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/COBRAMSEG2026.5/51

Desempenho de um Radier Estaqueado: Análise Paramétrica e Modelagem 3D

Rodman Raúl Córdova Rodríguez
Doutor em Geotecnia, GEOCOBA, Rio de Janeiro, Brasil, eng.raulcordova@gmail.com

Erland González Leaño
Doutor em Geotecnia, GEOCOBA, Rio de Janeiro, Brasil, gonzalez.erland@gmail.com

Jaime Rodrigo Tamayo Aguilar
Doutorando, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, jrodrigo.tamayo@gmail.com

RESUMO: O estudo avalia a interação solo-estrutura de uma fundação em radier estaqueado sobre um solo argiloso, com foco no comportamento em Estado Limite de Serviço. Foi realizada uma modelagem numérica tridimensional por elementos finitos no *software* Plaxis 3D, considerando um radier circular submetido a carregamento típico de tanques de armazenamento. A capacidade de suporte não é crítica no caso analisado; portanto, o parâmetro decisivo é o controle de recalques. Realizou-se um estudo paramétrico para identificar a influência dos principais fatores de projeto: número de estacas, comprimento das estacas, espaçamento e arranjo ou disposição das estacas no radier. Os resultados indicam que o radier estaqueado apresenta um melhor desempenho em comparação ao radier simples, em termos de recalques totais e diferenciais. Observa-se uma diminuição progressiva dos recalques com o aumento do número de estacas, do comprimento das estacas e do espaçamento entre elas. Todas as variáveis analisadas influenciam diretamente os valores dos recalques máximos e diferenciais, evidenciando sua importância no controle das deformações verticais.

PALAVRAS-CHAVE: Recalques, Radier Estaqueado, Interação Solo-Estrutura.

ABSTRACT: The study assesses the soil–structure interaction of a piled raft foundation on a clayey soil, focusing on Serviceability Limit State (SLS) behavior. A three-dimensional finite element analysis was carried out in Plaxis software, considering a circular raft subjected to the typical loading of storage tanks. Bearing capacity is not critical in the analyzed case; therefore, the decisive design parameter is settlement control. A parametric study was conducted to identify the influence of key design factors: number of piles, pile length, pile spacing, and pile arrangement within the raft. The results indicate that the piled raft foundation performs better than the conventional raft foundation in terms of total and differential settlements. A progressive reduction in settlements is observed with an increase in the number of piles, their length, and their spacing. The piles' layout directly influences both the value and the location of the maximum settlement, highlighting the importance of pile configuration for controlling vertical deformation.

KEYWORDS: Settlement, Piled Raft, Soil-Structure Interaction.

1 INTRODUÇÃO

Fundações em radier estaqueado são amplamente empregadas em estruturas sensíveis a recalques diferenciais, como tanques de armazenamento, prédios, estruturas industriais, estruturas portuárias, dentre outros. O funcionamento de um radier estaqueado baseia-se na mobilização conjunta de capacidade de suporte do radier e das estacas, permitindo a redistribuição de tensões no solo e o controle dos recalques.

O dimensionamento de um radier estaqueado para tanques de armazenamento de combustíveis é governado pelo Estado Limite de Serviço (ELS), sendo o controle de recalques totais e diferenciais um aspecto de extrema relevância, podendo, inclusive, se tornar mais crítico do que a verificação da ruptura por capacidade de carga, a qual, evidentemente, também deve ser atendida com os fatores de segurança pertinentes.

Na bibliografia técnica, diversos estudos sobre radier estaqueado já foram publicados por autores como Poulos et al. (2011), Poulos & Davis (1980), Poulos (2001), Randolph (1983), Poulos & Davis (1968), Poulos (1994), Beer et al. (1991), Leaño (2023), entre outros. O presente trabalho tem como objetivo empregar a modelagem numérica tridimensional como ferramenta para avaliar a influência do número de estacas, comprimento, espaçamento e arranjo geométrico no desempenho em Estado Limite de Serviço (ELS) na interação solo-estrutura de um radier estaqueado circular.

2 MODELAGEM NUMÉRICA

2.1 Caracterização do solo e modelo constitutivo

O radier analisado possui diâmetro de 8,70 m e espessura de 0,30 m, enquanto as estacas apresentam diâmetro de 0,40 m. Foi considerado um carregamento distribuído de 160 kPa atuando sobre o radier, valor compatível com a carga transmitida por um tanque metálico de armazenamento de combustíveis com altura aproximada de 16m. O modelo numérico foi desenvolvido no software Plaxis 3D.

O domínio do modelo foi definido com dimensões de 60 m nas direções horizontais (eixos x e y) e 50 m de profundidade na direção vertical (eixo z), de modo a minimizar a influência das condições de contorno nos resultados da análise. A discretização foi realizada por meio de uma malha tridimensional composta por elementos tetraédricos de 10 nós. O modelo tem condições de contorno restringindo os deslocamentos horizontais nas faces laterais do modelo e os deslocamentos verticais e horizontais na base do domínio.

O solo foi considerado homogêneo e representativo de uma argila normalmente adensada, com comportamento elastoplástico descrito pelo modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. A adoção desse modelo se justifica pelo caráter acadêmico do estudo, cujo foco está na análise paramétrica comparativa, na qual a consistência relativa dos resultados é mais relevante do que a representação detalhada de não linearidades constitutivas mais complexas. A Tabela 1 apresenta os parâmetros adotados para a caracterização do solo.

O radier foi modelado como um elemento estrutural do tipo *plate* com comportamento elástico linear, adotando-se módulo de Young $E = 2{,}0\times10^7$ kPa e coeficiente de Poisson $\upsilon = 0{,}15$. As estacas foram representadas por elementos do tipo *embedded beam* e módulo de Young igual ao adotado para o radier. O presente estudo concentra-se na análise dos recalques do radier estaqueado, uma vez que a capacidade de suporte não se apresenta como condição crítica para o caso analisado. A Figura 1 ilustra o processo de modelação numérica do radier estaqueado no software Plaxis 3D.

Tabela 1. Parâmetros do solo.

Classe de solo	c' (kPa)	ϕ' (°)	γ_{sat} (kN/m^3)	E' (kPa)	υ'
Argila	10	25	17	5500	0,35

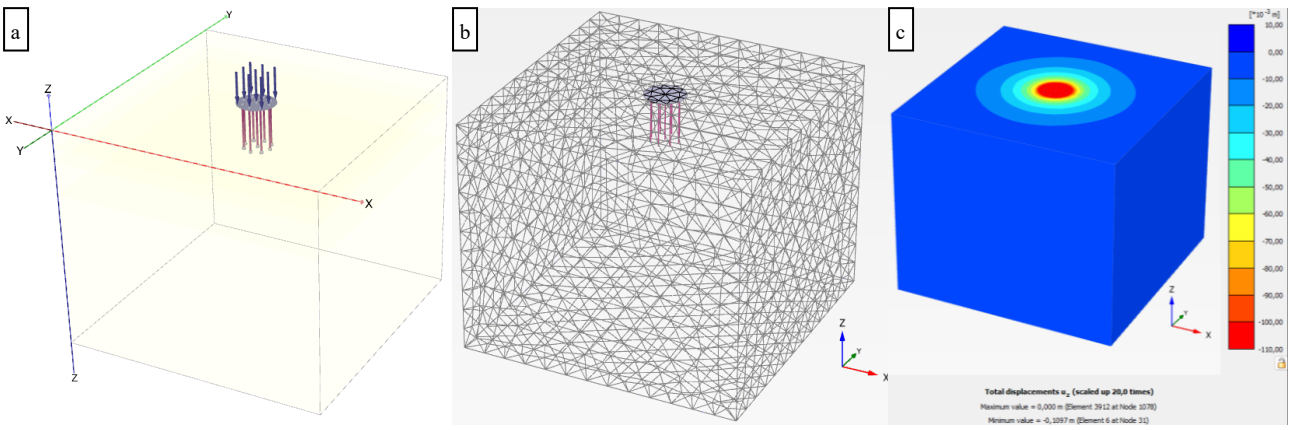


Figura 1. Modelagem 3D do radier estaqueado.
a) Definição da geometria, b) Malha de elementos finitos tetraédricos (10nós) e c) Resultados.

3 ANÁLISE PARAMÉTRICA

3.1 Influência do número de estacas

Foram analisados seis modelos numéricos com o objetivo de avaliar a influência do número de estacas no comportamento do radier. O primeiro modelo corresponde ao radier simples, sem estacas, enquanto os demais modelos consideram radiers estaqueados com 5, 9, 13, 17 e 21 estacas. Os resultados mostram uma redução progressiva do recalque máximo do radier com o aumento do número de estacas. A maior redução ocorre nas primeiras configurações, especialmente entre o radier sem estacas e os casos com 5 e 9 estacas, enquanto a partir de 13 estacas a diminuição do recalque torna-se menos significativa, indicando um aumento da rigidez do radier estaqueado e uma tendência de estabilização do comportamento associada à redistribuição de cargas. A Figura 2, a Tabela 1 e a Figura 3 ilustram os resultados dos recalques obtidos.

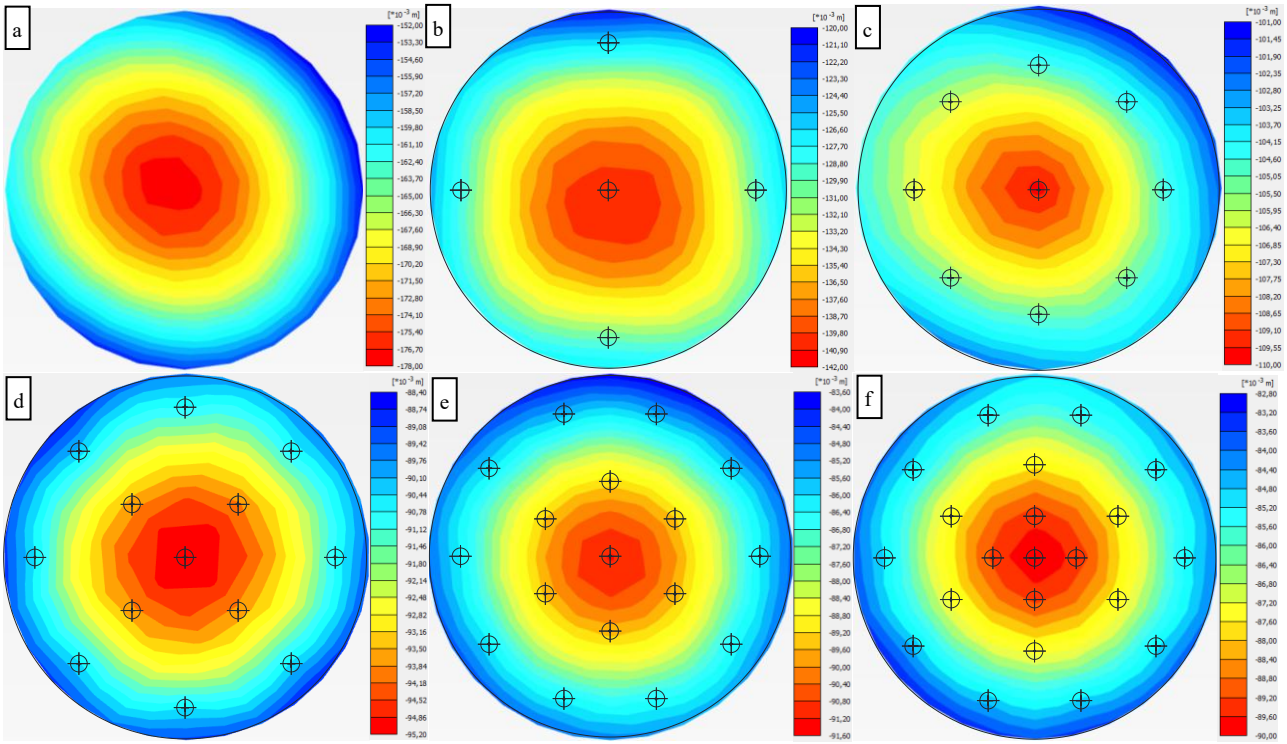


Figura 2. Recalques obtidos no radier simples e estaqueado.
a) Radier simples sem estacas: Uz_{max} = 0,1776 m, b) Radier com 5 estacas: Uz_{max} = 0,1407 m, c) Radier com 9 estacas: Uz_{max} = 0,1097 m, d) Radier com 13 estacas: Uz_{max} = 0,09515 m, e) Radier com 17 estacas: Uz_{max} = 0,09124 m e f) Radier com 21 estacas: Uz_{max} = 0,08980 m.

Tabela 2. Recalques obtidos nos modelos utilizados para analisar a influência do número de estacas.

Quantidade de Estacas	Recalque máximo (mm)	Recalque mínimo (mm)	Recalque diferencial (mm)
0 (radier simples)	177,6	152,2	25,4
5	140,7	120,6	20,1
9	109,7	101,2	8,5
13	95,15	88,70	6,45
17	91,24	83,68	7,56
21	89,80	83,20	6,6

Observa-se na Figura 3 que a redução dos recalques torna-se menos significativa a partir de aproximadamente 13 estacas, evidenciando um comportamento típico de fundações em radier estaqueado, no

qual se observa uma redução progressiva da eficiência associada à adição de novas estacas, conforme discutido por Poulos (2001).

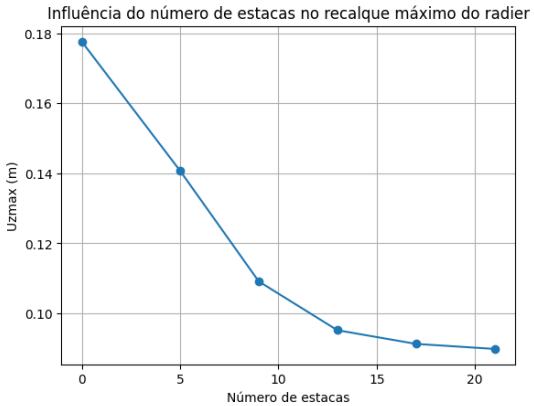


Figura 3. Recalques máximos obtidos nos modelos para analisar a influência do número de estacas.

3.2 Influência do comprimento das estacas

Para analisar a influência do comprimento das estacas, foi considerado um radier estaqueado composto por 17 estacas de 0,40 m de diâmetro, com comprimentos variando entre 6 m e 16 m. Os resultados indicam uma redução progressiva do recalque máximo do radier com o aumento do comprimento das estacas. A maior redução ocorre entre os comprimentos de 6 m e 10 m, evidenciando que o aumento inicial do comprimento das estacas contribui significativamente para o incremento da rigidez do radier estaqueado. Para comprimentos superiores, a redução do recalque torna-se gradualmente menos significativa, indicando uma tendência de estabilização dos recalques, sendo que o aumento do comprimento de 14 m para 16 m resulta em uma redução praticamente desprezível do recalque máximo. A Figura 4, a Tabela 3 e a Figura 5 ilustram os resultados dos recalques obtidos do radier para diferentes comprimentos de estacas, considerando 17 estacas.

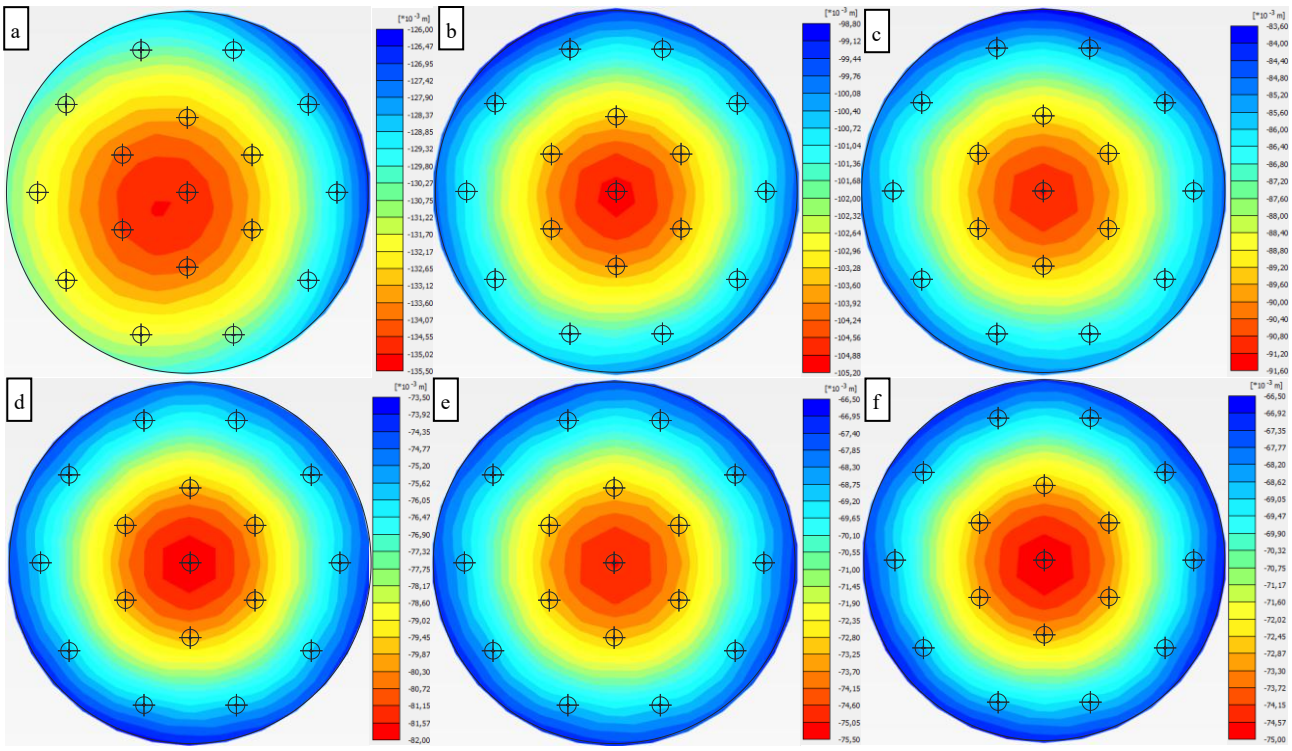


Figura 4. Recalques obtidos no radier para diferentes comprimentos de estacas, considerando 17 estacas. a) L_E = 6 m: Uz_{max} = 0,1351 m, b) L_E = 8 m: Uz_{max} = 0,1051 m, c) L_E = 10 m: Uz_{max} = 0,09124 m, d) L_E = 12 m: Uz_{max} = 0,08194 m, e) L_E = 14 m: Uz_{max} = 0,07510 m e f) L_E = 16 m: Uz_{max} = 0,07495 m.

Tabela 3. Recalques obtidos nos modelos utilizados para analisar a influência do comprimento das estacas.

Comprimento das Estacas (m)	Recalque máximo (mm)	Recalque mínimo (mm)	Recalque diferencial (mm)
6	135,1	126,3	8,8
8	105,1	98,96	6,14
10	91,24	83,68	7,56
12	81,94	73,73	8,21
14	75,10	66,99	8,11
16	74,95	66,76	8,19

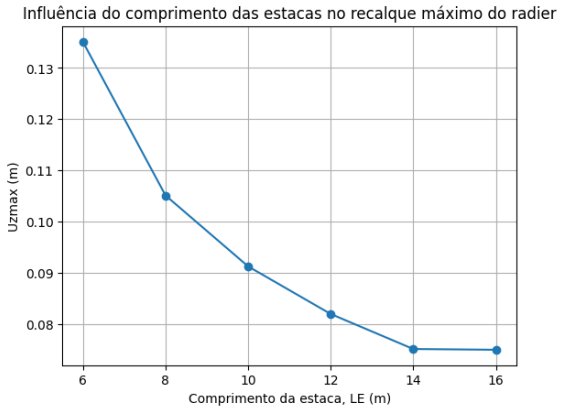


Figura 5. Recalques máximos obtidos nos modelos para analisar a influência do comprimento de estacas.

3.3 Influência do espaçamento

O efeito do espaçamento entre estacas foi analisado considerando um radier estaqueado composto por 13 estacas com diâmetro de 0,40 m. Para essa análise, o espaçamento entre estacas foi variado, adotando-se valores de 2,5D, 3,0D, 3,5D e 4,5D. Além disso, foi estabelecida como premissa que a distância mínima entre a borda do radier e a borda das estacas fosse de pelo menos 1D.

Os resultados são apresentados na Tabela 4 e na Figura 6, evidenciou-se que o aumento do espaçamento resultou em melhoria do desempenho global até determinado limite, associado à redução da sobreposição de bulbos de tensão. Espaçamentos muito reduzidos promovem interferência entre estacas, diminuindo a eficiência individual e diminuindo o efeito de grupo das estacas. A análise do estudo paramétrico revela que a redução dos recalques absolutos e diferenciais é diretamente influenciada pelo incremento do espaçamento entre estacas de 2,5D a 4,5D. Observa-se que, menores espaçamentos (2,5D e 3,0D) resultam em maiores magnitudes de recalque absoluto, atingindo valores de 122,0 mm e 114,2 mm, respectivamente, devido à interação entre os bulbos de tensão das estacas, o cenário de 4,5D apresenta uma otimização do desempenho em termos de recalques, com recalque absoluto máximo reduzido a 96,90 mm. O recalque diferencial também segue essa tendência de mitigação, diminuindo de 11,60 mm para 6,11 mm ao longo da variação estudada, o que mostra a eficácia do aumento do espaçamento para os cenários analisados.

Tabela 4. Recalques obtidos nos modelos utilizados para analisar o espaçamento das estacas.

Espaçamento das Estacas	Recalque máximo (mm)	Recalque mínimo (mm)	Recalque diferencial (mm)
2,5D	121,8	110,4	11,4
3D	114,2	104,9	9,3
3,5D	108,2	101,4	6,8
4,5D	96,9	90,79	6,11

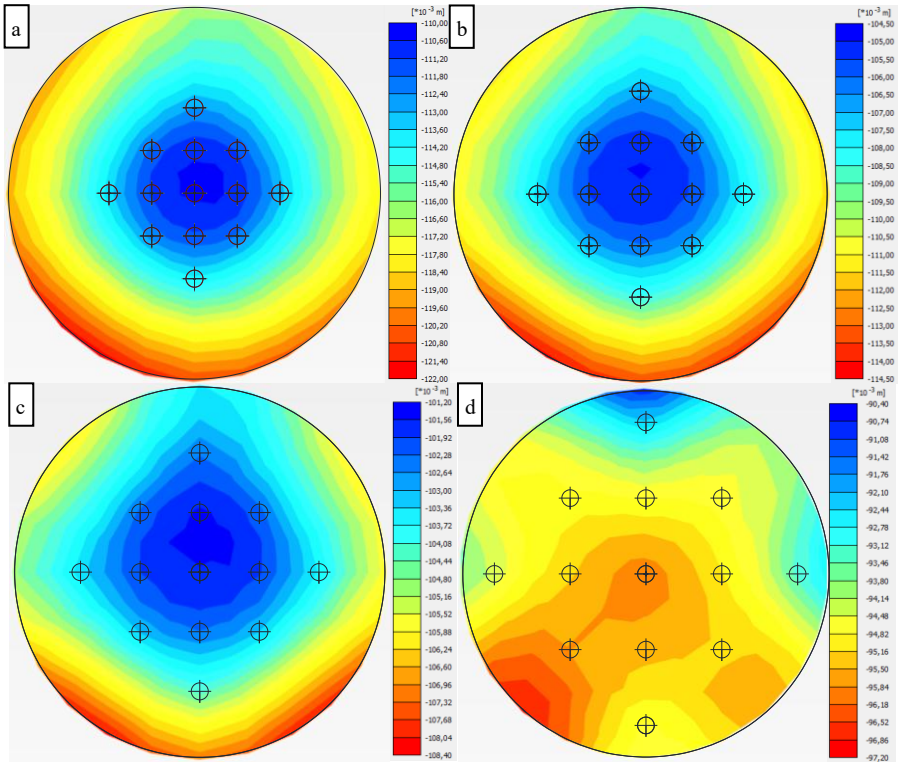


Figura 6. Recalques obtidos no radier para diferentes espaçamentos de estacas, considerando 13 estacas. a) Espaçamento = 2,5D: Uz_{max} = 0,1218 m, b) Espaçamento = 3,0D: Uz_{max} = 0,1142 m, c) Espaçamento = 3,5D: Uz_{max} = 0,1082 m e d) Espaçamento = 4,5D: Uz_{max} = 0,09690 m.

3.4 Influência do layout das estacas

O arranjo geométrico das estacas mostrou influência nos recalques máximos e diferenciais do radier estaqueado. Para avaliar esse efeito, foram analisados três modelos numéricos com 13 estacas e diferentes disposições no radier. O primeiro modelo (a) corresponde a um layout em malha quadrada, composto por uma estaca central e 12 estacas distribuídas com espaçamento de 1,80 m nas duas direções. O segundo modelo (b) considera um arranjo com estaca central e dois anéis concêntricos espaçados radialmente em 1,80 m, contendo 4 estacas no primeiro anel e 8 no segundo. O terceiro modelo (c) é formado por uma estaca central e dois anéis concêntricos também espaçados radialmente em 1,80 m, com seis estacas em cada anel. Os resultados indicam que o modelo (b) apresentou o menor recalque máximo (Uzmax = 0,09515 m), enquanto os modelos (c) e (a) apresentaram valores ligeiramente superiores (Uzmax = 0,09579 m e Uzmax = 0,09690 m, respectivamente).

A análise comparativa entre os layouts também evidencia influência nos recalques diferenciais sob carregamento uniformemente distribuído. O layout (b), caracterizado pela disposição concêntrica com maior concentração relativa de estacas na região interna, apresentou o maior recalque diferencial (6,45 mm), associado a deslocamentos mais pronunciados na região central do radier. Por outro lado, o layout (c) apresentou uma distribuição de recalques mais gradual, resultando em menores recalques diferenciais (4,62 mm). Esse comportamento sugere que determinadas configurações geométricas favorecem uma distribuição de cargas mais eficiente, aumentando a rigidez do radier estaqueado e contribuindo para a redução das solicitações de flexão no radier e consequentemente dos recalques diferenciais.

Observa-se que o layout que apresentou o menor recalque máximo (b) não corresponde necessariamente ao arranjo com menor recalque diferencial. Esse resultado evidencia que o controle do recalque máximo nem sempre implica na minimização do recalque diferencial, sendo necessário avaliar simultaneamente ambos os parâmetros no dimensionamento de radiers estaqueados.

A Figura 7 e a Tabela 5 apresentam os resultados relacionados à influência do layout das estacas.

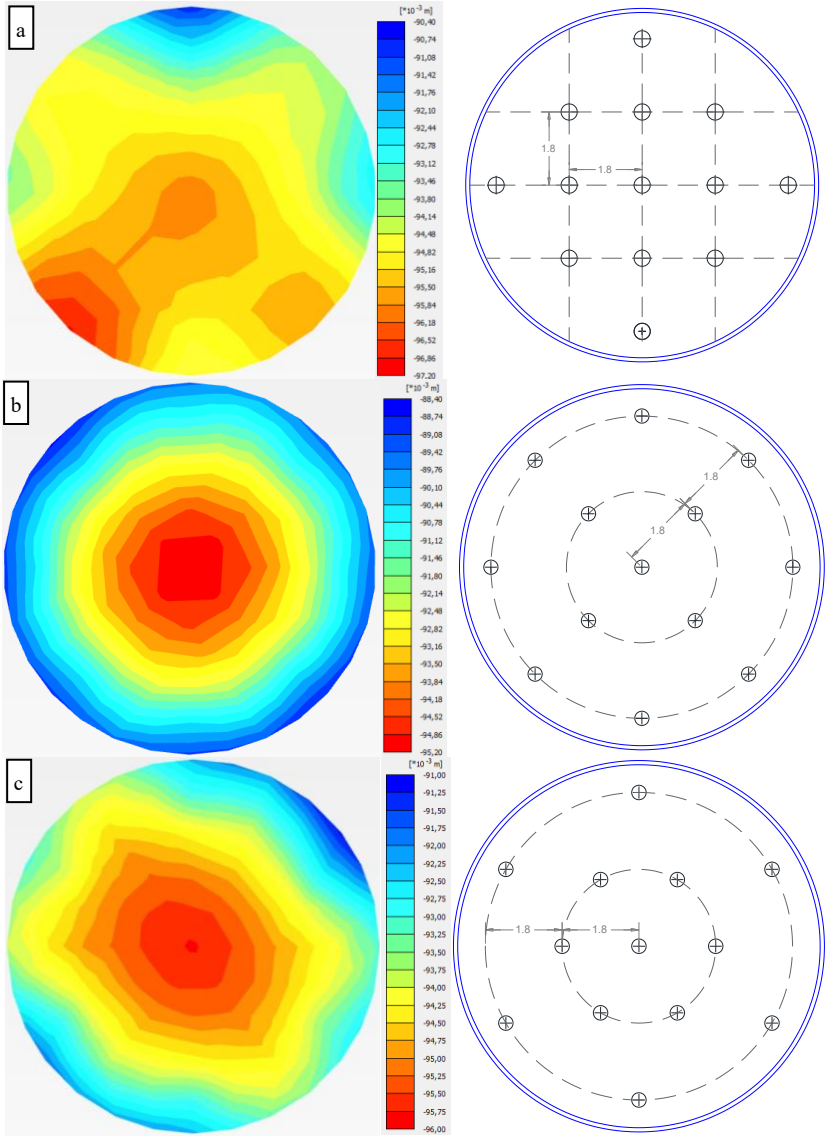


Figura 7. Influência do arranjo geométrico (layout) das estacas nos recalques do radier estaqueado. a) Layout composto por uma estaca central e 12 estacas distribuídas em malha quadrada com espaçamento de 1,80 m entre estacas nas duas direções: Uz_{max} = 0,09690 m, b) Layout com estaca central e dois anéis concêntricos espaçados radialmente em 1,80 m, com 4 estacas no primeiro anel e 8 no segundo: Uz_{max} = 0,09515 m e c) Layout com estaca central e dois anéis concêntricos espaçados radialmente em 1,80 m, contendo seis estacas em cada anel: Uz_{max} = 0,09579 m

Tabela 5. Recalques obtidos nos modelos utilizados para analisar a influência dos layouts.

Layout	Recalque máximo (mm)	Recalque mínimo (mm)	Recalque diferencial (mm)
A	96,90	90,79	6,11
B	95,15	88,70	6,45
C	95,79	91,17	4,62

4 CONCLUSÕES

O comportamento dos recalques em fundações do tipo radier estaqueado é influenciado por múltiplos fatores, destacando-se o número de estacas, seu comprimento, a configuração geométrica adotada e o espaçamento entre elas.

A comparação entre radier simples e radier estaqueado demonstrou redução significativa nos recalques totais e diferenciais com a introdução de estacas.

Observa-se que estacas mais longas contribuem para a redução dos recalques do radier, enquanto estacas mais curtas resultam em deslocamentos verticais mais elevados. Contudo, a partir de determinado comprimento, o incremento adicional do comprimento das estacas apresenta efeito pouco significativo na redução dos recalques.

O aumento do espaçamento entre estacas reduz a interferência entre bulbos de tensão e melhora a eficiência global do sistema estaca-solo.

A análise mostra que o número e o comprimento das estacas influenciam principalmente o recalque absoluto, enquanto o layout e o espaçamento entre as estacas influenciam mais significativamente o recalque diferencial e a eficiência de grupo.

A escolha ótima das variáveis estudadas deve considerar o custo-benefício e controle de recalques diferenciais admissíveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pelo uso da licença acadêmica utilizada na realização das análises numéricas deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beer, G., Booker, J.R., Carter, J.P. (1991) *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Vol. 2, pp. 183-191.

Leaño, E. (2023) *Análise numérica e experimental do comportamento de fundações de tanques de combustíveis.* Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro / PUC-Rio, 317 p.

Poulos, H.G. (1994) *An approximate numerical analysis of pile-raft interaction*, International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 18(2), pp. 73-92.

Poulos, H.G. (2001) *Piled raft foundations - Design and applications*, Geotechnique, Vol. 51(2), pp. 95-113.

Poulos, H.G., Davis, E.H. (1968) *The settlement behaviour of single axially-loaded incompressible piles and piers*, Geotechnique, Vol. 18(3), pp. 351–371.

Poulos, H.G., Davis, E.H. (1980) *Pile Foundation Analysis and Design*. New York: John Wiley & Sons, pp. 397.

Poulos, H.G., Small, J.C., Chow, H. (2011) *Piled raft foundation for tall buildings*, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, Vol. 42(2), pp.78-84.

Randolph, M.F. (1983) *Design of piled raft foundations*. CUED/D, Cambridge University, U.K, Vol. 143, pp. 1-22.