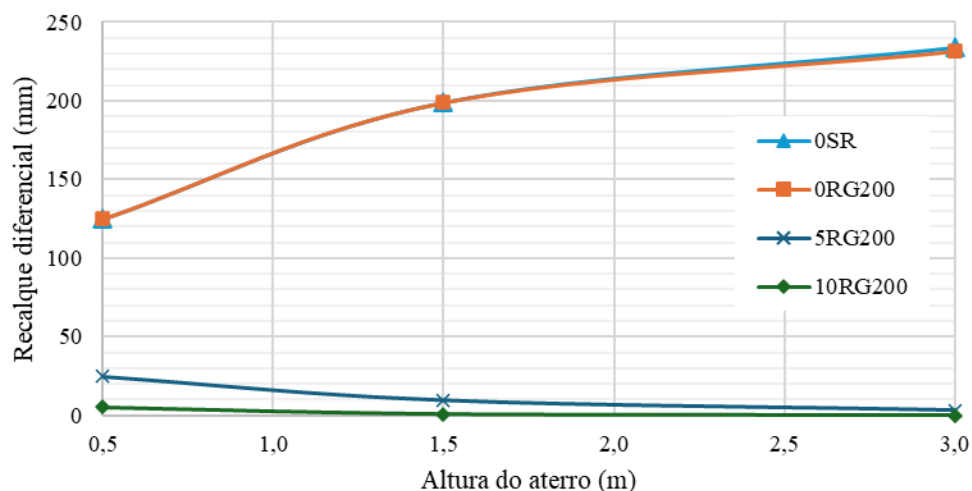


Figura 9 – Variação do recalque diferencial em função da quantidade de estacas.

Nas Figuras 8 e 9, percebe-se que ao aumentar a altura do aterro sobre o sistema estacas + geogrelha, há uma tendência de redução dos recalques diferenciais no topo do aterro. No caso específico deste trabalho, a redução de recalques diferenciais em valores absolutos (redução menor que 6 mm) é pouco significativa, mas tal tendência é bastante conhecida na literatura e tem sido observada também por meio de modelagem numérica (Giffoni *et al.*, 2016).

Além disso, verifica-se na Figura 8 que, neste modelo, a presença e resistência da geogrelha sobre os capitéis influencia os recalques diferenciais de maneira insignificante, ou seja, a geogrelha contribui pouco, em valores absolutos, para uniformização dos recalques do aterro.

Ao se analisar os valores absolutos de recalques, que são da ordem de centímetros (Figura 7), e os valores de recalques diferenciais, que são da ordem de milímetros (Figura 8), este trabalho corrobora com as observações de Mcguire *et al.* (2020). Os autores estudaram a aplicação de geogrelha sobre um aterro estaqueado e concluíram

que o reforço em geogrelha se torna dispensável para o controle de recalques e transferência de carga quando as estacas são instaladas sobre uma superfície resistente.

Além disso, nota-se na Figura 9 que a quantidade de estacas, e a conseqüente alteração do espaçamento entre elas, é fator determinante para a estabilização do aterro. A presença de estacas foi capaz de reduzir drasticamente os recalques diferenciais e o aumento de 5 para 10 estacas gerou uma redução do recalque diferencial de quase cinco vezes para um aterro de altura 0,5 m. Tal resultado corrobora com o estudo de Carreira *et al.* (2016), no qual também se concluiu que um dos fatores determinantes para os valores de recalque diferencial na superfície do aterro é o espaçamento entre colunas.

3.3 Estabilidade global

Como análise complementar às tensões e deformações, foi verificada a segurança do aterro em relação à estabilidade global para os cenários 10RG200-3,0 e 10SG-3,0 (Tabela 2), sendo a diferença entre eles a presença do reforço com geogrelha no primeiro cenário. Os resultados são mostrados na Figura 10 e Tabela 3.

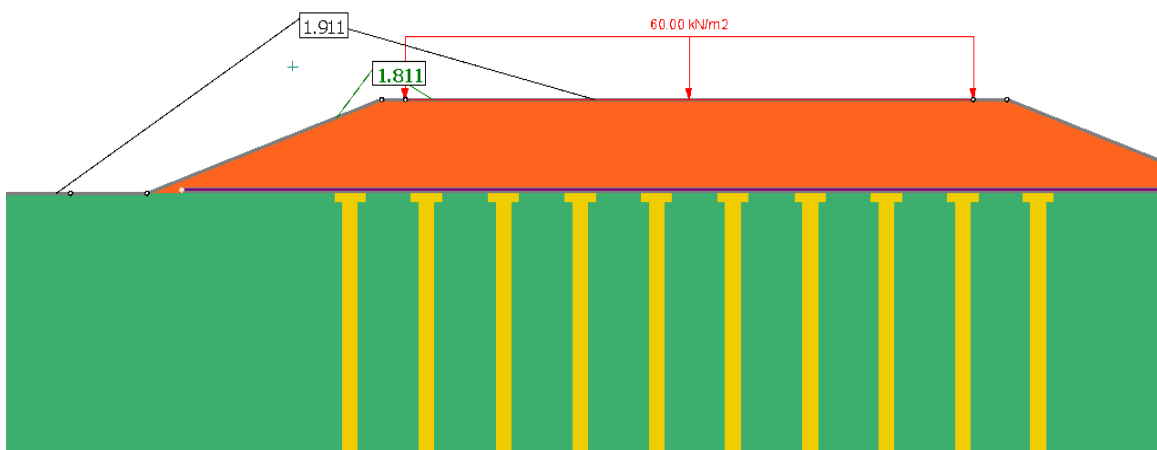


Figura 10 – Estabilidade global para o cenário 10RG200-3.

Tabela 3 – Fator de segurança para os cenários C1 e C13.

Cenário	Fator de Segurança (FS)
10RG200-3	1,91
10SG-3	1,67

Para essa análise, percebe-se a influência da geogrelha para a segurança e estabilidade do aterro, aumentando FS de 1,67 para 1,91, considerando a cunha de ruptura que passa pelo solo compressível. Assim, nota-se que a principal contribuição do reforço para a estrutura modelada está na segurança à ruptura.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho usou da modelagem numérica para analisar o comportamento de um aterro estaqueado reforçado com geogrelha, observando como as variáveis altura do aterro, espaçamento entre estacas e resistência da geogrelha interferem nos valores de tensão,

deformação e estabilidade global do aterro. A partir disso, as seguintes conclusões foram inferidas.

1. Há uma concentração de tensões verticais (σ_z) no topo dos capitéis.
2. Os vãos entre os capitéis são onde a geogrelha apresentou maior sollicitação, entretanto a tensão sollicitante foi inferior a 10% da resistência da geogrelha, o que mostra a subutilização deste reforço para a transferência de tensões.
3. A magnitude dos recalques diferenciais na superfície do aterro está atrelada à altura do aterro e à quantidade de estacas na fundação. Os resultados indicaram que, quanto maior for a altura do aterro e o número de estacas, menores serão esses recalques, sendo a segunda variável foi a que influenciou mais significativamente os resultados para o caso de que trata este trabalho. Verificou-se que a presença de estacas reduziu o recalque diferencial máximo a 4% do valor obtido para condição na qual elas estão ausentes.
4. O uso da geogrelha como reforço não se mostrou relevante para o controle de recalques nas análises feitas, não havendo diferenças significativas para as situações com e sem o reforço. Entretanto, a presença do geossintético aumentou o fator de segurança na análise de estabilidade global do aterro.

REFERÊNCIAS

ALBURQUERQUE, P. J. R.; GARCIA, J. R. *Engenharia de Fundações*. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

ALMEIDA, M.S.S. MARQUES, M.E.S. *Aterros Sobre Solos Moles: projetos e desempenho*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

AOKI, N.; VELLOSO, D.A. *An approximate method to estimate the bearing capacity of piles*. Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Anais... Buenos Aires: ICSMFE, 1975.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*: BS 8006. London: BSI, 2010.

CARREIRA, M.; ALMEIDA, M.; PINTO, A. *A numerical study on the critical height of embankments supported by geotextile encased granular columns*. *Procedia engineering*, v. 143, p. 1341–1349, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.158>. Acesso em: 21 mar. 2025.

GIFFONI, R.E.; OLIVEIRA, R.M.; BASTOS, F.S.; RICCIO FILHO, M.V. *Análise numérica de aterro estaqueado com plataforma de geossintético*. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, [S. l.], v. 2, n. 8, p. 154–165, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.26512/ripe.v2i8.21762>. Acesso em: 21 mar. 2025.

JOPPERT JR, I. *Fundações e Contensões de Edifícios*. Ed.1. São Paulo: Pini, 2007.

MCGUIRE, M.; SLOAN, J.; FILZ, G. *Effectiveness of geosynthetic reinforcement for load transfer in column-supported embankments*. *Geosynthetics International*, v. 27, n. 2, p. 200–218, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00012>. Acesso em: 21 mar. 2025.

ROCSCIENCE. *RS2*. Versão 11.024.

ROCSCIENCE. *Slide2*. Versão 9.035.

TERZAGHI, K. *Theoretical Soil Mechanics*. 1. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1943.