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/COBRAMSEG2026.5/82

Modelagem Numérica em Radier Apoiado em Colunas de Brita Cimentada

Lanay Fernandes Gomes
Bolsista de Iniciação Científica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Brasil, E-mail: lanay.fernandes@hotmail.com

Osvaldo de Freitas Neto
Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Brasil, E-mail: osvaldo.neto@ufrn.br

Ricardo Nascimento Flores Severo
Professor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, Brasil, E-mail: ricardo.severo@ifrn.edu.br

Olavo Francisco dos Santos Jr.
Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Brasil, E-mail: olavo.santos@ufrn.br

Gustavo Clementino Santos
Aluno de Mestrado, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil, E-mail: gustavocsantos.eng@gmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta o estudo de fundações de um conjunto de edifícios em alvenaria estrutural, localizado na região metropolitana de Natal (RN), inicialmente projetados com fundações em radier isolado. Cada radier possui dimensões de 28 m × 11 m e espessura de 15 cm. As investigações geotécnicas, realizadas por sondagens com circulação de água, identificaram uma camada superficial de areia siltosa fofa com 3 m de espessura, seguida por uma camada de argila mole com cerca de 6 m de espessura, sobrejacentes a sedimentos da Formação Barreiras. A avaliação do desempenho da fundação foi realizada exclusivamente por meio de simulações numéricas utilizando o software ELPLA, baseado no método dos elementos finitos, sem a realização de comparações com recalques medidos em campo. Para a solução em radier isolado, os resultados indicaram recalques totais da ordem de 73 mm, considerados excessivos para edificações em alvenaria estrutural. Em função desses resultados, foi proposta a adoção de colunas de brita cimentada como técnica de melhoramento de solo. Diferentes configurações foram analisadas, variando diâmetro, comprimento e quantidade de colunas. A solução considerada ótima consistiu na execução de 70 colunas por radier, com 0,25 m de diâmetro e 8 m de comprimento. Os resultados indicaram redução dos recalques totais para cerca de 38 mm, evidenciando melhora significativa na uniformização dos deslocamentos. Conclui-se que as colunas de brita cimentada representam uma alternativa técnica viável e eficiente para fundações em solos compressíveis, ressaltando a importância da integração entre investigação geotécnica e modelagem numérica, cuja abordagem teórica e simulada deve ser considerada na interpretação dos resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Radier Estaqueado, Melhoramento do Solo, Redução de Recalques.

ABSTRACT: This study presents the foundation analysis of a complex of structural masonry buildings located in the metropolitan area of Natal (RN), Brazil, initially designed with isolated raft foundations. Each raft has dimensions of 28 m × 11 m and a thickness of 15 cm. Geotechnical investigations, conducted through wash borings, identified a 3-m-thick surficial layer of loose silty sand, followed by a soft clay layer approximately 6 m thick, overlying sediments of the Barreiras Formation. The foundation performance was evaluated exclusively through numerical simulations using ELPLA software, based on the finite element method, without

comparisons to field-measured settlements. For the isolated raft solution, results indicated total settlements of around 73 mm, which are considered excessive for structural masonry buildings. Based on these findings, the adoption of cemented stone columns was proposed as a ground improvement technique. Different configurations were analyzed by varying the columns' diameter, length, and quantity. The optimized solution consisted of 70 columns per raft, with a diameter of 0.25 m and a length of 8 m. The results showed a reduction in total settlements to about 38 mm, demonstrating a significant improvement in displacement uniformity. It is concluded that cemented stone columns represent a technically viable and efficient alternative for foundations on compressible soils, highlighting the importance of integrating geotechnical investigation and numerical modeling, whose theoretical and simulated approach must be considered when interpreting the results.

KEYWORDS: Piled Raft Foundation, Ground Improvement, Settlement Reduction

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a alvenaria estrutural tem sido amplamente utilizada em edificações residenciais de pequeno e médio porte, sobretudo em razão da racionalização construtiva, redução de custos e rapidez de execução. Nesse sistema, as paredes exercem a função tanto de vedação, como estrutural, resultando em uma distribuição de cargas predominantemente contínua ao longo da fundação. Essa característica torna o desempenho do sistema de fundações particularmente sensível aos recalques (totais e diferenciais), os quais podem comprometer o comportamento estrutural e a durabilidade da edificação. Para esse tipo de sistema, geralmente é utilizado o radier (fundação superficial) como solução para fundação, devido à sua capacidade de distribuir uniformemente as tensões no solo. Entretanto, em situações em que o solo apresenta elevada compressibilidade ou baixa rigidez, o uso exclusivo do radier pode conduzir a recalques excessivos, ainda que as tensões admissíveis não sejam ultrapassadas.

Nesse contexto, uma solução mista (radier estaqueado) surge como uma alternativa eficiente, combinando os mecanismos de resistência de fundações superficiais e profundas. Nesse sistema, o radier atua de forma conjunta com estacas, que têm como principal função reduzir os recalques e aumentar a rigidez global da fundação. Tal solução tem se mostrado particularmente vantajosa em situações em que o controle de deformações é o fator de projeto dominante.

Este artigo apresenta um estudo de caso de um edifício residencial de três pavimentos em alvenaria estrutural, inicialmente projetado com fundação em radier, cuja solução foi revista para um radier estaqueado visando à mitigação dos recalques previstos. São discutidos os critérios adotados na escolha da solução mista e os benefícios observados em termos de desempenho geotécnico da fundação, sendo esta avaliação realizada por meio de análises e simulações numéricas, abstendo-se de comparações com recalques medidos em campo.

2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DO LOCAL

2.1 Geologia e resultado das sondagens

A área de estudo está localizada na região metropolitana de Natal/RN, no município de Parnamirim/RN. De acordo com o mapa geológico do município de Parnamirim/RN, o local encontra-se em uma região de predominância do grupo Barreiras, como indica a Figura 1.

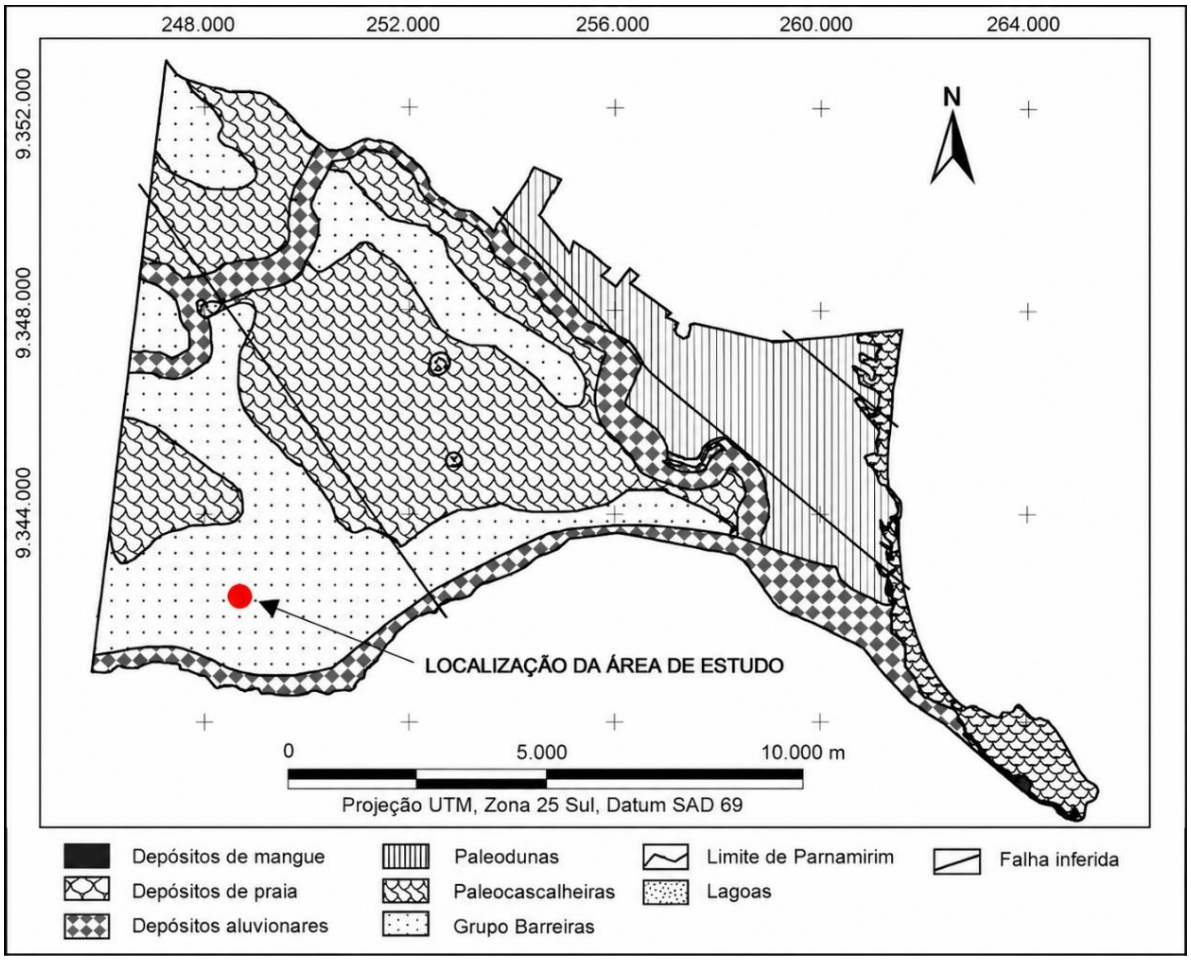


Figura 1. Mapa geológico do município de Parnamirim/RN (Fonte: Medeiros, Petta e Duarte, 2005).

A planta de locação e os perfis das sondagens à percussão executadas na área de estudo estão apresentados na Figura 2. Os resultados indicam que o subsolo do local é constituído inicialmente por uma camada superficial que varia de 1 a 3 metros de profundidade aproximadamente, composta por uma areia fina/média, de cor marrom, pouco compacta e fofa. Logo em seguida, de 3 metros até 8 metros de profundidade aproximadamente, encontra-se uma camada de uma argila siltosa misturada com uma areia de textura variada, na tonalidade marrom, no estado mole/ média. Por último, a partir de 8 metros de profundidade até em torno de 17 metros, observa-se a presença de sedimentos da Formação Barreiras. Esta é composta por camadas de areias e argilas variegadas com presença de concreções ferruginosas, com uma maior capacidade de suporte em relação as camadas superiores. O nível de água não foi encontrado nas sondagens realizadas.

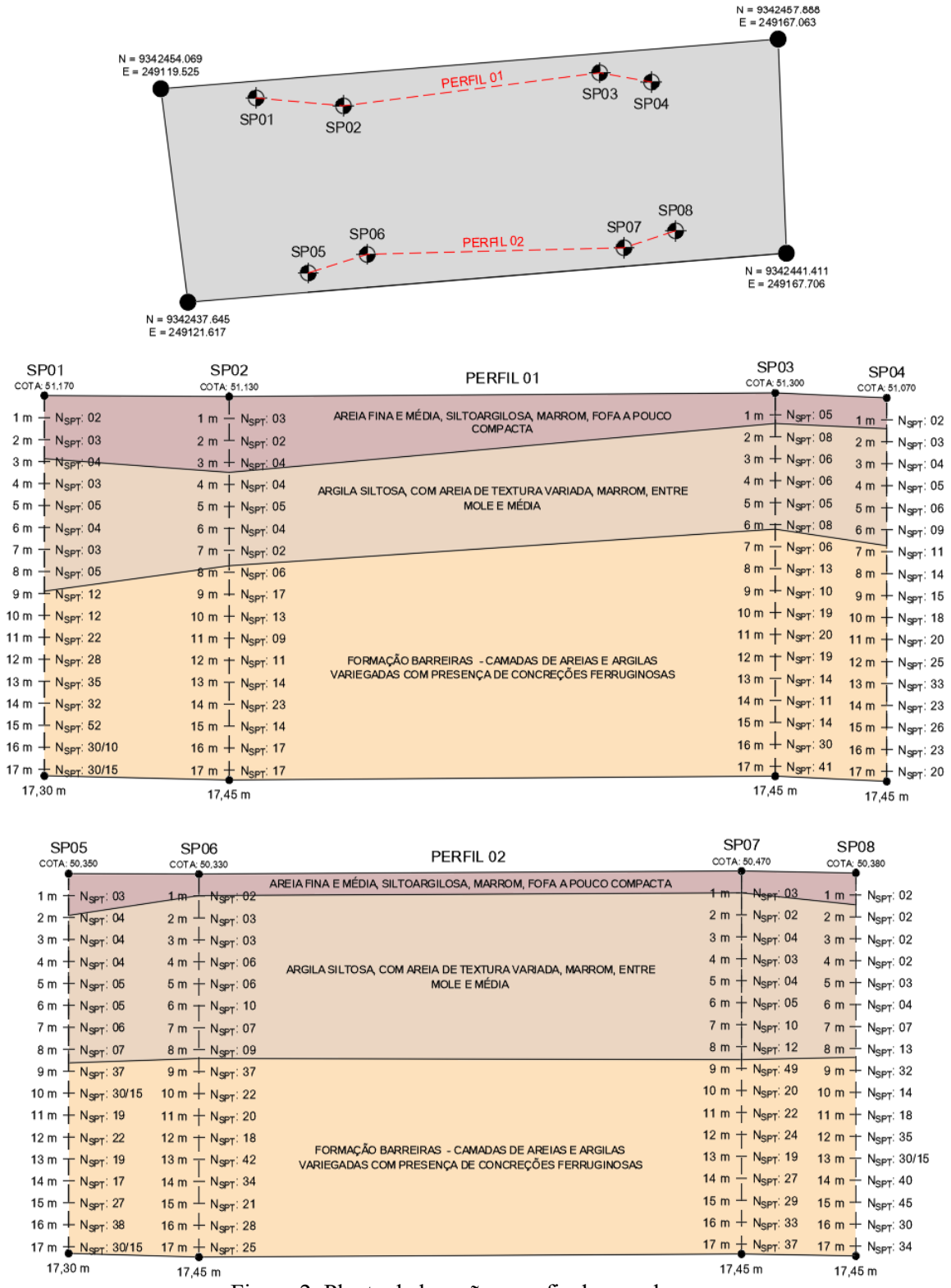


Figura 2. Planta de locação e perfis das sondagens.

2.2 Propriedades geotécnicas

As propriedades geotécnicas de interesse ao estudo e modelagem do problema foram obtidas a partir da interpretação dos resultados das sondagens, à luz da bibliografia a respeito de sedimentos da Formação Barreiras na região objeto do estudo (Coutinho e Severo, 2009; Santos Jr., Coutinho e Severo, 2015; Sousa,

2018 e Silva, 2019). As propriedades estimadas, considerando comportamento elástico linear, são apresentadas na Tabela 1. Um aspecto importante em relação ao comportamento dos solos diz respeito ao fato de estarem em condição não saturada.

Tabela 1. Propriedades geotécnicas dos solos da área.

Camada	Material	Peso específico (kN/m³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (º)	Módulo de deformação (kPa)	Coeficiente de Poisson
01 (0 m – 3 m)	Areia silto-argilosa fofa	18	0	28	2500	0,30
02 (3 m – 9 m)	Argila siltosa mole a média	16	5	10	2500	0,40
03 (9 m – 12 m)	Sedimentos da Formação Barreiras	18	10	30	10000	0,35
04 (12 m – 30 m)		20	30	25	30000	0,30

3 DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO ADOTADA

O empreendimento analisado nesse artigo consiste em um condomínio com quatro blocos de três pavimentos projetados em alvenaria estrutural. Cada bloco possui dimensões em planta de aproximadamente 8,00 m x 28,25 m. A primeira alternativa avaliada foi a utilização de um radier. Nesse caso, seria projetada uma placa de concreto armado abrangendo toda a área da edificação. De acordo com o projeto estrutural, o total de cargas atuantes no radier é de 675,74 tf, distribuídas ao longo de 154,16 m lineares de paredes de alvenaria estrutural. Na modelagem numérica, esse carregamento foi discretizado e aplicado como carga linear uniformemente distribuída ao longo dos elementos correspondentes às paredes estruturais, resultando em uma intensidade média de 4,38 tf/m.

A segunda alternativa consistiu na utilização de uma fundação mista. Ou seja, um radier apoiado sobre colunas de brita cimentada. Neste caso as colunas de brita foram projetadas para redução de recalques tendo o comportamento semelhante a estacas convencionais. Dessa forma, o sistema de fundação se assemelha a um radier estaqueado. No total foram projetadas 70 colunas de brita cimentada com 0,25 m de diâmetro e 8 m de comprimento. A Figura 3 apresenta a distribuição das colunas no radier.

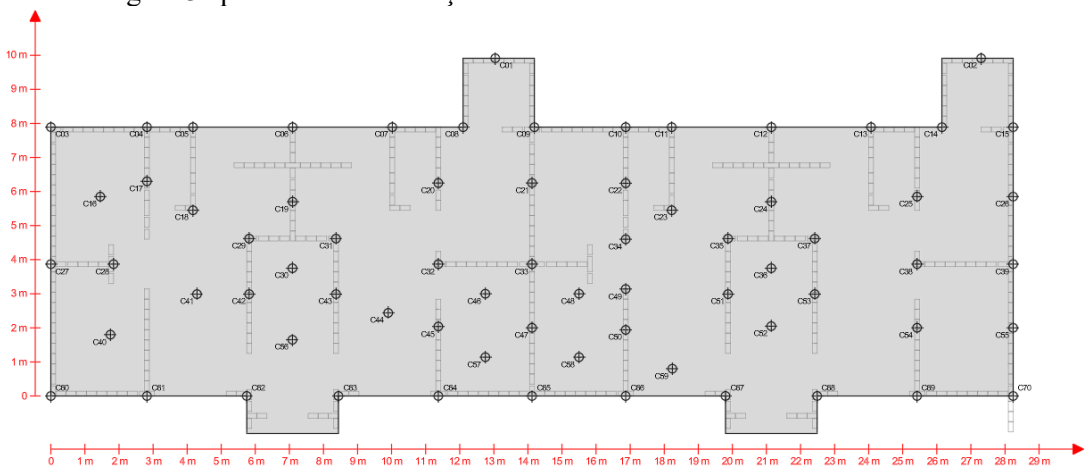


Figura 3. Distribuição das colunas de brita cimentada.

4 MODELAGEM DO PROBLEMA

A modelagem elástica linear do problema foi feita utilizando o software ELPLA e foi dividida em duas partes para efeito de comparação dos recalques. A primeira análise foi feita simulando a situação do radier

isolado. Já a segunda, analisou-se o radier incrementado das colunas de brita cimentada variando o módulo de elasticidade da brita cimentada para avaliar a influência da rigidez do material.

4.1 Fundação em radier

A figura 4 mostra o resultado da análise do radier isolado. Foi obtido um recalque máximo de aproximadamente 7,29 cm.

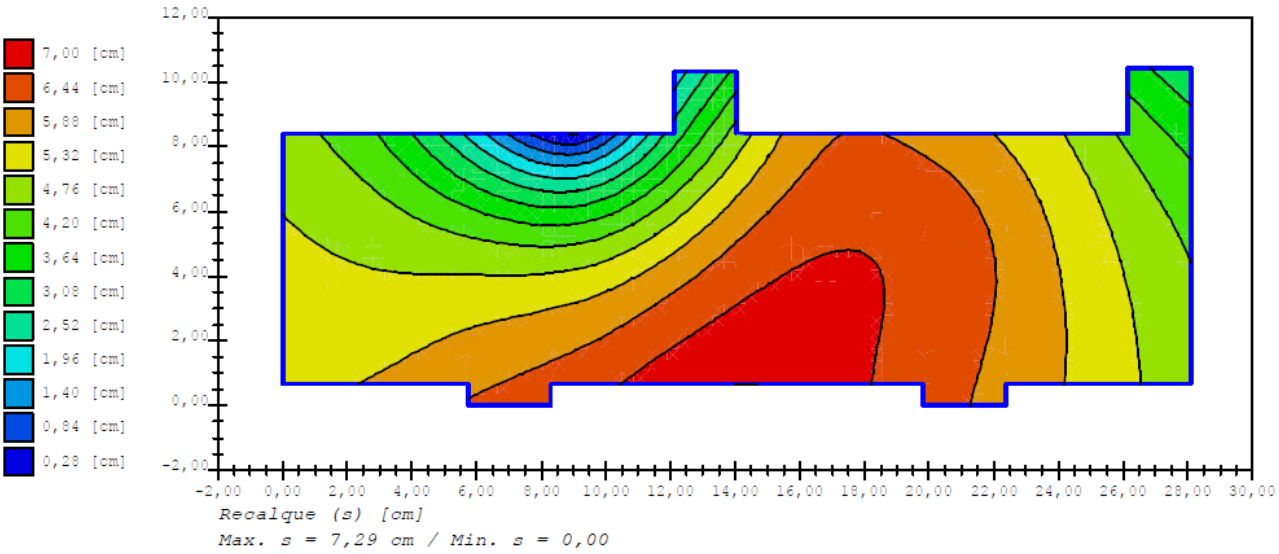


Figura 4. Recalques do radier isolado (sem colunas de brita cimentada).

4.2 Fundação em radier sobre colunas de brita cimentada

Para o caso da fundação mista (radier + colunas de brita cimentada), foram feitas sete análises, considerando o mesmo número de colunas (70 ao total), diâmetro (0,25 m) e comprimento (8 m), variando o módulo de elasticidade da brita cimentada em: 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa, 30 MPa, 50 MPa e 100 MPa. A distribuição das colunas está de acordo com a figura 3. Os resultados das análises estão apresentados na Tabela 2 e no gráfico da Figura 6, ambos em termos de porcentagem assumidas pelas colunas de brita cimentada (α_{kpp}) e recalques. Os valores mostraram que o aumento do módulo de elasticidade da brita cimentada promoveu uma redistribuição progressiva das cargas entre o solo e as colunas. Observa-se que o coeficiente α_{k}pp aumentou de 0,57% para 10,39% quando o módulo de elasticidade foi elevado de 5 MPa para 100 MPa, evidenciando que colunas mais rígidas passaram a absorver uma parcela significativamente maior das cargas provenientes da superestrutura. Esse comportamento é explicado pelo aumento da rigidez relativa entre as colunas e o solo, que favorece o compartilhamento de cargas (“load sharing”) em direção aos elementos de reforço, aumentando progressivamente a parcela de carga por eles suportada. Esse mecanismo é amplamente discutido por Simon (2012), que demonstra que o aumento da rigidez das inclusões promove maior transferência de cargas para esses elementos. De forma semelhante, Poulos (2001), ao analisar o comportamento de fundações mistas (*piled rafts*), destaca que o aumento da rigidez dos elementos de fundação resulta em maior participação destes no suporte das cargas, enquanto a redução dos recalques tende a ser proporcionalmente menor, em razão da interação entre o radier, os elementos de reforço e o solo. Esse comportamento está em concordância com os resultados obtidos neste trabalho, nos quais o coeficiente α_{k}pp aumentou aproximadamente 18 vezes (de 0,57% para 10,39%), ao passo que o recalque máximo foi reduzido em apenas cerca de 7,6% (de 4,10 cm para 3,79 cm), indicando que, para a geometria adotada, a variação da rigidez das colunas influenciou predominantemente o mecanismo de transferência de cargas, sem alterar de forma significativa a deformabilidade global da fundação.

No desenvolvimento do projeto, foi utilizado o módulo de elasticidade de 100 MPa, por ter apresentado o menor recalque. A Figura 5 mostra a distribuição dos recalques com módulo utilizado em projeto. O recalque total foi de 38 mm, diminuindo aproximadamente 50% em relação ao recalque do radier isolado.

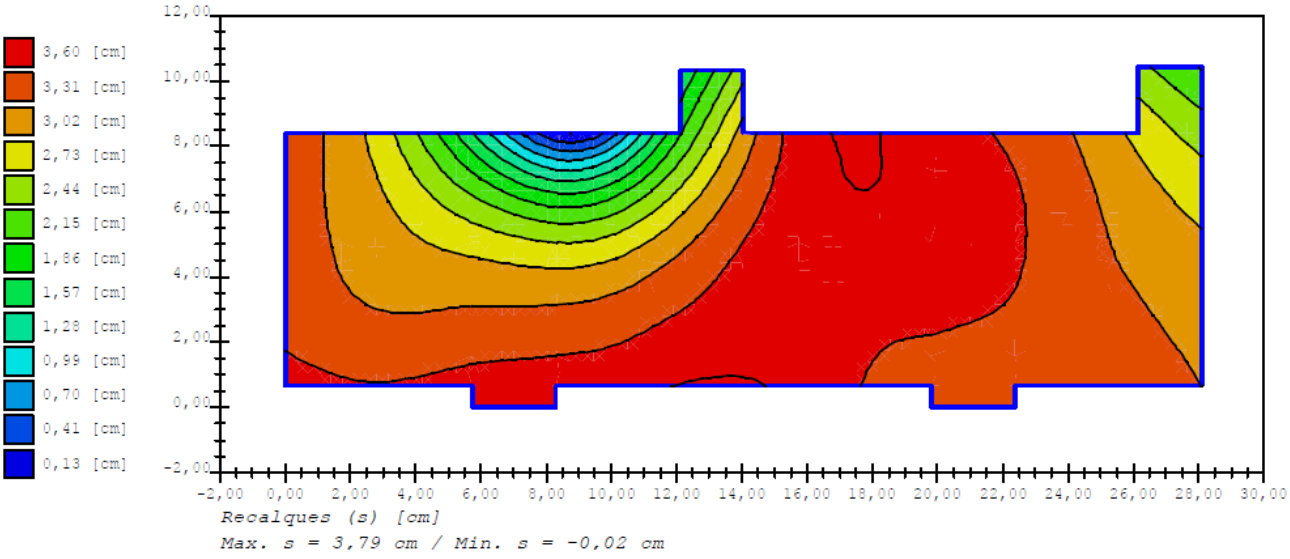


Figura 5. Recalques do radier com as colunas de brita cimentada.

Tabela 2. Recalques de acordo com a variação do módulo de elasticidade das colunas de brita cimentada.

SITUAÇÃO	MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS COLUNAS DE BRITA CIMENTADA (MPa)	α_{kpp} (% de carga que é transferida para as colunas)	RECALQUE MÁXIMO (cm)
1	5	0,57	4,10
2	10	1,14	4,08
3	15	1,70	4,07
4	20	2,26	4,04
5	30	3,35	4,01
6	50	5,47	3,94
7	100	10,39	3,79

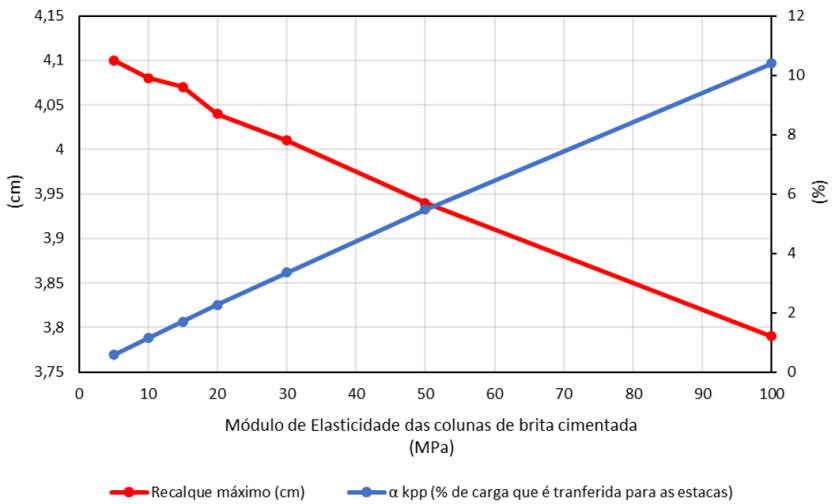


Figura 6. Recalques de acordo com a variação do módulo de elasticidade das colunas de brita cimentada.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo de caso envolvendo a análise do desempenho geotécnico de um sistema de fundação inicialmente concebido em radier isolado e posteriormente revisado para um radier apoiado sobre colunas de brita cimentada, aplicado a edificações de três pavimentos em alvenaria estrutural implantadas em solos compressíveis da região metropolitana de Natal/RN. As análises numéricas realizadas por meio do software ELPLA, permitiram a comparação direta dos recalques associados às duas soluções.

Os resultados indicaram que o radier isolado apresentou recalques totais e diferenciais elevados, incompatíveis com os requisitos de desempenho usualmente adotados para edificações em alvenaria estrutural. A introdução das colunas de brita cimentada promoveu redução significativa dos recalques totais, além de maior uniformização dos deslocamentos verticais, melhorando consideravelmente o comportamento da fundação. Observou-se ainda que, neste caso, a variação do módulo de elasticidade da brita cimentada teve pouca influência nos recalques. Já em relação ao α_{kpp}, a porcentagem que é transferida para as colunas cresce de acordo com o aumento do módulo do material das colunas.

Embora as colunas de brita cimentada sejam caracterizadas como uma técnica de melhoramento de solo, o sistema analisado apresentou comportamento global semelhante ao de um radier estaqueado, no qual os elementos verticais contribuem principalmente para a redução dos recalques e o aumento da rigidez do conjunto.

Conclui-se, portanto, que a associação entre radier e colunas de brita cimentada constitui uma solução técnica eficiente e viável para fundações em solos compressíveis, destacando-se como alternativa adequada quando o controle de recalques é o principal critério de projeto, sob premissa de solo elástico linear.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Coutinho, R.Q., Severo, R.N.F. (2009) Investigação Geotécnica para Projeto de Estabilidade de Encostas. In: 9ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas – COBRAE, São Paulo. *Anais* ABMS, v. 1, p. 1-55

Medeiros, C.N., Petta, R.A., Duarte, C.R. (2005) Estudo do meio físico para avaliação da vulnerabilidade à ocupação humana do município de Parnamirim (RN), utilizando técnicas de geoprocessamento. *Geociências*, v. 24, n. 3, p. 239-253.

Santos Jr., O.F., Coutinho, R.Q. e Severo, R.N.F. (2015) Propriedades Geotécnicas dos Sedimentos da Formação Barreiras no Litoral do Rio Grande do Norte. *Geotecnia*, v. 134, p. 87-108.

Silva, B.M.F. (2019) *Análise Probabilística de Estabilidade de Falésias no Litoral do RN.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte / UFRN, 271 p.

Simon, B. (2012). *Rigid Inclusions and Stone Columns.* ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels.

Sousa, R.A. (2018) *Resistência e compressibilidade de solos lateríticos da Formação Barreiras, na Região de Natal/RN*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte / UFRN, 103 p.

Poulos, H. G. (2001). *Piled raft foundations: design and applications.* Géotechnique 51, No. 2, 95-113.