DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/30

Avaliação do Desempenho de Fundação Rasa em Solos de Baixa Resistência com Emprego de Camada de Areia Compactada

Italo Santos Guimarães
Mestrando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, italosantos1203@gmail.com

Jean Rodrigo Garcia
Professor Doutor, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, jean.garcia@ufu.br

Alisson Filmiano Andrade Lopes
Doutorando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, alisson.lopes@ufu.br

RESUMO: O desempenho de fundações rasas depende diretamente das propriedades do solo, sendo frequentemente comprometido em solos lateríticos colapsíveis, caracterizados por baixa capacidade de suporte e elevada deformabilidade. Uma alternativa prática para mitigar essas limitações é o emprego de uma camada de areia compactada sob a base da fundação, com o objetivo de redistribuir as tensões e reduzir os recalques. Neste trabalho, avalia-se a influência de uma camada de areia compactada no comportamento da fundação rasa por meio de análise experimental e numérica. Os resultados obtidos em um ensaio de carga em placa de aço executado sobre uma camada de areia compactada, implantada na mesma cota de assentamento, são comparados aos resultados de uma prova de carga estática em uma fundação rasa circular em concreto armado apoiada diretamente sobre o solo laterítico colapsível do mesmo sítio experimental. Adicionalmente, foi desenvolvida uma análise numérica para simular o ensaio em placa e analisar a distribuição de tensões no solo. Os resultados indicam que a utilização da camada de areia compactada promove melhor redistribuição das tensões e redução dos recalques, configurando-se como uma técnica simples e eficiente para a melhoria do desempenho de fundações rasas em solos de baixa capacidade de suporte.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação rasa, camada de areia compactada, capacidade de suporte, recalque, elementos finitos.

ABSTRACT: The performance of shallow foundations depends directly on the soil properties, being frequently compromised in collapsible lateritic soils, characterized by low bearing capacity and high deformability. A practical alternative to mitigate these limitations is the use of a compacted sand layer beneath the foundation base, with the objective of redistributing stresses and reducing settlements. In this study, the influence of a compacted sand layer on the behavior of a shallow foundation is evaluated through experimental and numerical analysis. The results obtained in a steel plate load test carried out on a compacted sand layer, installed at the same founding level, are compared to the results of a static load test on a circular reinforced concrete shallow foundation directly supported on the collapsible lateritic soil at the same experimental site. Additionally, a numerical analysis was developed to simulate the plate load test and to analyze the stress distribution in the soil. The results indicate that the use of the compacted sand layer promotes better stress redistribution and reduction of settlements, constituting a simple and efficient technique for improving the performance of shallow foundations on soils with low bearing capacity.

KEYWORDS: Shallow foundation; compacted sand layer; bearing capacity; settlement; finite element

1 INTRODUÇÃO

Com a expansão dos centros urbanos, a disponibilidade de terrenos com boas características geotécnicas se torna cada vez mais escassa e, consequentemente, esses terrenos passam a ser supervalorizados. Esse cenário leva, de forma praticamente inevitável, à ocupação de áreas com solos de baixa resistência, o que impõe desafios significativos para a implantação de fundações. Em muitos casos, esses solos apresentam elevada

deformabilidade, resultando em recalques excessivos. Embora fundações profundas sejam frequentemente adotadas, seu emprego pode se tornar técnica e economicamente menos interessante em obras de pequeno e médio porte, o que reforça a necessidade de alternativas de melhoria do solo superficial.

Dentre as técnicas de melhoria do solo, o emprego de camadas granulares compactadas sob a base da fundação destaca-se por sua simplicidade construtiva, baixo custo relativo e eficácia. A introdução de uma camada de areia compactada promove uma melhor distribuição das tensões transmitidas pela fundação, contribuindo para a redução dos recalques e para o aumento da capacidade de suporte da fundação (Fattah *et al*, 2014).

A avaliação do desempenho de fundações rasas sobre solos melhorados pode ser realizada de forma eficiente por meio de ensaios de prova de carga estática, que fornecem uma representação direta do comportamento do sistema em campo. Demir *et al.* (2013) realizaram ensaios de placa em diversos cenários de reforço de solo para fundações rasas, dentre os quais a substituição de uma camada do solo natural por areia compactada. Os resultados indicaram aumento da capacidade de carga e a redução dos recalques, com ganhos da ordem de 40% em comparação aos ensaios realizados diretamente sobre o solo na condição *in situ*.

Além disso, o uso de ferramentas de modelagem numérica baseadas no Método de Elementos Finitos complementa a análise experimental, permitindo a interpretação dos mecanismos de transferência de tensões, a análise do bulbo de tensões e a extrapolação dos resultados experimentais para outras condições de projeto.

Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo avaliar a influência da utilização de uma camada de areia compactada no desempenho de fundação rasa sobre solo de baixa capacidade de suporte, com base em resultados experimentais de provas de carga estática e em análises numéricas por elementos finitos. Busca-se, assim, contribuir para a consolidação dessa técnica como uma alternativa viável e eficiente para a melhoria do comportamento de fundações rasas em solos problemáticos.

2 PROVA DE CARGA ESTÁTICA

Os ensaios foram realizados no Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Universidade Federal de Uberlândia, localizado no município de Uberlândia (MG). Para este trabalho, foram consideradas duas provas de cargas executadas no campo experimental. A primeira prova de carga foi realizada no âmbito do presente estudo, utilizando uma placa rígida de 0,50 m de diâmetro, apoiada sobre uma camada de areia compactada com 0,30 m de espessura (Figura 1a). A segunda foi realizada por Oliveira (2022) em uma sapata circular de concreto armado em escala real, com 1m de diâmetro e 0,20 m de altura apoiada diretamente sobre o solo, sob condição de umidade *in situ*. (Figura 1b). Ambos os ensaios seguiram as recomendações da ABNT NBR 6489:2019, sendo executados sob regime de carregamento lento.

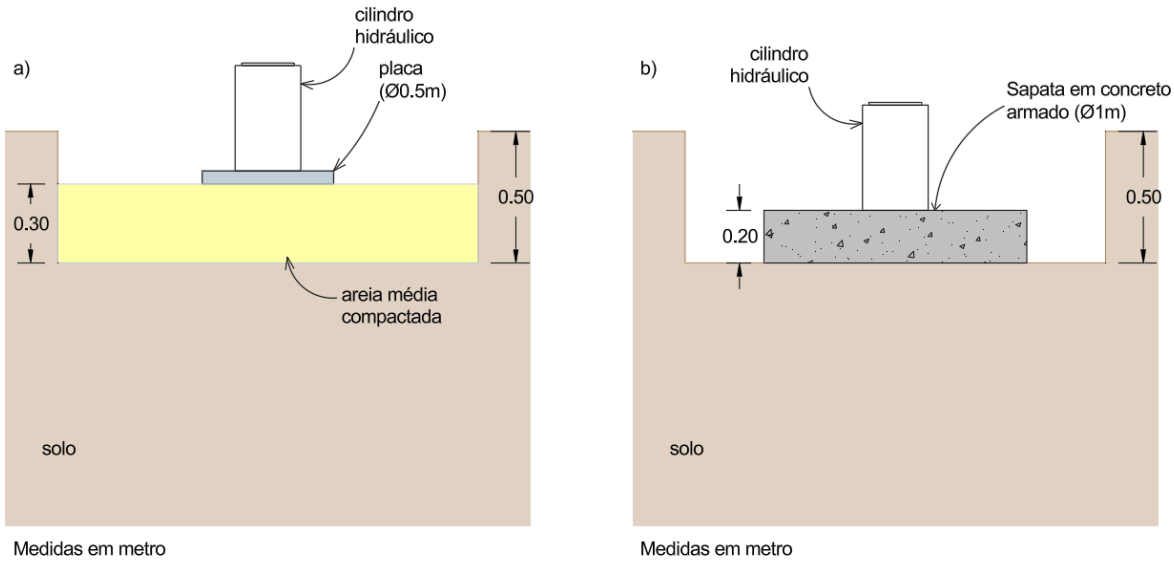


Figura 1. Cenários das provas de carga estática consideradas neste estudo: **(a)** ensaio de carga em placa rígida sobre camada de areia compactada, executado na mesma cota de assentamento; **(b)** ensaio em sapata circular de concreto armado apoiada diretamente sobre o solo natural, conforme Oliveira (2022).

2.1 Critério de parada

De acordo com a norma ABNT NBR 6489:2019, o ensaio de prova de carga deve ser levado até, pelo menos, o dobro da tensão admissível do solo ou até que seja atingido o deslocamento máximo definido pelo projetista. No presente trabalho, ambas as provas de carga foram levadas até um recalque mínimo de 25mm, critério adotado conforme o código de obras da cidade de Boston, descrito em Teixeira e Godoy (2016).

2.2 Ajuste de recalque

Devido as provas de carga terem sido realizadas em fundações diferentes, em sapata de concreto armado com 1 m de diâmetro e em placa de aço com 0,5 m de diâmetro, e, para possibilitar a comparação entre os resultados das provas de carga realizadas em fundações com diâmetros distintos, torna-se necessário ajustar os valores de recalque obtidos no ensaio de placa para um diâmetro equivalente ao da fundação ensaiada por Oliveira (2022). Para esse fim, diversos autores propõem métodos de extrapolação de recalques. Neste artigo adotou-se o método proposto por de Sowers (1962 *apud* Albuquerque e Garcia, 2020), conforme apresentado na Equação 1.

$$\rho_f = \rho_p \cdot \left[\frac{B_f \cdot (B_p + 0{,}30)}{B_p \cdot (B_f + 0{,}30)}\right]^2 \quad (1)$$

Legenda:
ρ_f : Recalque da fundação real
ρ_p : Recalque do ensaio de placa
B_f : Largura da fundação real
B_p : Largura da placa

3 ANÁLISE NUMÉRICA

A modelagem numérica foi realizada com base na prova de carga em placa executada sobre camada de areia compactada, com o objetivo de reproduzir o comportamento da fundação e complementar a análise dos resultados experimentais. O método dos elementos finitos foi empregado para a simulação da prova de carga estática, permitindo a avaliação do comportamento tensão-recalque e da distribuição de tensões no maciço de solo.

As análises foram conduzidas por meio de simulações bidimensionais axissimétricas, adotando-se uma geometria representativa da placa circular utilizada no ensaio. Conforme Figura 2, o domínio do modelo apresentou dimensões de 10 × 10 m, com refinamento progressivo da malha na região de aplicação da carga.

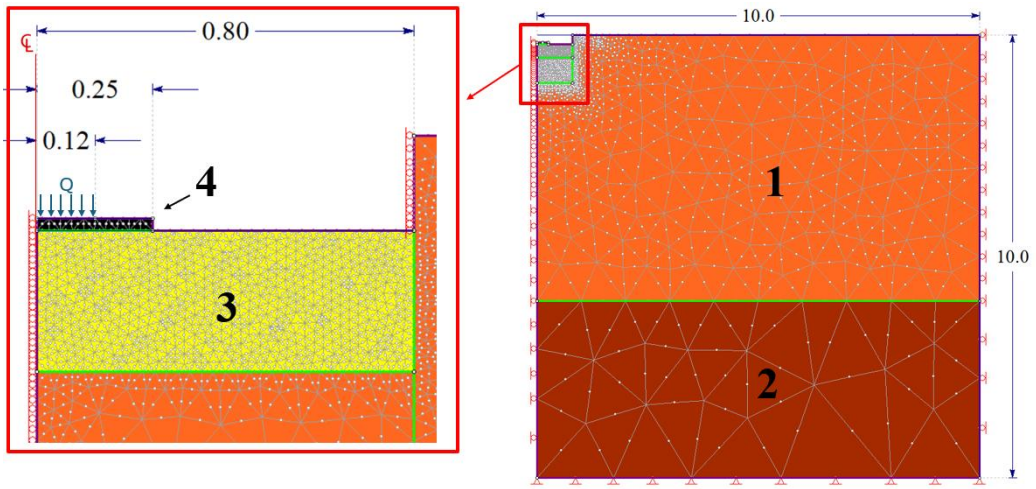


Figura 2. Modelo numérico axissimétrico em elementos finitos adotado para a simulação da prova de carga em placa sobre camada de areia compactada, com destaque para o domínio total do modelo e o refinamento da malha na região de aplicação da carga: **(1)** solo natural, **(2)** camada inferior do domínio, **(3)** camada de areia compactada e **(4)** placa rígida.

Foram utilizados elementos triangulares de seis nós. As condições de contorno consistiram na restrição dos deslocamentos horizontais nas fronteiras laterais e na restrição total de deslocamentos na base do modelo. O carregamento foi aplicado de forma incremental, de modo a reproduzir as etapas do ensaio de carga em placa.

Para a representação do comportamento da areia compactada e a validação da modelagem numérica, foram avaliados três modelos constitutivos: Mohr-Coulomb (MC), Mohr-Coulomb com *Cap* (MC with Cap) e Hardening Soil com rigidez a pequenas deformações (HS with Small Strain Stiffness). A comparação entre os modelos permitiu avaliar a capacidade de cada formulação em representar a rigidez inicial, a não linearidade da resposta tensão-recalque e a evolução dos recalques, possibilitando a seleção do modelo constitutivo mais adequado para a simulação do ensaio. Os parâmetros dos solos utilizados como dados de entrada nos modelos numéricos são apresentados na Tabela 1.

Modelos constitutivos distintos foram atribuídos às diferentes regiões do modelo em função das características mecânicas e do comportamento esperado de cada material. A partir da comparação entre os modelos constitutivos avaliados, selecionou-se aquele que apresentou melhor concordância com os resultados experimentais, sendo adotado nas análises apresentadas na seção seguinte.

Tabela 1. Parâmetros de entrada adotados na análise numérica

Material	3	3	3	1	2	4
Descrição	Areia	Areia	Areia	Areia Argilo-siltosa	Areia Argilo-siltosa	Aço
Modelo constitutivo	Morh-Culomb	Morh-Culomb with Cap	HS with Small Strain Stiffness	Morh-Culomb with Cap	Morh-Culomb with Cap	Morh-Culomb
Peso específico [kN/m³]	17	17	17	16	16	78
Ângulo de atrito [°]	35	36	36	23	30	0
Coesão [kPa]	0	0	1	9	10	100000
Modulo de Young [MPa]	5	5	-	12	15	2E+05
Coeficiente de Poisson [-]	0,3	0,3	0,3	0,35	0,35	0,3
l-k [-]	-	0,3	0,55	0,12	0,11	-
Pp [kPa]	-	48	27,5	60	100	-
Failure Ratio (Rf) [-]	-	-	0,9	-	-	-
K0 [-]	-	-	0,4	-	-	-
OCR [-]	-	-	1,5	-	-	-
E50_ref [kPa]	-	-	8000	-	-	-
Eoed_ref [kPa]	-	-	5000	-	-	-
Eur_ref [kPa]	-	-	24000	-	-	-
Expoente m [-]	-	-	0,5	-	-	-
Pressão de referência [kPa]	-	-	100	-	-	-
p_limit [kPa]	-	-	100	-	-	-
G0_ref [kPa]	-	-	120000	-	-	-
γ0.7 [-]	-	-	2,00E-05	-	-	-

Nota: Os números indicam as regiões do modelo numérico conforme identificadas na Figura 2.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 Provas de carga

Para possibilitar a comparação entre os resultados das provas de carga realizadas em fundações com diâmetros distintos, tornou-se necessário ajustar os valores de recalque obtidos no ensaio de placa para uma fundação de mesmo diâmetro daquela estudada por Oliveira (2022). Para isso, foram empregadas extrapolações de recalque propostas na literatura, adotando-se neste trabalho o método de Sowers (1962, *apud* Albuquerque e Garcia, 2020), conforme apresentado na Equação 1. Ressalta-se que a extrapolação foi aplicada aos resultados do sistema reforçado com camada de areia compactada, permitindo avaliar o efeito conjunto da escala geométrica e do reforço do solo de apoio.

Conforme apresentado na Figura 3, a curva tensão-deformação do ensaio de placa permite avaliar o comportamento da fundação reforçada com camada de areia compactada sob carregamento. No ensaio, foi aplicada uma carga nominal máxima de 25 kN, correspondente a uma tensão de 132,6 kPa, resultando em um recalque máximo de 30,4 mm. Considerando um recalque de 25 mm, recalque convencionado para carga de ruptura, a tensão correspondente nesse ensaio foi de 123 kPa.

Aplicando-se a extrapolação dos recalques obtidos no ensaio de placa para uma fundação de 1,0 m de diâmetro, obtém-se a curva tensão-deformação corrigida. Verifica-se que, para um recalque de 25 mm, a tensão correspondente para a fundação de maior diâmetro é da ordem de 109 kPa.

Comparando-se os resultados do ensaio de placa corrigido com aqueles apresentados por Oliveira (2022), observa-se que, embora nos estágios iniciais de carregamento a fundação no solo natural apresente maior rigidez, tendo recalques menores, com o incremento da carga a fundação com camada de areia compactada passa a apresentar melhor desempenho, atingindo um recalque de 25 mm sob uma carga aproximadamente 19% superior àquela suportada pela fundação assentada diretamente sobre o solo natural.

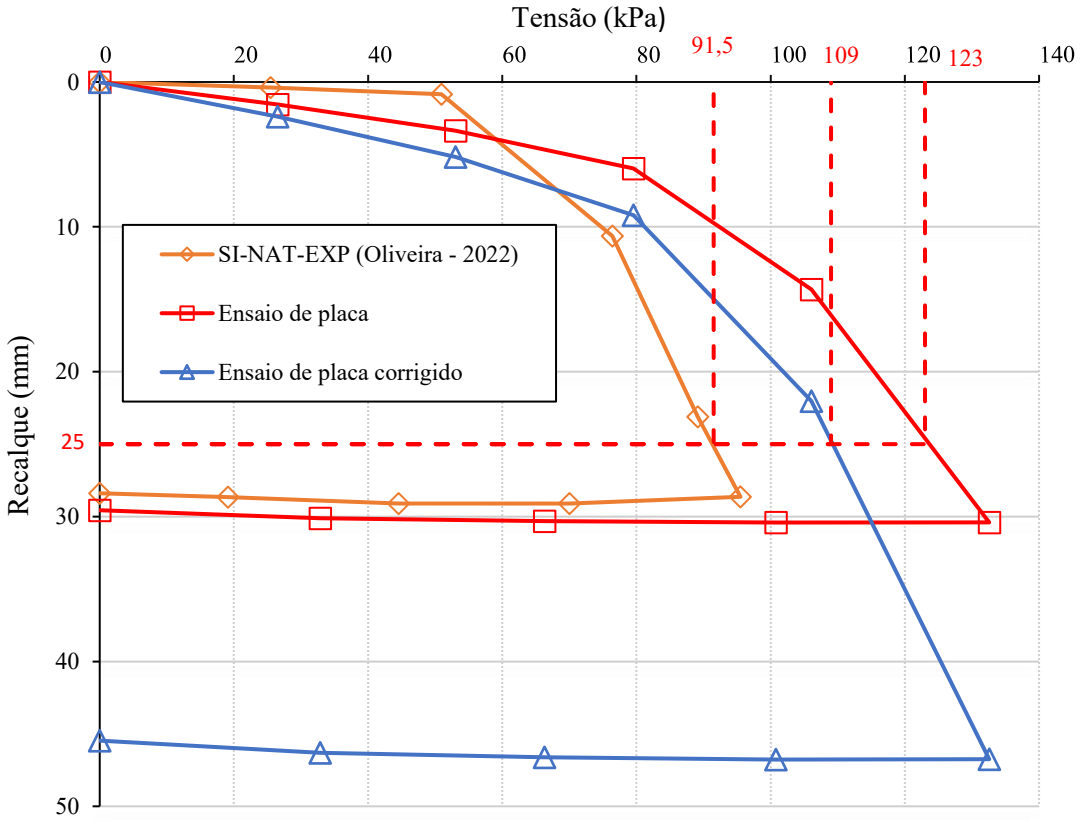


Figura 3. Curvas tensão-recalque das provas de carga estática realizadas na condição de umidade natural, incluindo os resultados do ensaio em placa, do ensaio em placa com recalque extrapolado e da fundação apoiada diretamente sobre o solo natural.

Dessa forma, mesmo após a extrapolação dos recalques para um diâmetro equivalente, os resultados da fundação reforçada com camada de areia compactada não se tornam equivalentes àqueles obtidos sobre o solo natural. Isso ocorre porque a presença da camada de areia compactada modifica o mecanismo de redistribuição de tensões e a rigidez global do sistema solo-fundação.

4.2 Análise numérica

4.2.1 Calibração do modelo

Como pode ser observado na Figura 4, o modelo constitutivo Mohr-Coulomb com *cap* adotado para a areia foi o que apresentou melhor concordância com o comportamento experimental obtido no ensaio de carga em placa. Esse modelo foi capaz de representar de forma mais adequada a rigidez inicial do sistema, bem como a não linearidade da resposta tensão-recalque associada ao incremento das cargas aplicadas.

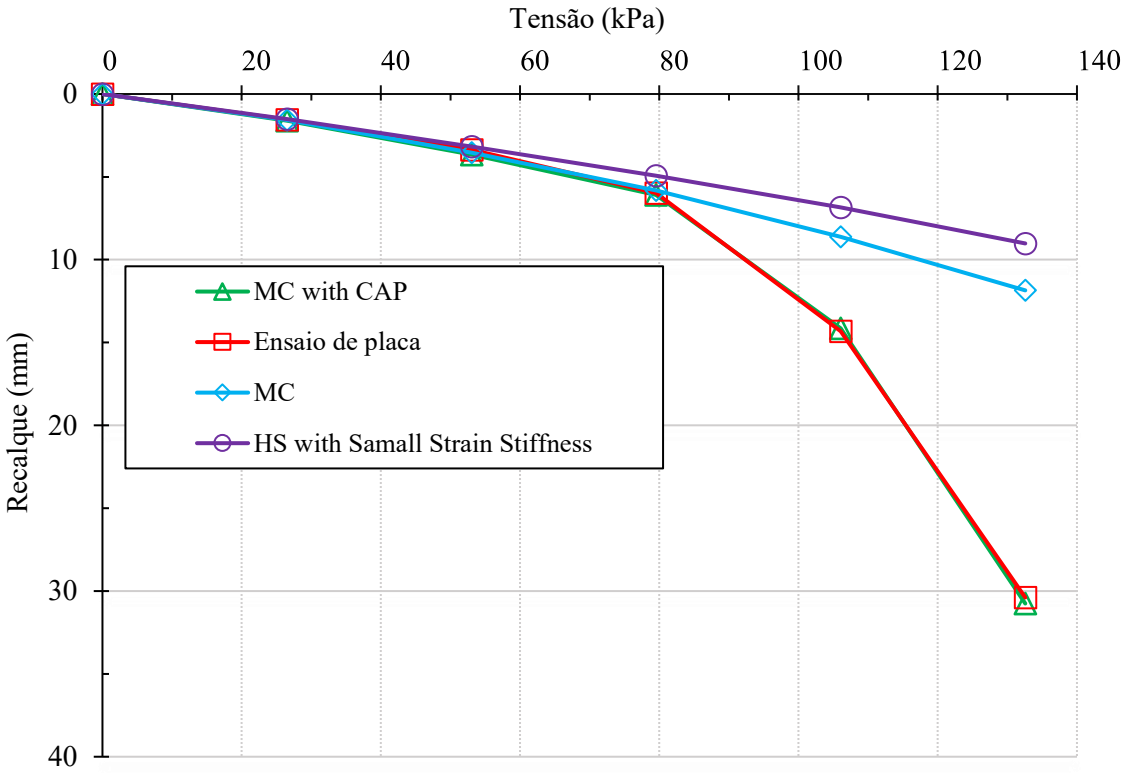


Figura 4. Calibração do modelo numérico

4.2.2 Tensões e recalques

Observa-se, na Figura 5, no estágio 5, correspondente ao maior nível de carregamento aplicado, o campo de tensões principais máximas (σ_1) evidencia concentração mais pronunciada na camada de areia compactada, imediatamente abaixo da fundação, onde os valores atingem aproximadamente 130 kPa. No solo natural subjacente, logo abaixo da interface areia-solo natural, observam-se tensões da ordem de 90 kPa, indicando uma redução significativa na magnitude das solicitações transmitidas às camadas inferiores. Esse padrão de distribuição revela a atuação da camada de areia como elemento de redistribuição de tensões, promovendo o espraiamento do carregamento e a atenuação dos picos tensionais ao longo da profundidade. Como resultado, há diminuição da intensidade das tensões incidentes sobre o solo natural, o que contribui para um comportamento global mais favorável do sistema de fundação. Além disso, a Figura 5 também ilustra a progressão das tensões σ_1 e dos recalques com o incremento do carregamento aplicado.

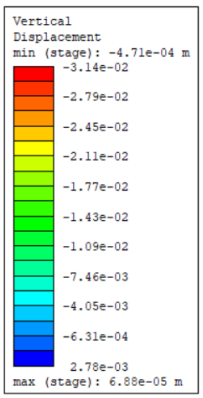
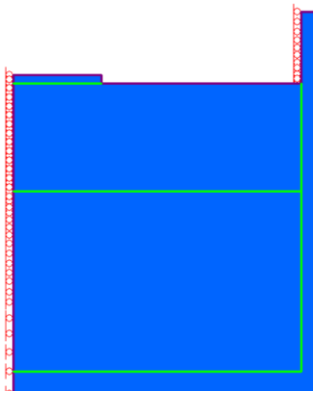
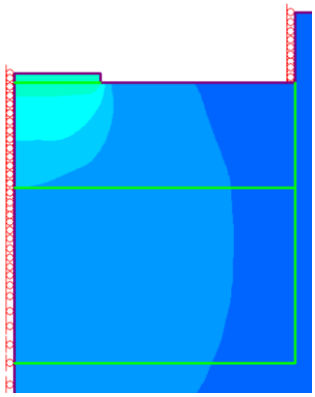
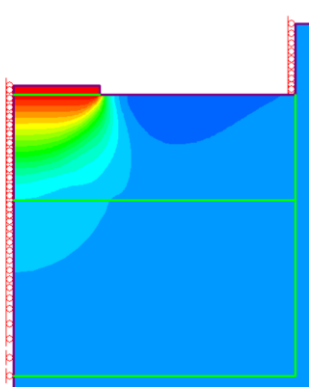
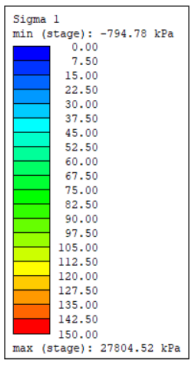
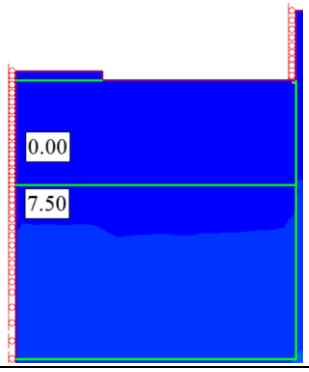
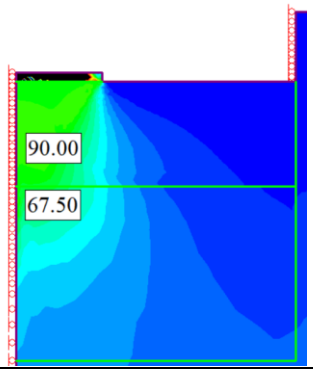
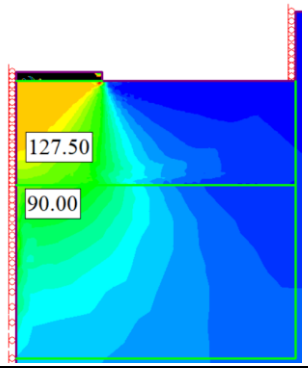
Referência	Estágio 0 - 0kPa (0%)	Estágio 3 - 79,5kPa (60%)	Estágio 5 - 132,6kPa (100%)
Deslocamentos verticais	Deslocamentos verticais	Deslocamentos verticais	Deslocamentos verticais
			
Tensões σ1	Tensões σ1	Tensões σ1	Tensões σ1
			

Figura 5. Mapa de deslocamentos verticais e tensoes σ1 à 0%, 60% e 100% da carga total aplicada.

5 CONCLUSÕES

Neste artigo, avaliou-se a melhoria do comportamento de fundação rasa a partir de provas de carga estática realizadas em uma sapata circular de 1 m de diâmetro apoiada diretamente sobre o solo natural (que teve seus resultados compatibilizados para uma fundação com diâmetro de 0,5 m), e em placa com 0,5 m de diâmetro apoiada sobre uma camada de areia compactada com 0,30 m de espessura. Adicionalmente, foi realizada modelagem numérica com o objetivo de analisar a distribuição de tensões no maciço de solo.

Os resultados indicaram que a utilização de uma camada de areia compactada proporcionou aumento da capacidade de carga da fundação quando comparada à fundação assentada diretamente sobre o solo natural, com um ganho de aproximadamente 19% para um recalque de 25 mm. Observou-se que, nos estágios iniciais de carregamento, a fundação sobre o solo natural apresentou comportamento mais rígido, caracterizado por menores recalques iniciais. Entretanto, com o incremento das cargas aplicadas, o sistema reforçado com camada de areia compactada passou a apresentar melhor desempenho global.

A modelagem numérica evidenciou que o modelo constitutivo Mohr Coulomb com *cap* foi o mais adequado para representar o comportamento da areia sob carregamento, visto que representou de forma acertiva tanto a rigidez inicial do carregamento, quanto a não linearidade dos deslocamentos proximos a carga de ruptura. Verificou-se, ainda, que a presença da camada de areia atua de forma eficiente na redistribuição das tensões, reduzindo as concentrações no solo subjacente e promovendo um espalhamento mais uniforme do bulbo de tensões, o que contribui para a redução dos recalques e para a melhoria do desempenho do sistema solo-fundação.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Universidade Federal de Uberlândia pela aquisição da licença de uso do software RS2, da Rocscience, empregado no desenvolvimento deste artigo e da pesquisa que lhe deu origem. Agradece-se, ainda, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Geo Soluções pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. (2019). *NBR 6489 - Prova de carga estática em fundação direta*.

Albuquerque, P. J. R., & Garcia, J. R. (2020). *Engenharia de Fundações*. LTC.

Demir, A., Laman, M., Yildiz, A., & Ornek, M. (2013). Large scale field tests on geogrid-reinforced granular fill underlain by clay soil. *Geotextiles and Geomembranes*, *38*, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.05.007

Fattah, M. Y., Al-Mosawi, M. J., & Al-Zayadi, A. A. O. (2014). Contribution to long term performance of piled raft foundation in cleyey soil. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, *5*(7), 130–148.

Oliveira, E. (2022). *Análise experimental e numérica do comportamento de sapata estaqueada em solo tropical* [Universidade Federal de Uberlândia]. https://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.5055

Teixeira, A. H., & Godoy, N. S. (2016). Análise, projeto e execução de fundações rasas. In *Fundações: Teoria e Prática* (2nd ed., p. 802). Pini.