

# Método PDR Aplicado à Previsão de Capacidade de Carga em Fundações Estaqueadas

Alex Sandro Amâncio Silva

Engenheiro Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, alex.sandro.04@hotmail.com

Jean Rodrigo Garcia

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

**RESUMO:** O crescimento acelerado dos grandes centros urbanos, tem levado a um aumento na verticalização das construções e por consequência a busca por sistemas de fundação que garantam a eficiência e segurança destas. Fundações rasas e profundas cooperando entre si, tem sido considerada no projeto destas construções como uma alternativa ao projeto convencional (grupo de estacas). Nesse contexto, este artigo analisa por meio do método PDR (Poulos, Davis e Randolph) quatro casos de fundações estaqueadas compostos por 1, 2, 3 e 4 estacas e que foram ensaiadas experimental e numericamente. Assim, foi possível avaliar a capacidade do método na previsão da curva carga-recalque tri linear dessas fundações que consideram a contribuição do contato bloco-solo juntamente à capacidade de carga do sistema. O método PDR possibilitou obter com êxito as curvas carga-recalque das fundações analisadas instaladas em solo tropical do Brasil, exceto no grupo contendo duas estacas. Assim, verificou-se que a geometria do contato bloco-solo e a disposição do grupo de estacas influenciam significativamente no comportamento da fundação e consequentemente na obtenção da curva carga vs recalque desta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Contato bloco-solo, radier estaqueado, método PDR, fundação mista.

**ABSTRACT:** The quick growing of large urban centers has caused an increase in the verticalization of buildings and, as a result, the search for foundation systems that ensure their performance and safety. Shallow and deep foundations working together have been considered in the design of these buildings as an alternative to the conventional design (pile group). In this context, this paper analyzes by means of the PDR method (Poulos, Davis and Randolph) four cases of piled foundations composed by 1, 2, 3 and 4 piles and that were experimentally and numerically tested. Thus, it was possible to evaluate the ability of the method in predicting the tri-linear load-settlement curve of these foundations that consider the contribution of the cap-soil contact along with the bearing capacity of the system. The PDR method made it possible to successfully obtain the load-settlement curves of the analyzed foundations installed in tropical soil of Brazil, except in the group containing two piles. Thus, it was verified that the geometry of the cap-soil contact and the arrangement of the pile group significantly influence in the foundation behavior and consequently in obtaining the load vs. settlement curve of the foundation.

**KEYWORDS:** cap-soil contact, piled raft, PDR method, sharing foundation.

## 1 INTRODUÇÃO

Devido as fundações rasas e profundas possuírem formas distintas de transferência de carga ao solo, a associação destas fundações para desempenharem capacidade de carga em conjunto deve ser cuidadosamente avaliada. Nesse aspecto, o uso da técnica radier estaqueado vem se tornando uma alternativa bastante eficaz para analisar a interação da fundação levando em consideração o contato bloco-solo. Frequentemente, grandes projetos de fundações estaqueadas são dimensionados como grupo de estacas, não sendo considerado no seu dimensionamento a contribuição do contato bloco-solo. Apesar disso, é comum serem denominados equivocadamente de “radier estaqueado”. Sabe-se que o contato bloco-solo exerce significativas mudanças no comportamento das fundações profundas, onde as tensões normais sobre o solo subjacente à fundação alteram a forma como as tensões cisalhantes se desenvolvem, ou seja, há uma mudança no compartilhando de carga

entre os elementos superficial e profundo. Isso pode melhorar o desempenho dessa fundação quanto ao recalque e a capacidade de carga, dependendo das condições de instalação, geometria e resistência do solo.

O contato do radier com o solo foi tema de estudo de vários autores (Ottaviani, 1975; Viggiani et al., 2012; Wu et al., 2002) que analisaram que além do efeito radier-solo influenciar o comportamento de fundações em radier estaqueado (Figura 1), o fator de segurança de um radier estaqueado poderá ser ligeiramente menor que a soma dos fatores de segurança do radier e do grupo de estacas, quando considerados isoladamente.

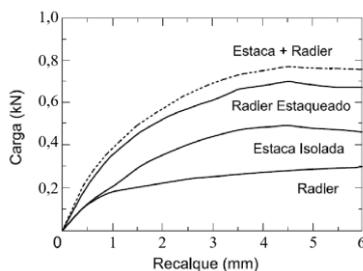


Figura 1. Curvas carga vs recalque para radier isolado, estaca isolada, radier estaqueado e para a soma algébrica das parcelas isoladas de radier e estaca (Wu et al. 2002).

Nesse sentido, avalia-se nesse artigo a aplicação do método PDR (Poulos, Davis e Randolph) na análise do comportamento carga vs recalque de fundações em radier estaqueado. Para tanto, esse método é empregado em resultados de prova de carga realizadas em blocos estaqueados de 1, 2, 3 e 4 estacas, ensaiados por Garcia & Albuquerque (2019). O ensaio de prova de carga em blocos estaqueados é incomum, daí a relevância do presente estudo. O método usa equações de autoria de Poulos & Davis (1980) e Randolph (1994) para desenvolver uma curva carga vs recalque tri linear (Figura 2), a fim de prever a capacidade de carga de uma fundação em radier estaqueado.

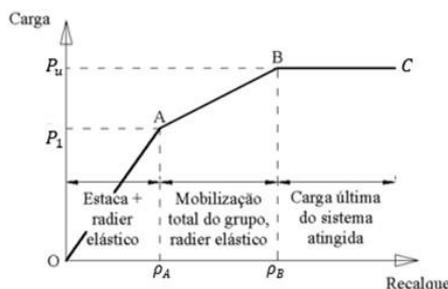


Figura 2. Curva carga vs recalque (adaptado de Poulos, 2016).

Portanto, se busca obter a assertividade desse método na análise de fundações em bloco estaqueado assentes em solo tropical do Brasil, ou seja, considerando a contribuição do contato bloco-solo na capacidade de carga da fundação. Observação que pode vir a ser útil para fomentar o meio técnico-científico com diretrizes à elaboração de projetos, procedimentos e técnicas executivas, uma vez que esse tipo de fundação não está contemplado pelas normas brasileiras.

## 1.1 Radier Estaqueado

Os primeiros estudos envolvendo o emprego de radiers estaqueados foi desenvolvido por Kishida & Meyerhof (1965). No presente estudo os autores consideram a contribuição do bloco apoiado no solo, em que a capacidade de carga da fundação seria a soma da capacidade de carga do radier com a do grupo de estacas, isso para estacas com espaçamento elevado ( $s > 4d$ ). Para estacas pouco espaçadas, ocorreria uma ruptura de todas as estacas em conjunto com o solo contido entre elas.

Um estudo pioneiro sobre radiers estaqueados foi desenvolvido por Poulos (1968), que fez uma análise teórica do comportamento carga vs recalque de uma fundação com a presença de um radier rígido em contato com o solo, este definido como semiespaço elástico, associado a uma estaca isolada. O autor concluiu que, quanto menor o comprimento da estaca em relação ao seu diâmetro ( $L/d$ ), maior a influência do contato na redução de recalques.

No Brasil, o edifício Akasaka construído na cidade de São Paulo foi tema de estudo de Cunha et al. (2001) acerca da fundação estaqueada do edifício. Segundo o autor foi proposto para o projeto inicialmente fundações em sapatas isoladas, mas uma das sapatas sob o pilar com maior carga estava com um recalque muito elevado. Surgiu, então, a ideia de se utilizar uma sapata estaqueada com o intuito de elevar o fator de segurança. Com isso, ao adicionar as estacas o fator de segurança, passou de 1,57 para 2,25, além de reduzir o recalque, de cerca de 50 mm para no máximo 30 mm. Dessa forma, a fundação superficial passaria a suportar aproximadamente 35 % do carregamento total, enquanto as estacas seriam responsáveis por cerca de 65 %.

## 1.2 Método PDR

O método PDR surge a partir de ideias acerca da solução elástica para o recalque de uma estaca com um elemento superficial a ela ligada, e de um radier estaqueado como um conjunto de diversas estacas com um elemento superficial interagindo entre si. Ideia essa, que com uma metodologia simples de estimativa de compartilhamento de carga entre radier e estacas, originou o chamado método PDR. Esse método considera o modelo tri linear (Figura 2) para descrever o comportamento da curva carga – recalque de um radier estaqueado, onde a rigidez do conjunto (radier + estaca) pode ser estimada por meio da equação (1):

$$K_{PR} = \frac{K_{PG} + K_R (1 - 2\alpha_{RP})}{1 - (K_R / K_{PG})\alpha_{RP}^2} \quad (1)$$

Em que:  $K_{PR}$ ,  $K_R$ ,  $K_{PG}$  são as rigidezes do radier estaqueado; radier isolado e do grupo de estacas;  $\alpha_{RP}$  é o fator de interação radier-estaca.

A rigidez do radier isolado pode ser determinado a partir da metodologia de Clancy & Randolph (1993) de acordo com a equação (2):

$$K_R = \frac{4E_r B_r t^3 (1 - \nu_s^2)}{3\pi E_s L_r^4} \quad (2)$$

Em que:  $E_r$  é o módulo de Young do radier;  $B_r$  é o menor lado do radier;  $L_r$  é o maior lado do radier;  $E_s$  é o módulo de Young do solo;  $\nu_s$  é o coeficiente de Poisson do solo.

Já a rigidez do grupo de estaca ( $K_{PG}$ ) em relação ao solo é determinada pela equação (3) de Fleming et al. (1992) descrita a seguir:

$$K_{PG} = K_p(n)^{1-e} \quad (3)$$

Na qual:  $n$  é o número de estacas e o expoente varia de 0,3 a 0,5 para estacas de atrito;  $n \geq 0,6$  para estacas de ponta.

As rigidezes foram obtidas numericamente por Garcia & Albuquerque (2021) e experimentais por Garcia & Albuquerque (2019), conforme apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Rigidezes numérica e experimental.

Rigidez	Ensaio	1 estaca	2 estacas	3 estacas	4 estacas
$K_R$	numérico	12	16	19	23
$K_{PG}$		56	77	97	117
$K_{PR}$		69	93	117	141
$K_R$	experimental	2	142	34	69
$K_{PG}$		87	90	42	116
$K_{PR}$		87	169	104	283

O fator de interação radier-estaca  $\alpha_{RP}$  foi estimado de acordo com a equação (4):

$$\alpha_{RP} = 1 - \ln(r_c/r_0)/\zeta \quad (4)$$

Em que:  $r_c$  é o raio médio do bloco (correspondendo a uma área igual à área do radier dividido pelo número de estacas);  $r_0$  é o raio da estaca.

Sendo que:

$$\zeta = \ln(r_m/r_0) \quad (5)$$

$$r_m = \{0,25 + \zeta [2,5\rho(1 - \nu) - 0,25]\cdot L \quad (6)$$

$$\xi = E_{sl} / E_{sb} \quad (7)$$

$$\rho = E_{sav} / E_{sl} \quad (8)$$

Em que:  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do solo;  $L$  é o comprimento da estaca;  $E_{sl}$  é o módulo de Young do solo ao nível da ponta da estaca;  $E_{sb}$  é o Módulo de Young do estrato de suporte abaixo da ponta da estaca;  $E_{sav}$  é o módulo de Young médio do solo ao longo do eixo da estaca.

A proporção de carga transferida pelo radier é calculado da seguinte forma:

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{K_R (1 - \alpha_{RP})}{K_{PG} + K_R(1 - \alpha_{RP})} = X \quad (9)$$

Em que:  $X$  é a proporção de carga transferida pelo radier;  $P_R$  a carga transferida pelo radier;  $P_T$  a carga total aplicada.

Logo, utilizando as equações previamente apresentadas, desenvolveu-se a curva carga vs recalque tri linear (Figura 2), que representa com clareza os estágios de carregamento da fundação estaqueada.

No trecho OA, antes da total mobilização das estacas, o recalque é estimado pela equação (10) e só o grupo de estacas trabalha.

$$\rho = \frac{P_1}{K_{PR}} \quad (10)$$

Em que:  $\rho$  é o recalque do radier estaqueado;  $P_1$  a carga total que corresponde a total mobilização do grupo de estacas e  $K_{PR}$  a rigidez do radier estaqueado.

No trecho AB, após a mobilização total do grupo de estacas, assume-se que toda a carga excedente ao valor “ $P_1$ ” seria absorvida pelo radier e, portanto, o recalque pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\rho = \frac{P_1}{K_{PR}} + \frac{(P_u - P_1)}{K_R} \quad (11)$$

Em que:  $P_u$  é a carga total atuante no radier estaqueado e  $P_1$  a carga total que corresponde ao momento de total mobilização do conjunto de estacas.

A carga  $P_1$  pode ser calculada pela equação:

$$P_1 = \frac{P_{up}}{1 - X} \quad (12)$$

Em que:  $X$  é a proporção de carga transferida pelo radier, obtida através da equação (9) e  $P_{up}$  é a capacidade de carga última do grupo de estacas.

O trecho BC corresponderia a ruptura completa do sistema de fundação.

Os valores de carga atuante no radier estaqueado “ $P_u$ ” e capacidade de carga última do grupo de estacas “ $P_{up}$ ” (Tabela 2) ou carga de última convencionalizada para um deslocamento de 10% do diâmetro nominal da estaca, ou seja, 25mm.

Tabela 2. Valores de carga atuante no sistema e de capacidade de carga última do grupo de estacas (Garcia e Albuquerque, 2021)

	RE_1 estaca	RE_2 estacas	RE_3 estacas	RE_4 estacas
$P_{u\_exp}$	184	351	448	658
$P_{u\_num}$	200	371	455	658
$P_{up\_exp}$	165	265	350	530
$P_{up\_num}$	115	225	315	405

## 2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No intuito de obter um melhor ajuste ao método PDR, foi considerado a eficiência do grupo de estacas onde a rigidez de uma estaca em grupo é reduzida quando comparada com a rigidez de uma estaca isolada em consequência dos efeitos de interação. Albuquerque & Garcia (2020) sugere que seja aplicado a regra prática de Feld, onde a carga de cada estaca é reduzida de tantos 1/16 quantas forem as estacas vizinhas, nas direções horizontal e vertical quando o bloco é visto em planta. Os valores de eficiência de grupo usados no presente trabalho são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Eficiência do grupo de estacas

	1 estaca	2 estacas	3 estacas	4 estacas
$P_{u\_exp}$	100%	94%	88%	88%

Durante a aplicação do método PDR notou-se diferentes valores de fator de interação (Figura 3) obtidos para as fundações estaqueadas em razão dos trabalhos presentes na literatura, uma vez que as características do solo são diferentes e a área e geometria das fundações são variáveis. Nesse sentido, verifica-se que a interação entre as estacas e o radier diminui à medida que o número de estacas aumenta, pois, a área de contato com o solo aumenta.

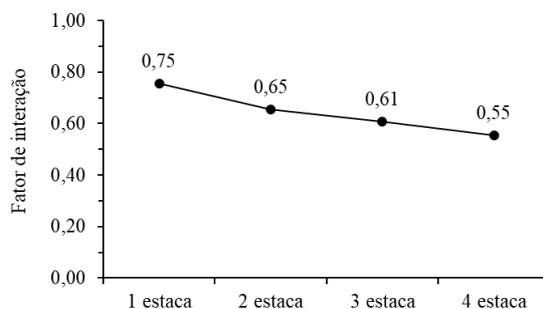


Figura 3. Variação do fator de interação

Considerando que o fator de interação não leva em conta a forma como a rigidez foi encontrada, seja de maneira experimental ou numérica, os valores do fator de interação foram os mesmos tanto na análise experimental quanto na numérica.

Utilizando-se das rigidezes apresentadas na Tabela 1, dos valores de fator de interação mostrado na Figura 3, e da eficiência do grupo de estacas na Tabela 3, obteve-se a contribuição do contato radier-solo em relação ao grupo de estacas, na abordagem numérica (Figura 4) e experimental (Figura 5).

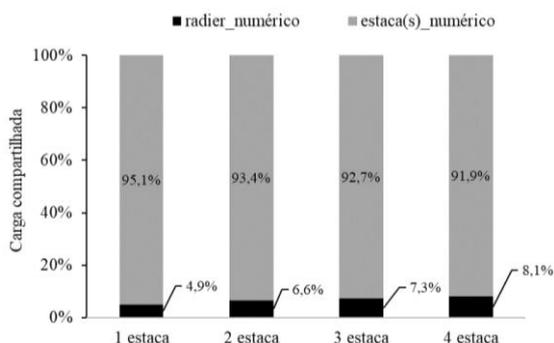


Figura 4. Contribuição numérica do grupo de estacas e do contato radier solo

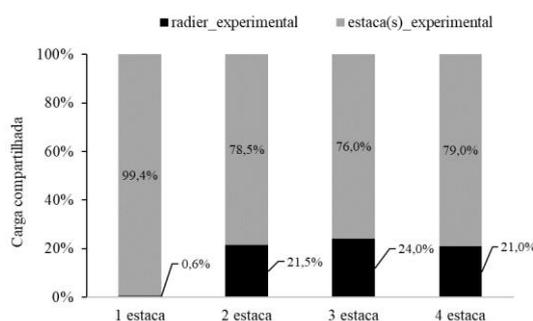


Figura 5. Contribuição experimental do grupo de estacas e do contato radier solo

Há uma crescente participação do contato radier-solo com o aumento do número de estacas e da área líquida de contato bloco-solo (Figura 4). Essa parcela de carga suportada pelo contato bloco-solo pode assumir valores significativos no caso de grandes blocos de fundação. A consideração de parcela adicional de carga disponível em blocos de estacas representa economia e otimização do projeto de fundação, uma vez que a área líquida de contato é algo disponível para o projetista de fundações possa considerar em seus cálculos e assim talvez possa otimizar as estacas, diminuindo comprimento, diâmetro e até mesmo a quantidade de estacas. Sob o aspecto econômico, poderia diminuir substancialmente o custo das fundações nas construções em geral, uma vez que fundações estaqueadas projetadas a partir da filosofia de radier estaqueado geram menores quantidades em projeto, tais como comprimento, diâmetro, perfurações e materiais como o concreto.

A geometria em planta do bloco de estacas composto por 2 estacas (Figura 5), apresentou comportamento díspar em relação a parcela de contribuição do contato bloco-solo na capacidade de carga, quando comparado aos demais casos, o que pode ter ocorrido devido a geometria do bloco, pois a relação entre o maior e menor lado difere das demais fundações analisadas. Após aplicar carga nessa fundação, notou-se que nas primeiras camadas de solo subjacente ao bloco notou-se que a resistência foi superior ao observado nos demais casos analisados. Efeito esse que pode ter sido aumentado pelo comportamento de viga exibido por um bloco retangular de 2 estacas em linha.

As curvas de carga vs recalque do método PDR utilizando as rigidezes experimentais e as numéricas foram traçadas e comparadas com as curvas da prova de carga feita por Garcia e Albuquerque (2019). Foram analisados os radier estaqueados com uma, duas, três e quatro estacas (Figura 6 a Figura 9).

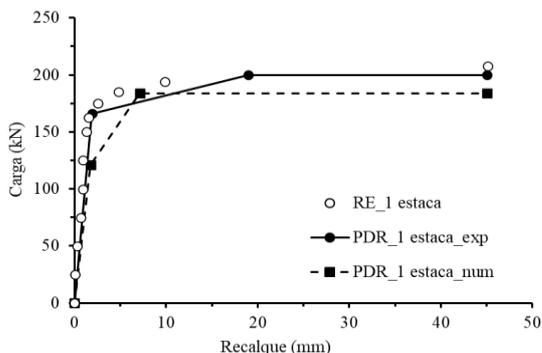


Figura 6. Curvas carga vs recalque para bloco composto por 1 estaca

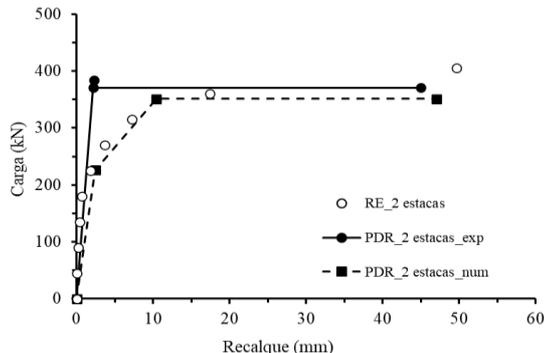


Figura 7. Curvas carga vs recalque para bloco composto por 2 estacas

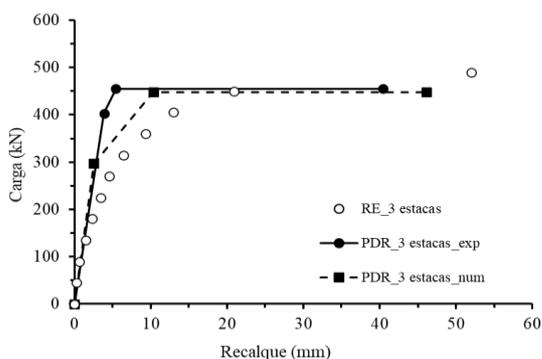


Figura 8. Curvas carga vs recalque para bloco composto por 3 estacas

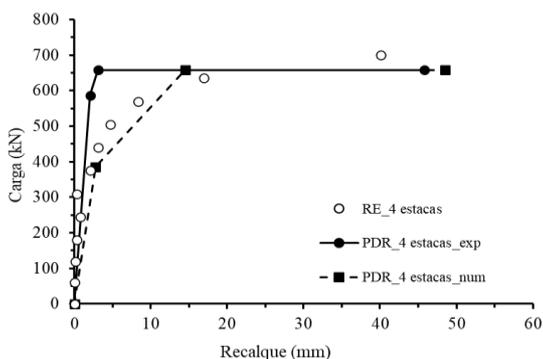


Figura 9. Curvas carga vs recalque para bloco composto por 4 estacas

Na comparação envolvendo o bloco composto por apenas uma estaca, fica evidente que a geometria do bloco, ou seja, o elemento de fundação superficial influencia significativamente nos resultados de rigidez do sistema. Para o bloco composto por uma estaca verifica-se que este é predominantemente influenciado pela rigidez da estaca, quando comparado ao bloco, pois sua área líquida de contato bloco-solo é pouco significativa. A simulação do bloco de 2 estacas com os parâmetros experimentais resultou em um gráfico anômalo, pois a curva não seguiu um traçado tri-linear. O fato de a rigidez do bloco isolado de 2 estacas ter um valor significativo, sendo maior que até mesmo do grupo de 2 estacas, pode ter causado desvios no formato do gráfico. O método PDR aplicado ao bloco estaqueado com 3 estacas apresentou um ajuste aos resultados numéricos e experimentais, mesmo diante do seu formato triangular.

De forma geral as análises numéricas e experimentais produziram ajustes adequados entre as curvas carga vs recalque, se apresentando até mais conservador quando comparado com o sistema real da fundação, demonstrando a aplicabilidade e viabilidade do emprego do método PDR em pré-dimensionados de projeto que seguem a filosofia de radier estaqueado. Por outro lado, em análise de blocos retangulares com duas estacas, a aplicação do método PDR não foi assertiva, como observado neste artigo. Isto demonstra que a geometria do bloco em contato com o solo subjacente e a disposição do grupo de estacas interfere na sua capacidade de carga.

### 3 CONCLUSÃO

Esse artigo avaliou a aplicabilidade do método PDR na previsibilidade da curva carga vs recalque de fundações em blocos estaqueados ensaiados por meio de prova de carga estática e lenta. Diante dos resultados e discussão apresentados, algumas conclusões são realizadas a seguir:

O método PDR é aplicável para uso prático nas fundações em região de clima tropical do Brasil, pois permite uma avaliação mais detalhada do comportamento da fundação e pode prever o comportamento do sistema de fundação em radier estaqueado.

O método ainda precisa ser estudado e adaptado de acordo com a geometria do bloco, pois como avaliado no caso do bloco retangular composto por 2 estacas, o método PDR é inconclusivo.

A análise da distribuição de carga mostrou que para blocos de 1, 3 e 4 as estacas tendem a suportar a maior parte da carga aplicada ao sistema, porém a capacidade de carga do contato bloco-solo é expressiva dependendo da sua geometria.

A geometria do bloco em contato com o solo subjacente e a disposição do grupo de estacas interferem na sua capacidade de carga e conseqüentemente na obtenção da curva carga vs recalque.

### AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Uberlândia e ao CNPq pela concessão de bolsa de iniciação científica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, P. J. R. de, and J. R. Garcia. 2020. *Engenharia de fundações*. Rio de Janeiro: LTC-GEN.
- Clancy, P., and M. F. Randolph. 1993. “An approximate analysis procedure for piled raft foundations.” *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 17 (12): 849–869. <https://doi.org/10.1002/nag.1610171203>.
- Cunha, R. P., H. G. Poulos, and J. C. Small. 2001. “Investigation of Design Alternatives for a Piled Raft Case History.” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 127 (8): 635–641. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:8\(635\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:8(635)).
- Fleming, W. G. K., A. J. Weltman, M. F. Randolph, and W. K. Elson. 1992. “Piling Engineering.” Halsted Press.
- Garcia, J. R., and P. J. R. de Albuquerque. 2019. “Analysis of the contribution of the block-soil contact in piled foundations.” *Lat. Am. J. Solids Struct.*, 16 (6): 1–22. <https://doi.org/10.1590/1679-78255565>.
- Garcia, J. R., and P. J. R. de Albuquerque. 2021. “Numerical analysis of the influence of block geometry on the behavior of piled foundations.” *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, 14 (1). <https://doi.org/10.1590/s1983-41952021000100007>.
- Kishida, H., and G. G. Meyerhof. 1965. “Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sands.” *7th Int. Conf. soil Mech. Found. Eng.*
- Ottaviani, M. 1975. “Three-Dimensional Finite Element Analysis of Vertically Loaded Pile Groups.” *Geotechnique*, 25 (2): 159–174. <https://doi.org/10.1680/geot.1975.25.2.159>.
- Poulos, H. G. 1968. “Analysis of the Settlement of Pile Groups.” *Géotechnique*, 18 (4): 449–471. <https://doi.org/10.1680/geot.1968.18.4.449>.
- Poulos, H. G. 2016. “Tall building foundations: design methods and applications.” *Innov. Infrastruct. Solut.*, 1 (1): 10. <https://doi.org/10.1007/s41062-016-0010-2>.
- Poulos, H. G., and E. H. Davis. 1980. *Pile Foundation Analysis and Design*. Series in geotechnical engineering. Rainbom-Bridge Book Co.
- Randolph, M. F. 1994. “Design Methods for pile groups and pile rafts.” *XIII Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, 61–82. New Delhi: ISSMGE.
- Viggiani, C., A. Mandolini, and G. Russo. 2012. “Piles and Pile Groups.” *Appl. Soil Mech.*, 286–331. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Wu, W. J., J. C. Chai, J. Z. Huang, W. Chemical, and E. Corporation. 2002. “Interaction Between Pile and Raft in Piled Raft Foundation.” *Adv. Building Technol.*, 1: 603–610.