



Modelagem Numérica de Estruturas de Fundação Reforçadas com Materiais Geossintéticos

Fábio Martins da Silva

Mestrando, Universidade Federal de Minas Gerais, Manaus, Brasil, fabiomartins_2024@hotmail.com

Nycolas Rangel Cypriano

Estudante, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, nycolasrcy@gmail.com

Giovanna Monique Alelvan

Professora Adjunta, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil,
giovannaalelvan@etg.ufmg.br

Jeferson Wilian Dossa Fernandes

Professor Adjunto, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, jwdfernandes@ufmg.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma análise numérica do comportamento de fundações rasas sobre solos reforçados com geogrelhas, utilizando como base dados experimentais obtidos por Pierozan (2024) com solo transparente. A modelagem foi realizada no Abaqus/CAE, o solo foi representado com elementos hexaédricos C3D8 e comportamento elastoplástico descrito pelo modelo constitutivo Cam-Clay modificado, calibrado com ensaios triaxiais realizados em areia de quartzo saturada. A geogrelha foi modelada com elementos M3D4 e inserida em diferentes profundidades (1,00 cm a 4,00 cm). A interação solo-reforço foi representada pela técnica Embedded Region, e a interface solo-fundação adotou contato com atrito. A análise foi conduzida em regime estático implícito com formulação ALE. Os resultados numéricos mostraram boa concordância com os dados experimentais, especialmente para casos com reforço raso, indicando que a posição da geogrelha influencia diretamente na rigidez e capacidade de carga do sistema. O modelo Cam-Clay foi eficaz em capturar a resposta volumétrica do solo em regiões confinadas, mas apresentou limitações em profundidades maiores. O estudo confirma a eficiência do reforço com geogrelhas e destaca a importância da modelagem avançada para representar a interação solo–estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações Rasas, Modelagem Numérica, Geogrelha, Cam-Clay.

ABSTRACT: This study presents a numerical analysis of the behavior of shallow foundations on geogrid-reinforced soils, based on experimental data from Pierozan (2024) using transparent soil. The numerical model was developed in Abaqus/CAE, considering only one-quarter of the physical test box due to symmetry. The soil was modeled using full-integration hexahedral elements (C3D8) with an elastoplastic response governed by the Modified Cam-Clay constitutive model, calibrated with drained triaxial tests on saturated quartz sand. The geogrid was modeled using M3D4 membrane elements placed at varying depths (1,00 cm to 4,00 cm). Soil–geogrid interaction was defined via the Embedded Region technique, while soil–foundation interaction adopted surface-to-surface contact with friction. The analysis was conducted under static implicit regime with ALE formulation to reduce mesh distortion. Results showed good agreement between numerical and experimental data, especially for shallow reinforcement configurations, indicating that geogrid depth significantly affects the stiffness and bearing capacity of the foundation system. The Modified Cam-Clay model effectively captured volumetric soil behavior under confinement, but showed limitations at deeper reinforcement depths. The study confirms the efficiency of geogrid reinforcement and highlights the importance of advanced numerical modeling to realistically represent soil–structure interaction.

KEYWORDS: Shallow foundation, Numerical Modeling, Geogrid, Cam-Clay.

1 INTRODUÇÃO

Reforços geossintéticos têm sido amplamente utilizados na prática da engenharia, para melhorar o comportamento de sistemas solo-fundação, aterros, e sistemas de revestimento (Ouria e Mahmoudi, 2018). Os



produtos de reforço geossintético mais comumente empregados incluem geogrelhas, geotêxteis, e geocélulas. Dentre esses a geogrelha é um dos materiais mais amplamente utilizados para o reforço do solo em fundações rasas (Latha e Somwanshi, 2009).

A inclusão de geogrelhas, como elemento de reforço, tem se mostrado eficaz no aumento da capacidade de carga e na redução de recalques em fundações rasas. Esses materiais promovem o entrelaçamento com o solo redistribuindo as tensões, e restringindo os deslocamentos verticais (Latha; Somwanshi, 2009; Abu-Farsakh et al., 2013).

Apesar do avanço nas aplicações práticas a compreensão dos mecanismos internos de interação solo-reforço ainda representa um desafio, especialmente nas zonas mais profundas do maciço.

A utilização de solos transparentes, tem permitido a visualização não intrusiva de deformações contribuindo para a calibração de modelos numéricos avançados (Chen et al., 2021; Pierozan et al., 2024).

Embora solos transparentes tenham sido amplamente utilizados na investigação da interação solo-estrutura há ainda aplicação limitada na análise do comportamento de sapatas apoiadas sobre solos reforçados.

No campo da simulação computacional o modelo Cam-Clay modificado tem se destacado pela capacidade de representar o comportamento volumétrico de solos arenosos saturados sob diferentes condições de confinamento.

Este trabalho tem como objetivo avaliar por meio da modelagem numérica tridimensional no Abaqus/CAE o comportamento de fundações rasas sobre solo reforçado com geogrelhas, considerando diferentes profundidades de instalação. A análise é validada com base em ensaios experimentais em solo transparente com foco nos efeitos da profundidade do reforço sobre a rigidez e a capacidade de carga do sistema fundação-solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso de geossintéticos no reforço de fundações rasas tem sido amplamente explorado na engenharia geotécnica por meio de investigações experimentais, numéricas e analíticas. Estudos laboratoriais conduzidos por Abu-Farsakh et al. (2013) e Ezzein e Bathurst (2014) comprovaram a eficácia da inclusão de geogrelhas na redução de recalques e na redistribuição de tensões sob sapatas, promovendo maior rigidez ao sistema solo-estrutura. Nos últimos anos, a utilização de solo transparente associada à correlação digital de imagens (DIC) tem se consolidado como uma metodologia promissora para a visualização não intrusiva dos mecanismos internos de deformação, permitindo avanços significativos na compreensão da interação solo-reforço (Peng e Zornberg, 2018; Chen et al., 2021).

No campo da modelagem numérica, o Método dos Elementos Finitos tem sido amplamente empregado em simulações bidimensionais e tridimensionais com softwares como Abaqus e Plaxis (Hussein e Meguid, 2015; Aria et al., 2020). A maioria desses estudos utiliza modelos constitutivos clássicos como Mohr-Coulomb e Drucker-Prager, os quais, embora amplamente difundidos, apresentam limitações na representação precisa do comportamento volumétrico de solos sob diferentes níveis de confinamento. Nesse contexto, o modelo constitutivo Cam-Clay modificado é uma alternativa, por incorporar mecanismos como dilatância, adensamento e superfície de escoamento elíptica, sendo particularmente eficaz em solos saturados e deformações volumétricas.

Contribuições recentes, como as de Pierozan et al. (2024), reforçam a importância do uso de solo transparente em ensaios físicos de fundações rasas reforçadas com geogrelhas, permitindo não apenas o registro de curvas carga-recalque, mas também a observação direta da evolução dos deslocamentos internos. Esses dados experimentais de alta qualidade oferecem base valiosa para a calibração e validação de modelos numéricos avançados, potencializando a precisão na simulação da resposta estrutural do solo reforçado.

Apesar desses avanços, ainda são escassos os estudos que integram dados experimentais obtidos com solo transparente e modelagens tridimensionais com critérios de escoamento sofisticados como o Cam-Clay. Além disso, a representação realista da geogrelha como estrutura discreta com espaçamento compatível ao experimental segue sendo um desafio na simulação numérica. Diante desse panorama, o presente estudo propõe a modelagem tridimensional do ensaio físico conduzido por Pierozan et al. (2024), empregando o modelo Cam-Clay modificado e validação com base nos deslocamentos obtidos em diferentes profundidades de reforço, buscando avançar na representação numérica do comportamento de fundações rasas sobre solo granular reforçado.

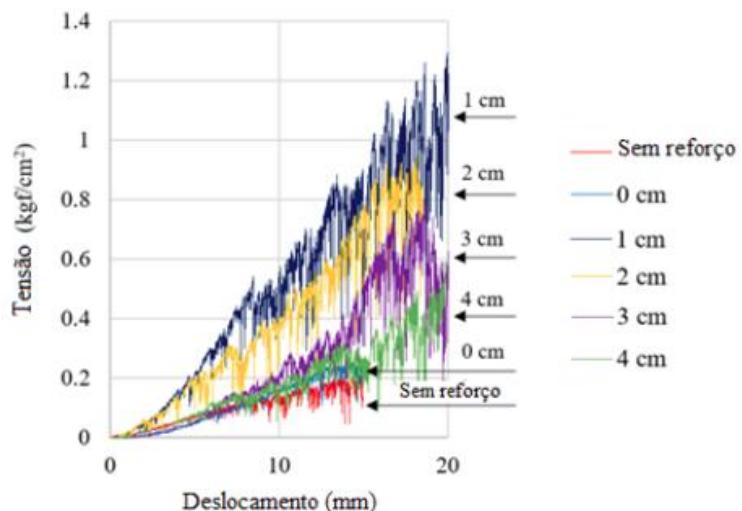
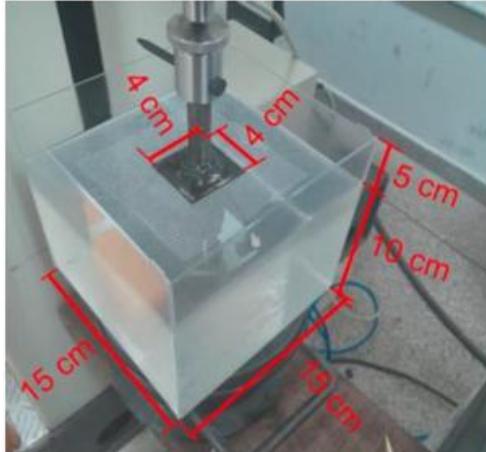


3 MODELAGEM NUMÉRICA

3.1 Ensaio Experimental de Pierozan (2024)

O estudo experimental conduzido por Pierozan (2024) consistiu em ensaios de carga em escala reduzida sobre fundações rasas apoiadas em solo transparente, com o objetivo de avaliar o efeito do reforço basal por geogrelhas. A caixa de ensaio foi confeccionada em acrílico, com dimensões internas de 15,00 cm × 15,00 cm × 10,00 cm de altura, preenchida com areia de quartzo de alta pureza saturada em mistura óleo-solvente com índice de refração ajustado para garantir transparência como mostra Figura 1a. A fundação foi representada por uma sapata quadrada de 4,00 cm × 4,00 cm. Utilizou-se uma tela de poliéster com aberturas de 2,00 mm para simular a geogrelha, instalada em profundidades de 0,00 cm a 4,00 cm. Ensaios de tração uniaxial caracterizaram o comportamento da geogrelha, com rigidez secante média de 0,41 kN/m, 0,83 kN/m e 1,37 kN/m para deformações de 2,00 %, 5,00 % e 10,00 %, respectivamente.

Na Figura 1b, observa-se que a presença da geogrelha aumentou significativamente a capacidade de carga da fundação, com destaque para a profundidade de 1,00 cm, que apresentou a maior rigidez e tensão máxima. Em contraste, o solo sem reforço exibiu os menores valores de resistência e deslocamento. Os resultados indicam que pequenas variações na profundidade de instalação da geogrelha afetam de forma sensível o desempenho da fundação.



(a)

(b)

Figura 1. Ensaio experimental conduzido por Pierozan (2024): (a) Caixa de acrílico preenchida com solo transparente; (b) Resultado experimental: comportamento tensão-deslocamento da fundação com e sem reforço por geogrelha em diferentes profundidades.

3.2 Modelo Numérico

A modelagem numérica foi realizada no software Abaqus/CAE 2024, representando 1/4 do volume físico da caixa de ensaio utilizada por Pierozan et al. (2024), com dimensões de 75,00 mm × 75,00 mm × 100,00 mm, conforme ilustrado na Figura 2. O solo foi discretizado com elementos hexaédricos de integração total (C3D8), assumindo comportamento elastoplástico segundo o modelo constitutivo Cam-Clay modificado. Os parâmetros de entrada foram obtidos a partir de calibração de resultados de ensaios triaxiais drenados realizados com quartzo fundido saturado — material transparente com propriedades geotécnicas calibradas para simular a resposta volumétrica de solos arenosos — apresentado na tese de doutorado de Carvalho (2015), os valores adotados foram listados na Tabela 1.

A fundação foi modelada como uma sapata, sobre a qual foi aplicado carregamento vertical incremental centrado. A geogrelha foi representada por elementos de membrana M3D4, posicionada em diferentes profundidades (1,00 cm, 2,00 cm, 3,00 cm e 4,00 cm) de acordo com os arranjos experimentais. Suas propriedades mecânicas foram extraídas de ensaios de tração uniaxial previamente realizados. A interação solo–geogrelha foi implementada por meio da técnica Embedded Region, que associa os nós da membrana aos



elementos do solo. Para a interface solo-fundação, adotou-se contato superfície-a-superfície com atrito, utilizando o método penalty.

As condições de contorno consideraram simetria nos planos verticais e restrição total na base do modelo. A análise foi conduzida no regime estático implícito (Static General), com a ativação da formulação ALE (Arbitrary Lagrangian–Eulerian) para suavizar distorções excessivas da malha. O refinamento da malha foi concentrado nas regiões críticas sob a sapata e ao redor da geogrelha, como mostrado na Figura 2 (b), com o objetivo de aumentar a acurácia na predição dos deslocamentos e da distribuição de tensões.

Ressalta-se que não foi realizado estudo de sensibilidade da malha no presente trabalho. Dessa forma, admite-se a possibilidade de variações nos resultados em função do refinamento adotado, o que representa uma limitação da modelagem e indica uma direção relevante para investigações futuras.

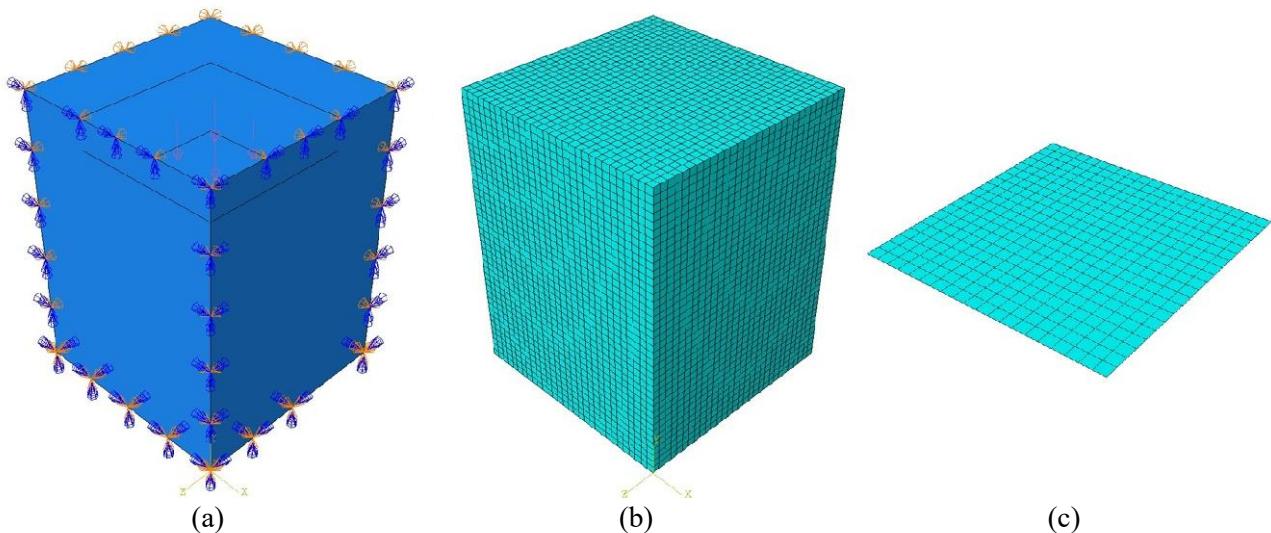


Figura 2. (a) Modelo geométrico representando 1/4 da caixa de ensaio; (b) Malha tridimensional aplicada ao solo e à sapata; (c) Detalhe da malha da geogrelha posicionada no interior do solo.

Tabela 1. Parâmetros de entrada solo com modelo Cam-Clay modificado

Parâmetros	Valor
λ	0,0828
κ	0,0078
M	1,2600
p_0 (MPa)	0,1710
v	0,2500

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos por meio da modelagem numérica em Abaqus/CAE, foram comparados diretamente aos dados experimentais para avaliar o comportamento de fundações rasas sobre solo transparente com e sem reforço por geogrelha. A análise concentrou-se na comparação dos deslocamentos, e entre as curvas tensão-deformação obtidas numericamente e os dados experimentais para diferentes profundidades de inserção da geogrelha (1,00 cm, 2,00 cm, 3,00 cm e 4,00 cm), bem como para o caso de referência com solo não reforçado.

A Figura 3 ilustra o campo de deslocamentos verticais para o caso com geogrelha posicionada a 1,00 cm de profundidade. Observa-se que os maiores deslocamentos concentram-se imediatamente abaixo da sapata, atingindo aproximadamente 15,70 mm. A distribuição dos deslocamentos indica a formação de um bulbo de deformação que se expande em direção à base da caixa, coerente com o padrão típico de fundações em solos granulares. Esse comportamento é consistente com os dados experimentais, indicando que o modelo Cam-Clay modificado é capaz de capturar adequadamente a resposta volumétrica do solo nas regiões mais confinadas.



2.0 2.5

A Tabela 2 apresenta os deslocamentos máximos obtidos numericamente e os valores registrados experimentalmente para cada configuração de ensaio:

Tabela 2. Deslocamentos verticais máximos obtidos numericamente e experimentalmente

Posicionamento geogrelha	Deslocamento numérico (mm)	Deslocamento experimental (mm)	Erro relativo (%)
Sem reforço	14,94	14,96	0,13
1,00 cm	15,68	20,46	23,36
2,00 cm	15,71	18,51	15,13
3,00 cm	16,03	20,43	21,54
4,00 cm	16,51	19,94	17,21

Verifica-se que, embora os deslocamentos numéricos apresentem valores inferiores aos experimentais, o padrão de resposta obtido mantém-se qualitativamente consistente. As menores discrepâncias ocorreram no caso sem reforço (0,13%) e na configuração com geogrelha a 2,00 cm (15,13%), enquanto as maiores foram registradas para 1,00 cm (23,36%), 3,00 cm (21,54%) e 4,00 cm (17,21%). Nos modelos com inserção da geogrelha, entretanto, a simulação não conseguiu reproduzir de forma plena o incremento de deslocamentos registrado experimentalmente. Essas diferenças podem estar associadas tanto às limitações do modelo constitutivo em representar a perda de rigidez em regiões de menor confinamento quanto à caracterização numérica das propriedades da geogrelha, reforçando a necessidade de estudos futuros com caracterização mais detalhada do reforço e avaliação da adequação do modelo constitutivo em diferentes condições de confinamento.

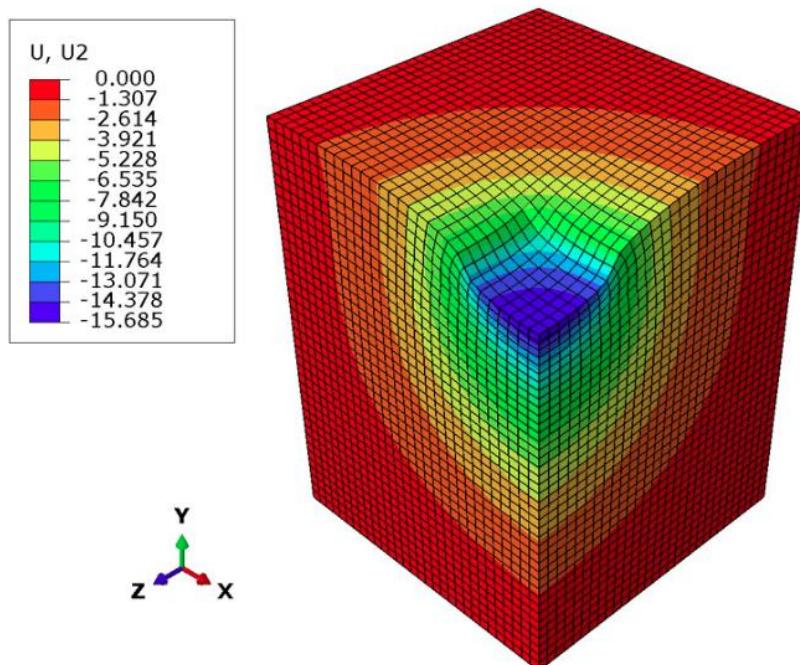
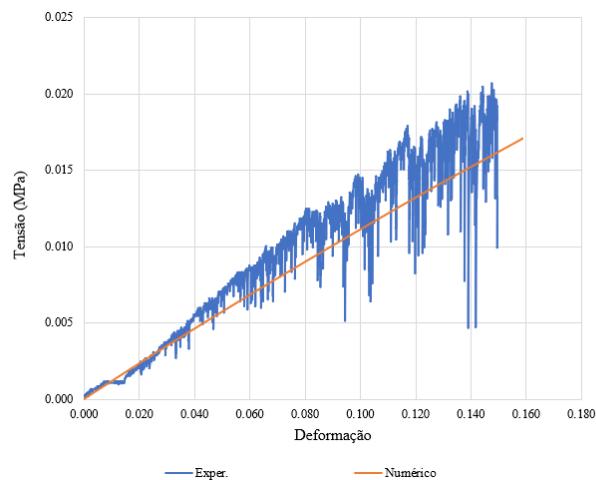
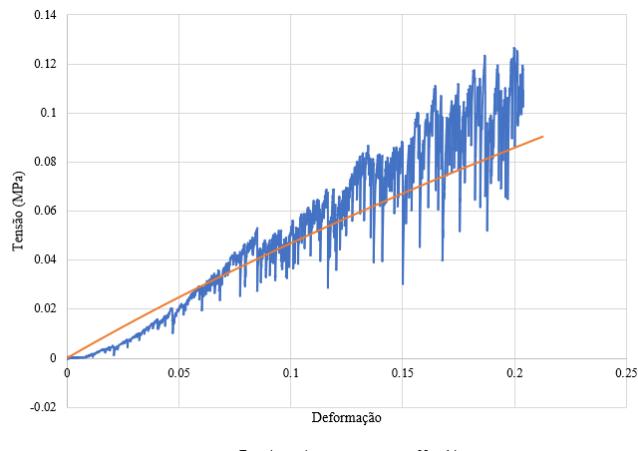


Figura 3. Distribuição dos deslocamentos verticais no modelo numérico para o caso com geogrelha posicionada a 1,00 cm de profundidade.

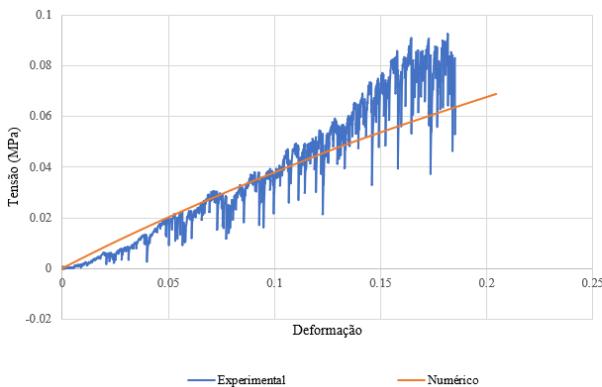
A fim de validar o modelo numérico, foram geradas curvas tensão-deformação a partir das simulações numéricas e dos dados experimentais disponíveis. Essas curvas possibilitam avaliar a rigidez do sistema fundação-solo, a capacidade de carga mobilizada e a influência da profundidade da geogrelha sobre o comportamento global. Na figura 4 são apresentados os diagramas comparativos para os cinco casos analisados: solo não reforçado e reforço posicionado a 1,00 cm, 2,00 cm, 3,00 cm e 4,00 cm de profundidade.



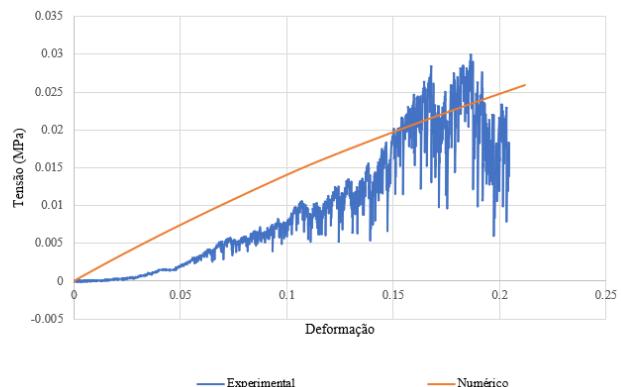
(a)



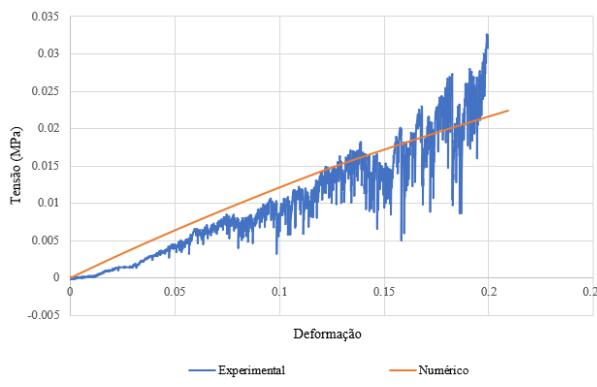
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4. Comparação entre as curvas tensão-deformação experimentais e numéricas para: (a) solo sem reforço; (b) geogrelha a 1,00 cm; (c) geogrelha a 2,00 cm; (d) geogrelha a 3,00 cm; (e) geogrelha a 4,00 cm de profundidade.

As curvas tensão-deformação indicam que o modelo numérico foi capaz de representar com boa precisão a resposta do solo não reforçado, com excelente aderência à curva experimental em toda a faixa de deformações na previsão da tensão máxima.

A introdução da geogrelha a 1,00 cm de profundidade promoveu o maior ganho de desempenho, com tensão experimental superior a 0,130 MPa. A simulação numérica acompanhou bem a tendência de crescimento da curva, com leve subestimação da rigidez final. Para 2,00 cm, o reforço também foi eficaz, com tensão máxima experimental de aproximadamente 0,085 MPa. O modelo Cam-Clay manteve boa correspondência nas deformações iniciais, apresentando pequena superestimação nas fases mais avançadas.



Nos casos de 3,00 cm e 4,00 cm, observou-se queda significativa na efetividade do reforço. As tensões máximas experimentais foram de aproximadamente 0,026 MPa e 0,033 MPa, respectivamente. O modelo numérico superestimou os valores em ambas as configurações, sugerindo que o reforço, nessas profundidades, atua fora da zona de influência direta da carga. A tendência crescente das curvas simuladas nessas situações evidencia uma limitação do Cam-Clay em capturar a perda de rigidez observada nos ensaios.

De forma geral, o modelo constitutivo reproduziu bem o comportamento do solo nas fases iniciais de carregamento, sendo mais representativo em condições de confinamento efetivo. O desempenho decai consideravelmente com o aumento da profundidade da geogrelha, e os resultados apontam que sua posição tem influência direta sobre a rigidez e a capacidade de carga do sistema fundação-solo reforçado.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo, investigou-se o comportamento de fundações rasas sobre solo transparente reforçado com geogrelhas, por meio de modelagem numérica no Abaqus/CAE com o modelo constitutivo Cam-Clay modificado. O objetivo foi avaliar a influência da profundidade do reforço sobre a rigidez e a capacidade de carga do sistema fundação-solo.

Os resultados demonstraram que o modelo numérico foi capaz de reproduzir adequadamente a resposta experimental em condições de confinamento efetivo, sobretudo nos casos com a geogrelha posicionada a 1,00 cm e 2,00 cm de profundidade, onde se observou maior rigidez e menor deslocamento vertical. Em profundidades superiores (3,00 cm e 4,00 cm), o desempenho do reforço foi menos expressivo, e as simulações apresentaram superestimação dos deslocamentos, indicando limitação do modelo em zonas de menor confinamento.

Portanto, conclui-se que a posição da geogrelha exerce papel fundamental na eficiência do reforço, e que a utilização do modelo Cam-Clay modificado, devidamente calibrado, permite representar com maior realismo os mecanismos de interação solo-reforço, especialmente em solos arenosos saturados. Os resultados obtidos reforçam a importância do uso de modelos constitutivos avançados e dados experimentais de qualidade na simulação de sistemas geotécnicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Farsakh, M.; Chen, Q.; Sharma, R. *An experimental evaluation of the behavior of footings on geosynthetic-reinforced sand*. *Soils and Foundations*, v. 53, n. 2, p. 335–348, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.01.001>. Acesso em: jan. 2025.
- Aria, S.; Shukla, S. K.; Mohyeddin, A. *Optimum burial depth of geosynthetic reinforcement within sand bed based on numerical investigation*. *International Journal of Geotechnical Engineering*, v. 14, n. 1, p. 71–79, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1404202>. Acesso em: mar. 2025.
- Carvalho, T. G. B. *Propriedades dos solos transparentes e técnicas de correlação de imagens digitais para aplicação em modelagem física geotécnica*. 2015. Tese Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2015. Disponível em: <<https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-civil/teses-de-doutorado-2015/>>. Acesso em: fev. 2025.
- Chen, J. et al. *Physical and numerical modelling of strip footing on geogrid reinforced transparent sand*. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 49, p. 399–412, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.10.011>. Acesso em: dez. 2024.
- Ezzein, F. M.; Bathurst, R. J. *A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pullout test apparatus and transparent granular soil*. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 42, p. 246–255, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.04.003>. Acesso em: mar. 2025.
- Hussein, M. G.; Meguid, M. A. Numerical modeling of soil-structure interaction with applications to geosynthetics. In: International Conference on Structural and Geotechnical Engineering – ICSGE 14, 2015, Cairo. Anais... Cairo: ICSGE, 2015. Disponível em: <<https://www.geogroup.mcgill.ca/>>. Acesso em: mar. 2025.



2 0 2 5

Latha, G. M.; Somwanshi, A. *Effect of reinforcement form on the bearing capacity of square footing on sand. Geotextiles and Geomembranes*, v. 27, p. 409–422, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.03.002>. Acesso em: mar. 2025.

Ouria, A.; Mahmoudi, A. *Laboratory and numerical modeling of strip footing on geotextile-reinforced sand with cement-treated interface. Geotextiles and Geomembranes*, v. 46, n. 1, p. 29–39, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.10.004>. Acesso em: mar. 2025.

Peng, X.; Zornberg, J. G. *Evaluation of soil-geogrid interaction using transparent soil with laser aided imaging*. In: *International Conference on Geosynthetics – ICG*, 11., 2018, Seoul. *Proceedings...* Seoul: IGS, 2018. Disponível em: <<https://sites.utexas.edu/zornberg>>. Acesso em: mar. 2025.

Pierozan, R. C.; Alevlan, G. M.; Oliveira, V. C.; Gonzaga, L. B. T.; Romanel, C. *Assessment of geogrid application in reduced-scale footing with transparent soil*. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG*, 20., 2024, Balneário Camboriú. *Anais...* Balneário Camboriú: ABMS, 2024. Disponível em:< <https://www.abms.com.br/evento/cobramseg-2024>>. Acesso em: mar. 2025.