XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/100

Validação dos Parâmetros de Modelos Numéricos para Maciços de Areia

Lorena da Silva Leite
Doutoranda em engenharia civil, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, lorenaleite@pq.uenf.br

Paulo César de Almeida Maia
Docente, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, maia@uenf.br

Aldo Durand Farfán
Docente, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, aldo@uenf.br

RESUMO: A crescente necessidade de construir sobre solos de baixa capacidade de suporte tem incentivado o uso de geossintéticos como reforço em fundações rasas. Esses materiais proporcionam maior capacidade de carga e menor recalque, oferecendo soluções técnicas e economicamente viáveis. Este estudo apresenta a validação de modelos numéricos aplicados à análise de fundações rasas em areia reforçada com geogrelhas. A pesquisa baseia-se em dados experimentais obtidos em ensaios triaxiais e em modelos físicos reduzidos desenvolvidos em investigação anterior. Os ensaios triaxiais permitiram determinar os parâmetros constitutivos utilizados na calibração dos modelos numéricos. A retroanálise paramétrica foi utilizada para ajustar os parâmetros de rigidez e resistência do solo. Os resultados numéricos mostraram boa concordância com os dados experimentais, reproduzindo adequadamente o comportamento carga–recalque observado em laboratório. Conclui-se que os modelos validados são representativos do comportamento de solos, sendo aplicáveis a análises e projetos geotécnicos.

PALAVRAS-CHAVE: retroanálise paramétrica, MEF, ensaio triaxial, fundação rasa, geogrelha.

ABSTRACT: The increasing need to build on soils with low bearing capacity has encouraged the use of geosynthetics as reinforcement in shallow foundations. These materials provide higher load-bearing capacity and reduced settlement, offering technically and economically viable solutions. This study presents the validation of numerical models applied to the analysis of shallow foundations on sand reinforced with geogrids. The research is based on experimental data obtained from triaxial tests and reduced-scale physical models developed in a previous investigation. The triaxial tests allowed the determination of the constitutive parameters used to calibrate the numerical models. Parametric back-analysis was employed to adjust the soil stiffness and strength parameters. The numerical results showed good agreement with the experimental data, accurately reproducing the load–settlement behavior observed in the laboratory. It is concluded that the validated models are representative of soil behavior and are applicable to geotechnical analyses and design.

KEYWORDS: parametric back-analysis, FEM, triaxial test, shallow foundation, geogrid.

1 INTRODUÇÃO

A demanda cada vez mais recorrente de construção sobre solos de baixa capacidade de suporte devido à expansão urbana torna a técnica de reforço de solos cada vez mais necessária. Obras geotécnicas têm utilizado cada vez mais materiais geossintéticos (geogrelhas e geomantas) como reforço (Fernandes, 2019). Os geossintéticos, empregados como reforço do solo, oferecem soluções econômicas e tecnicamente avançadas em obras de fundações. O uso de geossintéticos pode significar menor volume de transporte, escavação, técnicas construtivas menos elaboradas, menor custo com equipamentos sofisticados e diminuição de mão de obra resultando em uma melhor relação custo benefício. No caso de fundações rasas, ele trabalha melhorando o suporte do solo, em que a zona composta resultante, camada de solo reforçado, pode melhorar a capacidade de carga do maciço de fundação e proporcionar uma melhor distribuição de pressão nos solos fracos subjacentes, reduzindo assim os recalques associados. (Lopes, 2019).

A análise numérica é uma maneira prática de simular o comportamento do maciço reforçado. Estudos recentes demonstram boa compatibilidade entre o comportamento dos modelos numéricos e experimentais, além do aumento da capacidade de carga e redução do recalque com a inclusão de geossintéticos (Kumar et al., 2024; Laboudi, 2024; Chua e Nepal, 2023; Chua et al., 2023; Yalaoui et al., 2023; Chua et al., 2022; Al-Jeznawi e Al-Azzawi, 2021; Ksheeraja e Srilatha, 2021; Albusoda e Al-Saadi, 2020; Sahu et al. 2020; El - Soud e Belal, 2019; Hussein e Meguid, 2020).

Neste trabalho, apresenta-se a validação de modelos numéricos de maciços de solo não coesivo por meio de retroanálise paramétrica, utilizando dados de ensaios físicos em escala reduzida desenvolvidos em estudo prévio. Os parâmetros constitutivos dos modelos numéricos foram calibrados com base nos resultados obtidos em ensaios triaxiais.

2 MODELO FÍSICO

O estudo prévio com modelo físico reduzido no qual esta pesquisa se baseou foi desenvolvido por Corrêa (2021), no qual o autor analisa os efeitos do reforço com geogrelha em maciço de areia a partir de ensaios experimentais, utilizando diferentes configurações. A areia de referência (protótipo), extraída do Rio Paraíba do Sul na região de Campos dos Goytacazes-RJ, apresenta diâmetro dos grãos entre 0,06 mm e 2,0 mm. Considerando que o modelo físico reduzido tem fator escala (λ) entre protótipo e modelo igual a 7,5, a areia utilizada no modelo reduzido deve possuir, pelas leis de similaridade, diâmetro médio entre 0,06 mm (limite inferior da fração areia) e 0,27 mm.

A Figura 1 apresenta as curvas carga-recalque, com tensão normalizada, para os modelos reduzidos de fundação rasa reforçada, com diferentes configurações de reforço, apresentadas por Corrêa (2021) e demonstram o ganho de resistência da fundação com o acréscimo dos reforços.

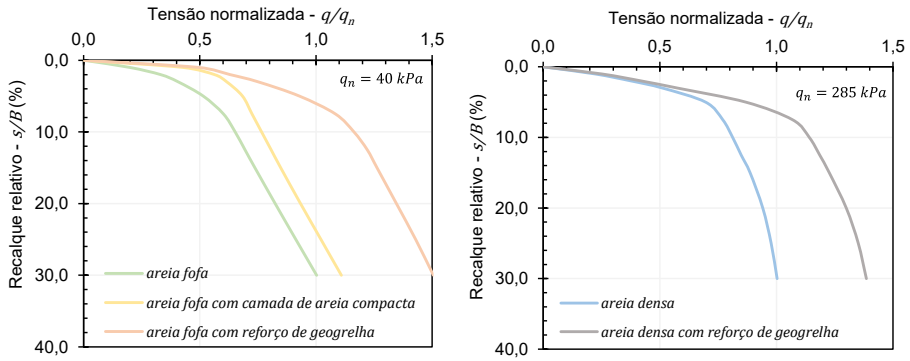


Figura 1. Curvas carga-recalque normalizadas dos modelos reforçados (Corrêa, 2021).

3 ENSAIO TRIAXIAL

3.1 Metodologia

Os ensaios triaxiais, realizados em areias no estado denso e fofo, utilizando o método consolidado e drenado, foram feitos conforme orientações de Bishop e Henkel (1962), assim como da ASTM D7181-20.

Os ensaios foram realizados em amostras de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro. A amostra de areia fofa foi montada com o auxílio de um tubo PVC, conforme moldagem prevista no ensaio para determinação do índice de vazios máximo (NBR 16840). Para a areia densa, foi realizada a compactação em camadas. A Figura 2 ilustra os passos para a montagem dos ensaios triaxiais.

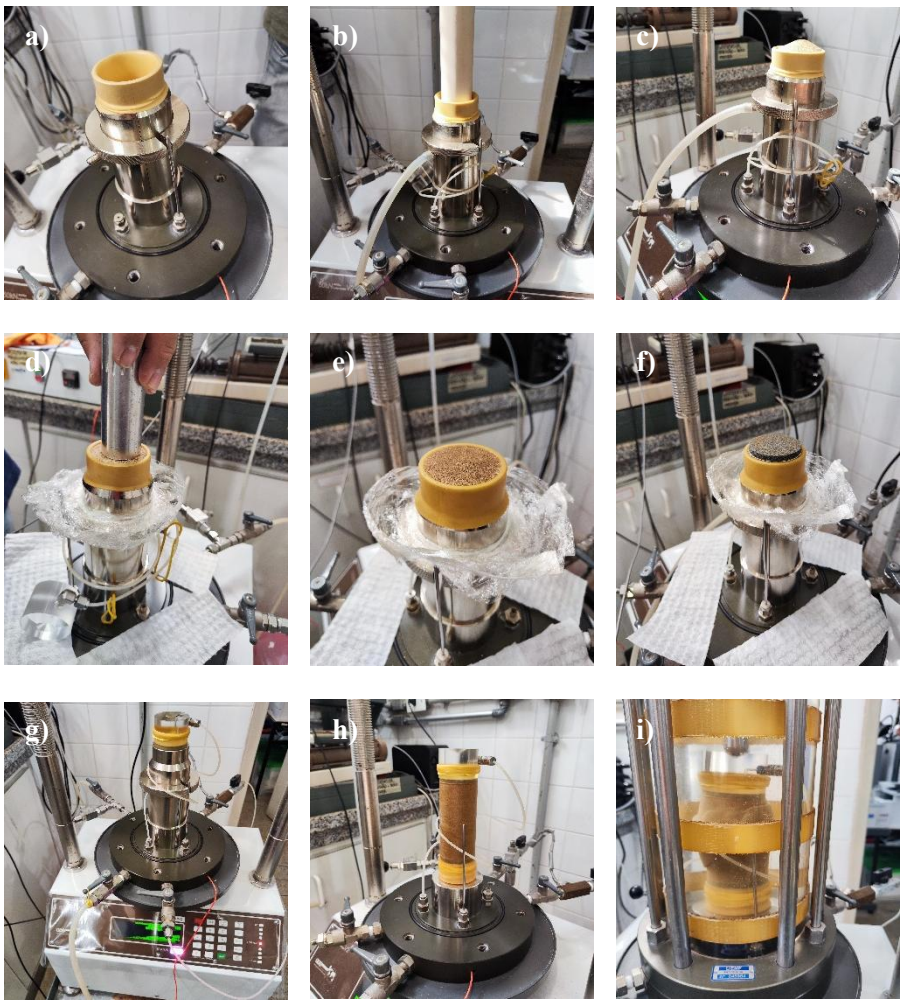


Figura 2. Passos para a montagem dos ensaios triaxiais: a) montagem da membrana em molde tripartido com aplicação de sucção; b) equipamento para montagem da amostra solta; c) amostra fofa imediatamente antes do arrasamento; d) compactação da amostra densa; e) corpo de prova montado, com superfície arrasada; f) corpo de prova com filtro e pedra porosa; g) corpo de prova com top cap durante percolação de água, ainda com molde tripartido; h) corpo de prova montado; i) corpo de prova após ensaio.

3.2 Resultado dos ensaios triaxiais

Os resultados dos ensaios triaxiais são apresentados a seguir, com análise dos gráficos de tensão–deformação e de variação volumétrica, visando identificar as principais tendências de comportamento e subsidiar a determinação dos parâmetros dos modelos constitutivos empregados na modelagem numérica. As figuras 3 a 6 apresentam, respectivamente, as curvas de tensão desviadora em função da deformação axial, as curvas de deformação volumétrica em função da deformação axial, o círculo de Mohr referente aos ensaios com areia densa e os círculos de Mohr correspondentes aos ensaios com areia fofa..

Os resultados demonstram que o comportamento da areia densa é caracterizado por maior rigidez inicial, menores deformações axiais para uma mesma tensão desviadora e tendência à dilatância após o pico de resistência. Em contraste, a areia fofa apresenta menor rigidez inicial, maiores deformações axiais e comportamento contrativo. Esses resultados estão em consonância com o comportamento típico observado na literatura para solos arenosos. A partir dos círculos de Mohr obtidos, observa-se que as envoltórias de ruptura apresentam comportamento típico de solos arenosos, com coesão despresível. Os ensaios com areia densa resultaram em ângulos de atrito interno mais elevados, refletindo maior resistência ao cisalhamento, enquanto os ensaios com areia fofa apresentaram ângulos de atrito inferiores. Esses resultados confirmam a coerência

dos dados experimentais e reforçam a adequação dos parâmetros adotados para calibração dos modelos numéricos.

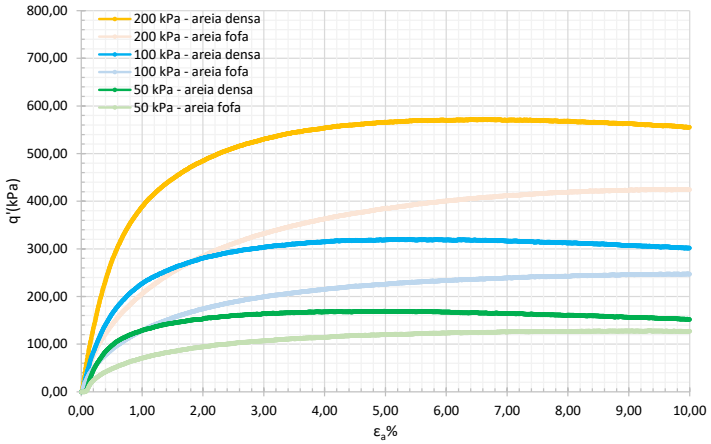


Figura 3 . Curvas de tensão desviadora x deformação axial.

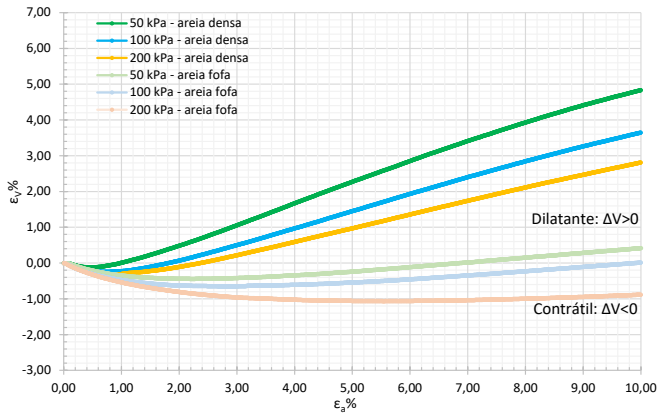


Figura 4 . Curvas de deformação volumétrica x deformação axial.

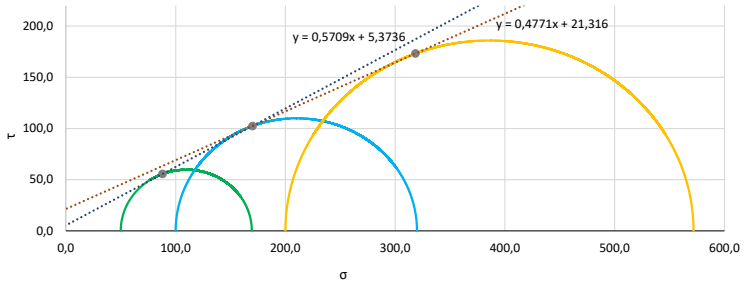


Figura 5 . Círculos de Mohr – areia densa.

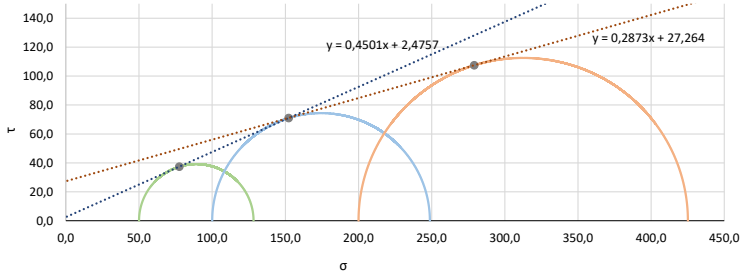


Figura 6 . Círculos de Mohr – areia fofa.

4 MODELO NUMÉRICO

4.1 Modelos constitutivos

Os modelos numéricos foram realizados em sotware baseado no método dos elementos finitos para análises tridimensionais, com elementos tetraédricos de 10 nós, nos quais foram utilizados os modelos constitutivos Linear Elástico e Hardening-Soil.

O modelo linear elástico é o material mais simples do Plaxis, é baseado na Lei de Hooke para comportamento elástico linear isotrópico, e foi utilizado para simular a sapata corrida.

O modelo hardening soil é um modelo avançado para simular o comportamento de diferentes tipos de solos e admite um comportamento elástico perfeitamente plástico, no qual o solo passa por sucessivas superfícies de escoamento até atingir a envoltória de Mohr-Coulomb, causando o endurecimento do material.

A Figura 7 apresenta a malha gerada para o modelo numérico com o maciço de solo e a sapata corrida.

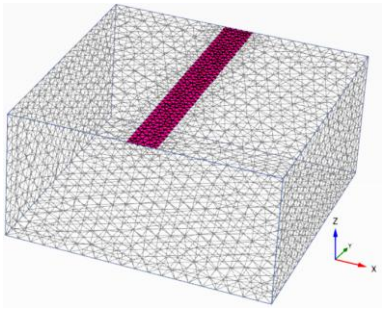


Figura 7 . Malha do modelo numérico.

4.2 Parâmetros

Os parâmetros do modelo constitutivo, utilizado para simular a sapata corrida, foram validados em ensaios experimentais em amostras de concreto e não serão discutidos neste trabalho. Os parâmetros variados nos ensaios para a validação dos modelos numéricos são os referentes ao modelo constitutivo hardening soil. São eles: E, ν e ϕ. Foram considerados os valores obtidos nos ensaios triaxiais e os valores máximos e mínimos previstos para cada tipo de material apresentados na bibliografia. Portanto, a Tabela 1 apresenta os limites máximos e mínimos considerados para cada parâmetro.

Tabela 1. Parâmetros máximos e mínimos.

Solo	E [Mpa] [a]		ν [b]		ϕ [°] [c]	
	min	máx	min	máx	min	máx
Areia fofa	5	25	0,2	0,35	24,2	35
Areia densa	25	81	0,3	0,4	29,56	45

a – módulo de Young (limites segundo Bowles, 1997)

b – coeficiente de Poisson (limites segundo Bowles, 1997)

c- ângulo de atrito (liites inferiores conforme ensaios triaxiais e superiores segundo Das, 2007)

4.3 Resultados

Os resultados demonstraram boa correlação entre o comportamento dos modelos físicos reduzidos e dos modelos numéricos. A Figura 8 apresenta o resultado numérico, com as isocurvas de delocamento do solo. As figuras 9 e 10 apresentam, respectivamente, as curvas carga-recalque do modelo físico e numérico do modelo com areia fofa e com areia densa. Observa-se boa coerência entre os resultados experimentais e as simulações numéricas, reforçando a confiabilidade do modelo numérico para análise de maciços de areia em condições similares às ensaiadas.

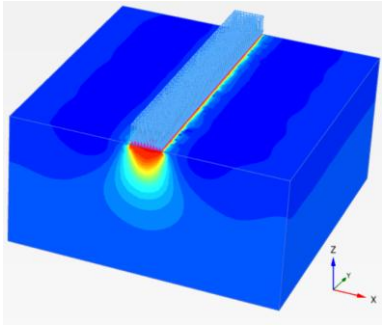


Figura 8 . Isocurvas de deslocamento do modelo numérico.

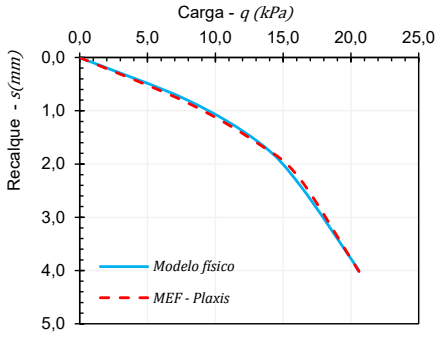


Figura 9 . Curva carga-recalque para modelo com areia fofa.

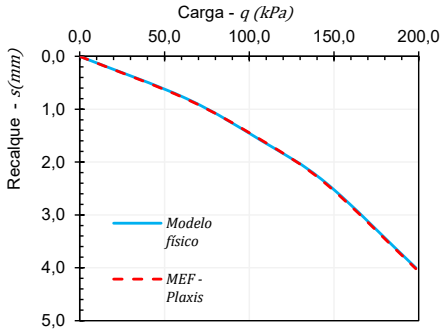


Figura 10 . Curva carga-recalque para modelo com areia densa.

Os parâmetros validados são apresentados na Tabela 2, onde m é o parâmetro que representa a dependência da rigidez com o estado de tensão do solo, ϕ é o ângulo de atrito, E_{50} é a rigidez secante em ensaios triaxiais, E_{ur} é a rigidez de descarregamento/carregamento, E_{oed} é a rigidez tangente em ensaios oedométricos, q_{ref} é a tensão de referência, γ_d é o peso específico seco, γ_{sat} é o peso específico saturado, e é o índice de vazios e v é o coeficiente de Poisson.

Tabela 2. Parâmetros validados.

Parâmetro	Areia fofa	Areia densa
m	0,69	0,74
Φ [°]	24,8	31
E_{50} [Mpa]	9,77	43,19
E_{ur} [Mpa]	29,31	129,57
E_{oed} [Mpa]	14,5	52
q_{ref} [Mpa]	40	100
γ_d [kN/m³]	12,6	14,6
γ_{sat} [kN/m³]	17,8	19,05
e	1,09	0,8
v	0,3	0,3

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a validação de modelos numéricos a partir de dados experimentais obtidos em ensaios triaxiais e de modelos físicos reduzidos de fundações rasas sobre areia reforçada com geogrelhas. A retroanálise paramétrica permitiu calibrar os parâmetros constitutivos do modelo hardening soil para areia fofa e densa, garantindo a coerência entre os resultados numéricos e experimentais.

Os resultados demonstraram que os modelos numéricos foram capazes de reproduzir adequadamente o comportamento observado nos ensaios físicos, tanto em termos de rigidez inicial quanto de resposta carga–recalque. Observou-se boa correlação entre os deslocamentos, tensões e deformações obtidos, indicando que os parâmetros validados representam de forma satisfatória o comportamento dos solos analisados.

Verificou-se que a areia densa apresentou maior rigidez e resistência ao cisalhamento, associadas à dilatância do material, enquanto a areia fofa exibiu comportamento mais deformável, conforme observado nos ensaios triaxiais e, consequentemente, nas simulações numéricas.

Conclui-se que a metodologia empregada é adequada para a validação de modelos numéricos aplicados à análise de fundações em solos arenosos, permitindo o uso confiável dos parâmetros obtidos em simulações futuras e contribuindo para o aprimoramento de estudos sobre o comportamento de maciços não coesivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 16840. Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro.

ASTM International (2020). ASTM D7181: Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils.

Albusoda, Bushra S.; Al-Saady, Semaa Z. (2020). Numerical Modeling of Square Footing Subjected to Eccentric Loading on Geogrid Reinforced Loose Sand. *Key Engineering Materials*, 857 (2020), p. 341-348.

Al-Jeznawi, Duaa; Al-Azzawi, Adel A. (2021). The Behavior of Strip Footing Resting on Soil Strengthened with Geogrid. *Civil and Environmental Engineering*, 17 (2), p. 597-609.

Bishop, A. W., Henkel D. J. (1962). *The measurements of soil properties in the triaxial test*. 2nd ed., Edward Arnold (publishers) LTD, London, 228 p.

Bowles, Joseph E., P.E., S.E. (1997). *Foundation analysis and design*. 5th ed., McGraw-hill, NY, USA, 1207 p.

Chua, Boon Tiong; Abuel-Naga, Hossam; Nepal, Kali Prasad. (2022). A Case Study on Unreinforced and Geogrid-Reinforced Working Platform Design by Finite Element Method. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 9 (5), p. 565-582.

Chua, Boon Tiong; Nepal, Kali Prasad. (2023). Numerical Modelling and Predicting Performance of Geogrid-Reinforced Low-Volume Unpaved Roads over Soft Subgrades. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4 (18), p. 876-891.

Chua, Boon Tiong; Nepal, Kali Prasad; Abuel-Naga, Hossam. (2023). Estimating the Bearing Capacity of a Square Footing on a Geogrid-Stabilised Granular Layer over Clay Using the Finite Element Method. *Advances in Civil Engineering*, 1 (2023), 3560697.

Corrêa, B. R. F. (2021). *Avaliação da inteação solo-estrutura-geossintético em fundações rasas reforçadas com geogrelha*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro / UENF, 110 p.

Das, Braja M. (2007). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6th ed. Thomson Learning, California State University, Sacramento, USA, 562 p.

El-Soud, S. A., Belal, A. M. (2019). Numerical modeling of rigid strip shallow foundations overlaying geosythetics-reinforced loose fine sand deposits. *Arabian Journal of Geosciences*, 12 (7), 254.

Fernandes, H.D. (2019). *Análise Numérica da Interação Solo-Geogrelha Aplicada como Reforço de Maciços em Fundações Rasas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro / UENF, 102 p.

Hussein, Mahmoud G., Meguid, Mohamed A. (2020). Improved understanding of geogrid response to pullout loading: insights from three-dimensional finite-element analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 57 (2), p. 277-293.

Ksheeraja, A. L., Srilatha, N. (2021). Application of Geosynthetics for Geotechnical Challenges. In: Ground Improvement and Reinforced Soil Structures - Indian Geotechnical Conference 2, Singapore, *Anais*… Springer Singapore, p. 317-327.

Kumar, V.; Vieira, A. M. P.; Pierozan, R. C.; Portelinha, F. H. M. (2024). Numerical analysis of a laboratory-modelled geosynthetic-partially encased columns applied as shallow foundation support in frictional-cohesive soils. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10 (2), p. 3003-3022.

Laboudi, K. (2024). FEM Investigation on the Secondary Reinforcement Effect on Shallow Foundation Seated on Geosynthetic Reinforced Soil. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11 (4), p. 2221-2234.;

Lopes, A. C. C. (2019). *Interação solo-geossintético-estrutura de fundações rasas reforçadas com geogrelha em solo transparente*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro / UENF, 146 p.

Sahu, R.; Patra, C. R.; Sivakugan, N.; Das, B. M. (2020). Behavior of Inclined Loaded Strip Footings Resting on Geogrid–Reinforced Sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38 (5), p. 5245-5256.

Yalaoui, N.; Trouzine, H.; Meghachou, M.; Miranda, T. F. (2023). Geotextile reinforced strip footing: numerical modeling and analysis. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 10 (2), p. 398-404.