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/COBRAMSEG2026.5/40

Comparação de cargas nas estacas em fundação de radier sobre estacas desconectadas

Marcela Leão Domiciano
Doutoranda, Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, Brasil, marceladomiciano@discente.ufg.br

Maurício Martines Sales
Docente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, Brasil, mmartines@ufg.br

RESUMO: O sistema de fundação por estacas desconectadas é composto por um radier, um conjunto de estacas e uma possível plataforma de transferência de carga (PTC), localizada entre as estacas e o radier. Este sistema é empregado por países da Europa e América do Norte, sendo ainda pouco utilizado no Brasil. Por isso, pesquisas têm sido desenvolvidas visando compreender o comportamento das estacas desconectadas no solo, principalmente nos casos em que se faz necessária uma redução dos recalques. Diante deste cenário, este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de radier sobre estacas desconectadas por meio de análise numérica com o software PLAXIS 3D, a fim de comparar o comportamento da carga nas estacas desconectadas de radier rígido e de radier flexível. Para isso, foram simulados cenários considerando a variação da distância das estacas para o radier (conhecida como plataforma de transferência de carga – PTC). Os resultados evidenciaram que a distribuição de cargas no radier rígido apresenta uma tendência de cargas aproximadamente iguais, e, no radier flexível as estacas do canto suportam as menores cargas e as estacas centrais suportam as maiores cargas.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas desconectadas, Análise numérica, Distribuição de cargas.

ABSTRACT: The disconnected pile foundation system consists of a raft foundation, a pile assembly, and a possible load transfer platform (LTP) located between the piles and the raft foundation. This system is used in European and North American countries, but is still underutilized in Brazil. Therefore, research has been developed to understand the behavior of disconnected piles in the soil, especially in cases where settlement reduction is necessary. In this scenario, this work aims to study the behavior of raft foundations on disconnected piles through numerical analysis using PLAXIS 3D software, in order to compare the load behavior on disconnected piles with rigid and flexible raft foundations. For this purpose, different scenarios were simulated considering variations the distance from the piles to the raft foundation (known as the load transfer platform – LTP). The results showed that the load distribution in the rigid raft foundation tends to have approximately equal loads, while in the flexible raft foundation, the corner piles support the lowest loads and the central piles support the highest loads.

KEYWORDS: Disconnected piles. Numerical analysis. Load distribution.

1 INTRODUÇÃO

Radier estaqueado é um tipo de fundação que apresenta um elemento superficial (radier) e elementos profundos (estacas), na qual tanto o radier quanto as estacas contribuem positivamente para um bom desempenho da fundação. Nesse tipo de estrutura, percebe-se que há uma interação entre radier-estaca-solo, que possibilita uma melhoria da capacidade de carga e a redução do recalque da fundação (Sales, 2000). Ao se conectar as estacas no radier evidencia-se que as estacas são utilizadas como elementos redutores de recalque da fundação (Burland, Broms e De Mello, 1977).

Já o sistema de fundação por estacas desconectadas é composto por um radier, um conjunto de estacas e uma possível plataforma de transferência de carga (PTC) localizada entre as estacas e o radier, sendo a PTC preenchida com material granular incluindo, em alguns casos, reforço geossintético inserido na camada granular, ou mesmo uma camada de solo melhorado por compactação. Esse sistema possibilita, a priori, uma

redução de recalques, bem como aumenta a capacidade de suporte do solo quando comparado a uma fundação rasa (Wong *et al*., 2000).

Melese (2022) comparou o desempenho de radier estaqueado, radier com estacas desconectadas e radier isolado. Os resultados mostraram que o radier com estacas desconectadas apresentou maior eficiência de recalque em relação ao radier isolado, uma vez que houve redução do recalque em até 40%. A redução de recalque do radier sobre estacas desconectadas em relação ao radier isolado também foi evidenciada por Park *et al*. (2020), que realizaram simulações em centrífugas com estacas conectadas e estacas desconectadas do radier.

Vale ressaltar que na fundação com estacas desconectadas, a carga máxima nas estacas ocorre em uma certa profundidade abaixo da superfície em relação à fundação com estacas conectadas (Fattah, Salim e Khalifa, 2023). Além disso, o mecanismo de transferência de carga em um radier com estacas não conectadas é influenciado principalmente pela espessura e rigidez da PTC e pela rigidez do solo (Melese, 2022). Outrossim, a existência de atrito negativo nas estacas desconectadas pode alterar a forma de distribuição da carga axial da estaca (Katzenbach *et al*., 2013; Chow *et al*., 2020; Melese, 2022) e ao aumentar a rigidez da PTC, a razão entre a soma das cargas das estacas e a carga total aumenta (Melese, 2022).

A rigidez elevada da PTC possibilita redução do recalque total do radier com estacas desconectadas. Caso a PTC possua menor rigidez, o desempenho na redução dos recalques mostra-se inferior à PTC de maior rigidez (Alhassani e Aljorany, 2023).

Segundo Viggiani *et al*. (2012), quando as estacas estão desconectadas do radier, evidencia-se uma redução dos momentos fletores e do cisalhamento provocados por cargas laterais. Além disso, uma vez que as estacas não estão conectadas ao radier, elas podem ser consideradas como elementos de reforço do solo, e, por isso, pode-se considerar um fator de segurança menor do que aquele usualmente empregado em estacas estruturais.

O sistema de fundação de radier sobre estacas desconectadas pode ser aplicado em diferentes estruturas, como, por exemplo, edificações, tanques ou silos de armazenamento e pontes, entre outros, e as estacas podem ser consideradas como elementos de reforço de solos. Além disso, a interação existente entre o radier, a PTC, as estacas e o solo, envolve diversas variáveis e fenômenos, como, por exemplo, o atrito negativo, o que fundamenta o desenvolvimento de pesquisas. Nesse sentido, este trabalho visa estudar o comportamento de radier sobre estacas desconectadas por meio de análise numérica com o software PLAXIS 3D, a fim de comparar o comportamento da carga nas estacas desconectadas de radier rígido e de radier flexível.

2 METODOLOGIA

Este estudo apresenta a simulação de 6 casos de radier com estacas desconectadas (com a configuração 4x4 - 16 estacas). A modelagem ocorreu por meio do software PLAXIS 3D, com elementos de 10 nós e malhas com dimensões de 60 metros de comprimento, 60 metros de largura e 37,5 metros de profundidade. Para a simulação, adotou-se cenários com radier rígido e cenários com radier flexível, ambos modelados como material elástico, com módulo de elasticidade de (E) de 30 GPa e coeficiente de poisson (ν_c) de 0,18 – que são valores médios usuais para o concreto.

As estacas foram modeladas como material elástico e apresentam diâmetro (D) igual a 0,50 m, comprimento (L) igual a 25D (L = 12,5 m), espaçamento entre as estacas (S) igual a 4D e módulo de elasticidade (E_p) de 20 GPa. A substituição de solo por concreto na malha se aproxima de estacas escavadas ou hélice-contínuas. A distância entre a borda do radier e a face da estaca externa apresenta uma dimensão de um diâmetro e a espessura do radier (e) corresponde a 6% do comprimento lateral da placa (para radier flexível) e 36% do comprimento lateral da placa (para radier rígido).

O perfil do solo de fundação foi modelado como material linear-elástico e contém 3 camadas com 12,5 m, sendo os módulos de elasticidade de cada camada definidos como: E_{S1} = 50 MPa, E_{S2} = 1,5 E_{S1}, E_{S3} = 2 E_{S1} e coeficiente de poission (ν_s) de 0,30 para todas as camadas – parâmetros estes definidos de forma a representar um solo intermediário, compatível com solo de médio a bom comportamento em termos de deformabilidade.

A fim de se obter dados de distribuição de cargas nas estacas, foi aplicado carregamento uniformemente distribuído de 256 kPa em toda a face superior do radier. A carga foi definida de tal forma que não ultrapassasse o limite de 6 MPa definido pela NBR 6122 (ABNT, 2022) - as estacas podem ultrapassar a carga se estiverem

armadas, porém, considerou-se o concreto sem armação. O estudo da distribuição de carga nas estacas foi realizado em diferentes posições, conforme legenda representada na Figura 1.

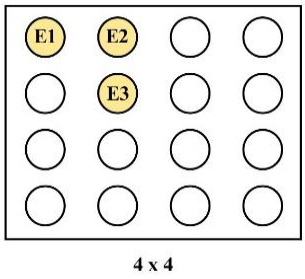


Figura 1. Estacas analisadas.

A plataforma de transferência de carga (PTC) possui as mesmas propriedades da primeira camada de solo, com espessuras (h) de: i) h=0,5D, ii) h=1D e iii) h=2D – sendo "h" a distância da face inferior do radier até o topo da estaca.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os gráficos apresentados nas Figura 2 a 4 mostram a distribuição de cargas nas estacas analisadas para os radiers (flexível e rígido) com estacas desconectadas, considerando a espessura da PTC (h) igual a 0,5D, 1D e 2D.

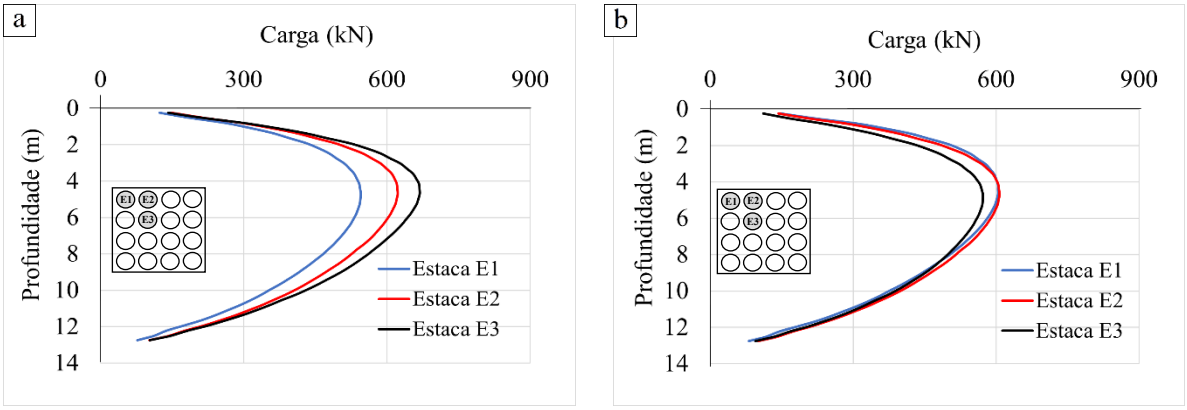


Figura 2. Distribuição de cargas nas estacas - radier estaqueado desconectado com h=0,5D: a) flexível, b) rígido.

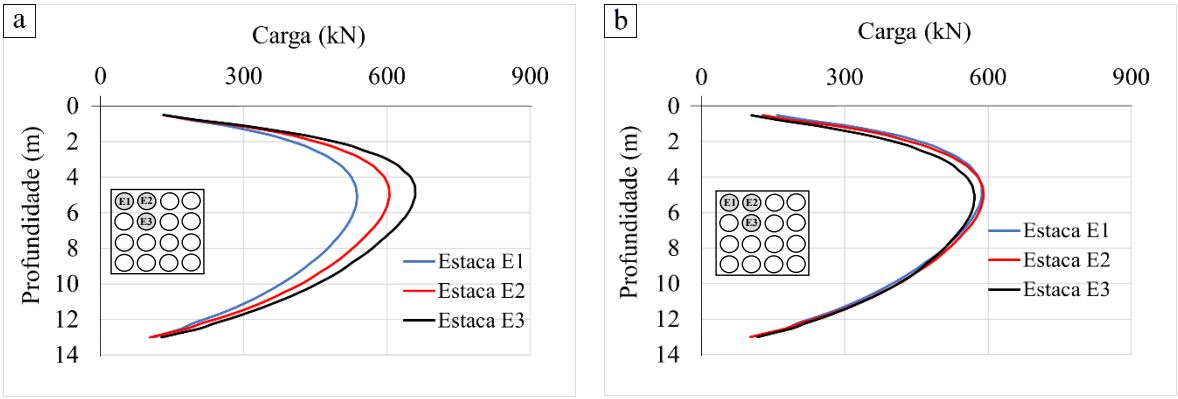


Figura 3. Distribuição de cargas nas estacas - radier estaqueado desconectado com h=1D: a) flexível, b) rígido.

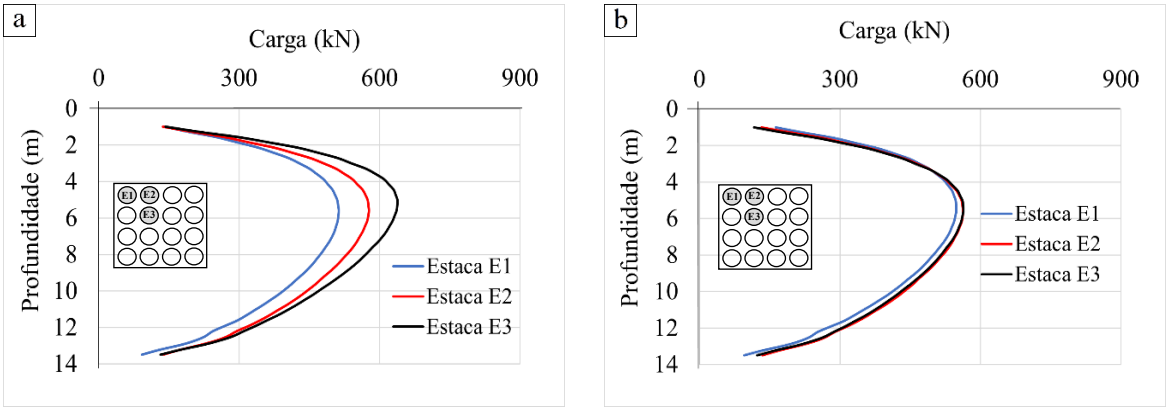


Figura 4. Distribuição de cargas nas estacas - radier estaqueado desconectado com h=2D: a) flexível, b) rígido.

Evidencia-se, por meio das Figuras 2 a 4, que a carga no topo das estacas apresenta menores valores, que aumentam até atingir uma carga máxima e posteriormente reduzem até chegar na ponta das estacas. Tal fato está de acordo Katzenbach *et al*. (2013) e Chow *et al*. (2020), que mencionaram que o processo de atrito negativo provoca um aumento na carga da estaca, que atinge seu máximo no ponto neutro. Com a profundidade, este atrito vai diminuindo até se anular, atingindo assim o valor máximo de carga nas estacas.

Observa-se, ainda nas Figuras 2 a 4, que a distribuição de cargas no radier rígido apresenta uma tendência de cargas aproximadamente iguais. Tal comportamento pode estar relacionado ao fato de o radier rígido desconectado provocar recalques aproximadamente iguais na superfície do solo, o que ocasiona um campo de deslocamento no solo que tende a gerar cargas nas estacas de forma similar e na medida em que se aumenta h, as cargas nas estacas para os casos de radier rígido ficam cada vez mais próximas.

Já para o radier flexível desconectado, o radier impõe um recalque diferente o que faz com que a distribuição de cargas nas estacas apresente um comportamento distinto, no qual as estacas do canto suportam as menores cargas e as estacas centrais suportam as maiores cargas.

Verificou-se a relação entre as cargas aplicadas e o percentual de carga máxima suportada pelas estacas, sendo esse percentual definido pela razão entre a carga máxima total mobilizada pelo conjunto de estacas (obtida pelo somatório das cargas máximas de cada estaca) e a carga total aplicada ao sistema de fundação (Tabela 1).

Tabela 1. Carga aplicada e suportada pelas estacas.

Espessura da PTC	Carga aplicada (kN)	Carga máxima suportada pelas estacas	
		Radier Flexível	Radier Rígido
h=0,5D	14.400	54,06%	52,53%
h=1D		52,91%	51,43%
h=2D		50,68%	49,20%

Para a carga máxima suportada pelas estacas, nota-se na Tabela 1 que na medida em que "h" aumenta, o percentual de carga suportado pelas estacas diminui.

Além disso, analisou-se as cargas máximas suportadas pelas estacas e as respectivas profundidades relativas da linha neutra ($\frac{LN}{L}$.100) – conforme Tabela 2.

Tabela 2. Carga máxima e profundidade relativa da linha neutra.

Estaca	Radier Flexível						Radier rígido					
	h=0,5D		h=1D		h=2D		h=0,5D		h=1D		h=2D	
	carga máx. (kN)	$\frac{LN}{L}.100$ (%)	carga máx. (kN)	$\frac{LN}{L}.100$ (%)	carga máx. (kN)	$\frac{LN}{L}.100$ (%)	carga máx. (kN)	$\frac{LN}{L}.100$ (%)	carga máx. (kN)	$\frac{LN}{L}.100$ (%)	carga máx. (kN)	$\frac{LN}{L}.100$ (%)
E1	545,426	37,64	537,487	40,57	512,554	44,80	603,473	37,64	586,943	38,29	548,426	44,80
E2	622,669	37,64	605,279	40,57	577,406	44,80	607,154	37,64	590,367	40,57	563,196	44,80
E3	668,353	37,64	659,044	40,57	638,051	40,20	572,017	37,64	572,065	40,57	563,508	44,80

Percebe-se pela Tabela 2 que para uma mesma espessura "h", a posição da linha neutra não varia com a posição da estaca no grupo. E na medida em que aumenta o h, a carga máxima diminui e o ponto de máximo (profundidade relativa da linha neutra) fica mais profundo.

Verificou-se a distribuição de recalques (bacia de recalques) na seção central para radier isolado e radier com estacas desconectadas com h=1D (Figura 5).

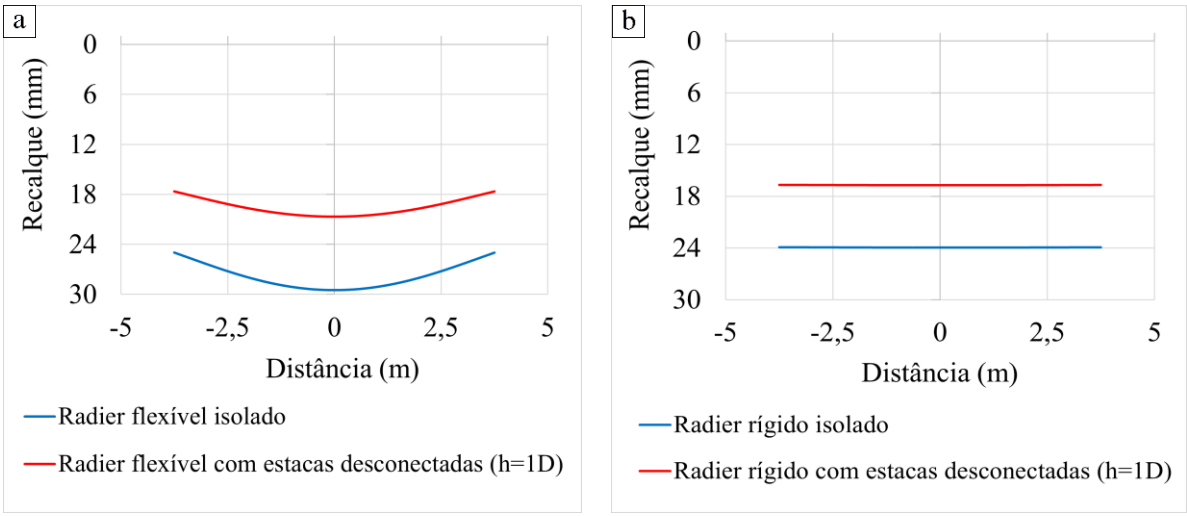


Figura 5. Recalque central - radier isolado e radier com as estacas desconectadas: a) flexível, b) rígido.

Ao comparar as bacias de recalques centrais do radier isolado com o radier com estacas desconectadas (Figura 5), evidencia-se que tanto para radier rígido quanto para radier flexível, o radier com estacas desconectadas apresentou maior eficiência de recalque em relação ao radier isolado, uma vez que houve redução do recalque em até 30%.

4 CONCLUSÕES

Ao comparar o comportamento da carga nas estacas desconectadas de radier rígido e de radier flexível (com a configuração 4x4 - 16 estacas), por meio de análise numérica com o software PLAXIS 3D, evidencia-se que para radier desconectado das estacas, ao considerar a variação da espessura da PTC (sem melhoria do solo), evidenciou-se que a distribuição de cargas para radier rígido apresenta uma tendência de cargas aproximadamente iguais – possivelmente pelo fato de o radier rígido desconectado provocar recalques uniformes na superfície do solo, o que promove um campo de deslocamento no solo que tende a gerar cargas nas estacas de forma similar. Já para o radier flexível desconectado, a distribuição de cargas nas estacas apresenta um comportamento distinto, no qual as estacas do canto suportam as menores cargas e as estacas centrais suportam as maiores cargas.

Em relação à linha neutra, para radier desconectado das estacas, na medida em que aumentou a espessura da PTC, a carga máxima diminuiu e o ponto de máximo (profundidade relativa da linha neutra) ficou mais profundo. Outrossim, ao aumentar a espessura da PTC, o percentual de carga suportado pelas estacas diminui.

Além disso, o radier com estacas desconectadas apresentou uma redução de até 30% de recalque em relação ao radier isolado.

AGRADECIMENTOS

Ao Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), intitulado "Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs", P&D ANEEL Sedimentos, código ANEEL PD.0394-1705/2017.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alhassani, A. M. J.; Aljorany, A. N. Experimental and numerical modeling of connected and disconnected piled raft. *KSCE journal of civil engineering*. Vol. 27, pp. 2442-2454. 2023. http://dx.doi.org/10.1007/s12205-023-0437-x

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6122: *Projeto e execução de fundações*. 108p. Rio de Janeiro. 2022.Burland, J. B.; Broms, B. B.; De Mello, V. F. B.

Behaviour of foundations and structures. In Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokio, Japan, Vol. 2, pp. 495- 546. 1977.

Bentley Systems. PLAXIS 3D: Geotechnical Engineering Software (Versão 2024.1). Delft, Holanda: Seequent, 2025.

Chow, L. C.; Han, J.; Reuter, G. R. *Field Monitoring of Negative Skin Friction on Rigid Inclusion Columns under Embankments*. Geo-Congress 2020, pp. 532-542. 2020. http://doi.org/10.1061/9780784482780.052

Fattah, M. Y.; Salim, N. M.; KhalifA, K. R. Parametric study of unconnected piled rafts in clayey soil using finite element method. *Innovative infrastructure solutions*. Vol. 8. 2023. http://dx.doi.org/10.1007/s41062-022-00987-6

Katzenbach, R.; Bohn, C.; Wehr, J. *Comparison of the safety concepts for soil reinforcement methods using concrete columns*. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, pp. 1819-1822. 2013.

Melese, F. Improved Performance of Raft Foundation Using Detached Pile Columns in Loose Subsoil Conditions. *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2022, Article ID 4002545, 18 pages. 2022. https://doi.org/10.1155/2022/4002545

Park, H. J.; K. O., K. W.; Song, Y. H.; Song, M. J.; Jin, S.; Ha, J. G.; Kim, D. S. Centrifuge modeling of disconnected piled raft using vertical pushover tests. *Acta geotechnica*, Vol. 15, pp. 2637-2648. 2020. https://doi.org/10.1007/s11440-020-00928-6

Sales, M. M. *Análise do comportamento de sapatas estaqueadas*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

Viggiani, C.; MandolinI, A.; Russo, G. *Piles and Pile Foundations*. 1st Edition. CRC Press. 296p. London, 2012.

Wong, I. H., Chang, M. F., Cao, X. D. Raft foundations with disconnected settlement-reducing piles, J. A. Hemsley (ed.), *Design Application of raft*, London, Chapter 17, pp. 469-486. 2000.