

# **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE RADIER ESTAQUEADO POR MEIO DE MODELAGEM NUMÉRICA**

**Palavras-Chave:** INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA, MODELAGEM COMPUTACIONAL,  
AVALIAÇÃO DO RECALQUE

**Autores:**

**LUCAS DELA COSTA ALBERGARIA, FECFAU – UNICAMP**

**Prof. Dr. PAULO JOSÉ ROCHA DE ALBUQUERQUE (orientador), FECFAU – UNICAMP**

---

## **INTRODUÇÃO:**

O radier estaqueado é um sistema de fundação composto por estacas, responsáveis por transmitir esforços para o solo, e um radier, o qual possui função de bloco de coroamento e auxiliar na transmissão de esforços para o solo (CAMPOS, 2011). Essa solução pode ser adotada para reduzir os recalques em obras de edificações e infraestrutura, uma vez que promove melhor distribuição das cargas ao solo. Essa técnica visa mitigar os efeitos de recalques excessivos, especialmente os diferenciais, que podem comprometer a funcionalidade da estrutura ou até mesmo provocar sua ruptura. Segundo Garcia (2015), esse tipo de fundação é de análise complexa, pois exige o estudo das interações entre a estaca, o solo, o radier e as demais estacas, além da análise da relação entre o radier e o solo, sendo necessário combinar todos esses efeitos de forma integrada para uma avaliação precisa do desempenho do sistema. O estudo pode ser auxiliado por ferramentas computacionais e numéricas, incluindo o uso de elementos finitos. A presente pesquisa tem como objetivo utilizar o software GEO5 e a planilha do PIGLET para estudar estruturas tipo radier estaqueado, principalmente através da comparação de diferentes configurações estruturais e dos resultados resultantes.

## **METODOLOGIA:**

Para realização deste estudo foi utilizado o software GEO5 e a planilha do PIGLET. Dentre as extensões disponíveis no GEO5, utilizou-se as ferramentas "Grupo de Estacas" e "Método dos Elementos Finitos (MEF)", com o objetivo de simular o comportamento de raders estaqueados. As análises focaram na determinação da capacidade de carga da estrutura e na carga que resulta um recalque vertical de 25 mm.

Após a realização das simulações no GEO5, a planilha do PIGLET foi utilizada para comparação dos valores de recalque obtidos. Para isso, foram aplicadas ao modelo do PIGLET as mesmas cargas que resultaram no recalque de 25 mm no GEO5, permitindo uma avaliação comparativa entre os dois métodos de cálculo.

Para os testes, definiu-se um solo padrão e propriedades estruturais fixas, características aplicadas no GEO5 e PGLET. O solo definido é arenoso com coesão ( $c$ ) igual a 0 kPa, módulo de deformabilidade igual a 43,6 MPa, o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) igual a 0,3 e o peso específico ( $\gamma_{nat}$ ) de 17 kN/m<sup>3</sup>. Foi considerado ausência de nível d'água nos testes. As propriedades estruturais definidas foram estacas de 25 metros de comprimento, com 1 metro de diâmetro, radier de 1 metro de espessura,  $f_{ck}$  igual a 20 MPa e módulo de Young igual a 25.000 Mpa. em tamanho, espessura, quantidade e diâmetro das estacas.

Os primeiros testes realizados utilizaram a extensão “Grupo de estacas”. Foram feitas 18 simulações, sendo 9 testes em radiers retangulares, 3 testes em radiers circulares, 3 testes em radiers elípticos, 1 teste em pentágono, 1 teste em octógono e 1 teste em triângulo equilátero. Dessas 18 simulações, foram feitos 3 grupos de comparação, contendo 6 radiers com a mesma área e quantidade de estacas, variando somente os formatos.

A segunda etapa contemplou os testes realizados no PGLET. Na primeira etapa, além da comparação entre formatos, foi determinada a carga para recalques de 25 mm, as quais foram utilizadas para comparação. Para os 9 radiers retangulares, aplicou-se os parâmetros estabelecidos inicialmente para solo e estrutura, com exceção do “Gradiente do módulo de cisalhamento”. Na pesquisa de Davisson, Salley (1970) os autores determinam o valor de 4240 MPa/m para um solo arenoso. Como o solo utilizado nesta pesquisa também é arenoso, adotou-se o mesmo valor para este parâmetro.

A terceira etapa consiste em realizar testes com a extensão “Método dos Elementos Finitos (MEF)” no GEO5, utilizando as mesmas fundações retangulares analisadas nas etapas anteriores. Esta extensão funciona em 2D. Diferentemente da extensão “Grupo de estacas”, somente será possível simular interações solo-estrutura “em corte”. O software adota malhas triangulares durante as simulações, as quais são refinadas automaticamente.

A estrutura será modelada como “vigas” na extensão “MEF”, simulando os radiers e as estacas. A partir das estruturas criadas, será aplicado o método das tensões geostáticas e a estrutura será configurada a partir dos parâmetros estabelecidos na NBR 6118/2014. Será adotado um modelo de deformações planas e utilizando o tipo de análise “tensão”.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Na primeira etapa da pesquisa, os 18 testes realizados foram divididos em três grupos de comparação, contendo 6 testes em cada. Em cada grupo será feita a comparação entre três radiers de mesma área e mesma quantidade de estacas, porém variando o espaçamento entre as estacas, e a comparação com um teste em radier circular de mesma área, um teste em radier elíptico de mesma área e um teste entre uma das seguintes figuras: Pentágono, octógono, triângulo equilátero.

### Teste 1

No Teste 1, foram mantidos como fixos os parâmetros de área e de quantidade de estacas. As áreas não foram exatamente as mesmas devido a precisão das casas decimais do software, porém foram todas o mais aproximadas de 49,1 m<sup>2</sup>. A quantidade de estacas foi igual a seis estacas por radier.

A comparação será feita entre três radiers retangulares, um radier circular, um radier elíptico e um radier pentagonal. As características adotadas e resultados obtidos foram:

|             | Teste 1 - Radiers Retangulares |                 |                |                |                   |                                |
|-------------|--------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------------------|
|             | Área (m²)                      | Espaçamento (m) | Lado maior (m) | Lado menor (m) | Carga máxima (kN) | Carga para recalque 25 mm (kN) |
| Retângulo 1 | 49,29                          | 4,00            | 9,30           | 5,30           | 19385,74          | 4661,70                        |
| Retângulo 2 | 49,29                          | 3,00            | 9,30           | 5,30           | 18034,50          | 4661,70                        |
| Retângulo 3 | 49,29                          | 3,50            | 9,30           | 5,30           | 18799,27          | 4661,70                        |

  

|            | Teste 1 - Demais formatos |          |                     |                     |          |                   |                                |
|------------|---------------------------|----------|---------------------|---------------------|----------|-------------------|--------------------------------|
|            | Área (m²)                 | Raio (m) | Semi-eixo maior (m) | Semi-eixo menor (m) | Lado (m) | Carga máxima (kN) | Carga para recalque 25 mm (kN) |
| Circular   | 49,02                     | 3,95     | ----                | ----                | ----     | 16588,28          | 4555,00                        |
| Elíptico   | 49,01                     | ----     | 6,00                | 2,60                | ----     | 17280,25          | 2440,03                        |
| Pentagonal | 49,06                     | ----     | ----                | ----                | 5,34     | 17280,25          | 2027,06                        |

## Teste 2

Assim como no Teste 1, a área e quantidade de estacas foram mantidas iguais. A área foi de aproximadamente 86,65 m<sup>2</sup> e foram utilizadas nove estacas por radier. As características adotadas e resultados obtidos foram:

|             | Teste 2 - Radiers Retangulares |                 |                |                |                   |                                |
|-------------|--------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------------------|
|             | Área (m²)                      | Espaçamento (m) | Lado maior (m) | Lado menor (m) | Carga máxima (kN) | Carga para recalque 25 mm (kN) |
| Retângulo 1 | 86,49                          | 4,00            | 9,30           | 9,30           | 28154,65          | 6776,69                        |
| Retângulo 2 | 86,49                          | 3,00            | 9,30           | 9,30           | 25838,24          | 6776,69                        |
| Retângulo 3 | 86,49                          | 3,50            | 9,30           | 9,30           | 27149,27          | 6776,69                        |

  

|           | Teste 2 - Demais formatos |          |                     |                     |          |                   |                                |
|-----------|---------------------------|----------|---------------------|---------------------|----------|-------------------|--------------------------------|
|           | Área (m²)                 | Raio (m) | Semi-eixo maior (m) | Semi-eixo menor (m) | Lado (m) | Carga máxima (kN) | Carga para recalque 25 mm (kN) |
| Circular  | 86,59                     | 5,25     | ----                | ----                | ----     | 24882,41          | 6737,49                        |
| Elíptico  | 86,65                     | ----     | 7,00                | 3,94                | ----     | 25920,38          | 3492,84                        |
| Octogonal | 86,80                     | ----     | ----                | ----                | 4,24     | 25920,38          | 3009,23                        |

## Teste 3

O Teste 3, da mesma forma que os testes anteriores, manteve a área e quantidade de estacas. A área foi de aproximadamente 28,05 m<sup>2</sup> e foram utilizadas quatro estacas por radier. As características adotadas e resultados obtidos foram:

|             | Teste 3 - Radiers Retangulares |                 |                |                |                   |                                |
|-------------|--------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------------------|
|             | Área (m²)                      | Espaçamento (m) | Lado maior (m) | Lado menor (m) | Carga máxima (kN) | Carga para recalque 25 mm (kN) |
| Retângulo 1 | 28,09                          | 4,00            | 5,30           | 5,30           | 12999,35          | 3107,80                        |
| Retângulo 2 | 28,09                          | 3,00            | 5,30           | 5,30           | 12562,34          | 3107,80                        |
| Retângulo 3 | 28,09                          | 3,50            | 5,30           | 5,30           | 13334,47          | 3107,80                        |

|            | Teste 3 - Demais formatos |          |                     |                     |          |                   |                                |
|------------|---------------------------|----------|---------------------|---------------------|----------|-------------------|--------------------------------|
|            | Área (m²)                 | Raio (m) | Semi-eixo maior (m) | Semi-eixo menor (m) | Lado (m) | Carga máxima (kN) | Carga para recalque 25 mm (kN) |
| Circular   | 28,09                     | 2,99     | ----                | ----                | ----     | 11058,85          | 3084,89                        |
| Elíptico   | 28,04                     | ----     | 3,50                | 2,55                | ----     | 11520,17          | 1632,14                        |
| Triangular | 28,06                     | ----     | ----                | ----                | 8,05     | 11520,17          | 1408,47                        |

De acordo com os três testes realizados na primeira etapa, observou-se melhor eficiência em radiers retangulares. Para esse formato, obteve-se maior capacidade de carga e maior carga até recalque de 25 mm. Também foi possível observar que os radiers retangulares com as estacas mais afastadas apresentaram melhor desempenho.

Em todos os testes os radiers circulares apresentaram menor capacidade de carga comparando-os com os radiers elípticos, triangular, octogonal e pentagonal, nos respectivos testes. Todavia, comparando os radiers circulares com esses formatos, obteve-se que os circulares apresentaram carga

superior para recalque de 25 mm, nos respectivos testes, indicando possível vantagem de distribuição de carga em relação às demais formas, com exceção do retângulo.

Analisando o formato elíptico, observa-se a mesma capacidade de carga que os formatos triangular, octogonal e pentagonal, nos respectivos testes. Todavia, os radiers elípticos apresentaram carga para recalque de 25 mm superior ao desses formatos, porém sempre valores próximos a 52% da carga para recalques de 25 mm observados nos retangulares dos respectivos testes.

No teste 1 e 3, os radiers retangulares apresentaram área pouco superior à dos demais formatos, enquanto no teste 2 os radiers retangulares tiveram áreas inferiores. Apesar dessa variação, a resistência continuou maior nesse formato, indicando um formato preferencial para radiers estaqueados.

Na segunda etapa da pesquisa foram realizados 9 testes no PIGLET aplicando a “Carga para recalque 25 mm” nos radiers retangulares, conforme valores obtidos na primeira etapa. Conforme descrito anteriormente, foi adotado coeficiente de Poisson igual a 0,3, Módulo de Young igual a 25.000 MPa, estacas com 25 metros de comprimento e 1 metro de diâmetro. Além disso, foi considerado o Gradiente do módulo de cisalhamento apresentado por Davisson, Salley (1970), de valor 4240 MPa/m. Todavia, durante a realização dos testes foi observado que os valores de recalque resultante estavam divergindo do obtido na etapa anterior. Assim, para o primeiro radier, calculou-se o valor do Gradiente do módulo de cisalhamento que resultava em um recalque de 25 mm, resultando em um valor igual a 2200,95 MPa/m. Abaixo estão apresentados os valores de recalques obtidos para cada um dos dois módulos considerados:

| Etapa 2 - Radiers Retangulares |            |                 |                     |              |                 |                   |                 |
|--------------------------------|------------|-----------------|---------------------|--------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|                                | Nº Estacas | Espaçamento (m) | Carga aplicada (kN) | dG/dZ (1970) | Recalque 1 (mm) | dG/dZ - Calculado | Recalque 2 (mm) |
| Retângulo 1                    | 6          | 4,00            | 4661,70             | 4240,00      | 15,985          | 2200,95           | 25,000          |
| Retângulo 2                    | 6          | 3,00            | 4661,70             | 4240,00      | 17,305          | 2200,95           | 27,161          |
| Retângulo 3                    | 6          | 3,50            | 4661,70             | 4240,00      | 16,593          | 2200,95           | 25,996          |
| Retângulo 4                    | 4          | 4,00            | 3107,80             | 4240,00      | 13,173          | 2200,95           | 20,367          |
| Retângulo 5                    | 4          | 3,00            | 3107,80             | 4240,00      | 13,982          | 2200,95           | 21,693          |
| Retângulo 6                    | 4          | 3,50            | 3107,80             | 4240,00      | 13,546          | 2200,95           | 20,978          |
| Retângulo 7                    | 9          | 4,00            | 6776,69             | 4240,00      | 19,440          | 2200,95           | 30,738          |
| Retângulo 8                    | 9          | 3,00            | 6776,69             | 4240,00      | 21,405          | 2200,95           | 33,954          |
| Retângulo 9                    | 9          | 3,50            | 6776,69             | 4240,00      | 20,343          | 2200,95           | 32,215          |

Os resultados obtidos na segunda etapa com o PIGLET indicaram valores de recalques diferentes do que os obtidos anteriormente no GEO5. Considerando o Gradiente do módulo de cisalhamento proposto por Davisson, Salley (1970), os valores do PIGLET apresentaram recalques inferiores aos obtidos no GEO5, enquanto utilizando o Gradiente calculado, os recalques são superiores. Assim, para assertividade nas análises com o PIGLET, é necessário um input mais preciso do gradiente, o qual pode ser determinado empiricamente.

Diferentemente dos resultados apresentados no GEO5, ao alterar o espaçamento entre as estacas em um mesmo tamanho de radier, obteve-se recalques diferentes ao se aplicar a mesma carga. Esse resultado é mais coerente com os aspectos de um grupo de estacas, uma vez que a proximidade entre as estacas reduz a eficiência delas. Essa característica pode ser observada em ambas as etapas, uma vez que a carga de máxima na estrutura apresentada no GEO5 diminui para espaçamentos menores entre as estacas e os recalques são maiores nos testes do PIGLET para espaçamentos

menores. Dessa forma, eram esperados diferentes valores para recalque igual a 25 mm no GEO5 ao variar o distanciamento das estacas.

## CONCLUSÕES:

Em geral, observa-se que os resultados do GEO5 e PIGLET não convergem entre si, possivelmente devido aos diferentes inputs considerados e à metodologia de cálculo utilizada por cada software. Porém, observou-se que o formato retangular apresenta maior capacidade de carga ao ser comparado com radiers de outros formatos, mesmo que apresentassem a mesma área e quantidade de estacas. Essa diferença de resultados pode estar atrelada a eficiência das estacas, a qual é reduzida com a proximidade entre as estacas devido a sobreposição dos bulbos de tensão aplicados sobre o solo.

Para melhor validação e comparação do uso do GEO5 na extensão “Grupo de Estacas” e do PIGLET, sugere-se realizar as simulações obtendo todos os parâmetros de um mesmo solo real, realizando as determinações das características antes da inserção dos inputs nos softwares.

## BIBLIOGRAFIA

ALBUQUERQUE, P. J. R.; GARCIA, J. R. **Engenharia de fundações**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

CAMPOS, D. **Dimensionamento de blocos sobre estacas utilizando o conceito de radier estaqueado**. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

DAVISSON, M. T.; SALLEY, J. R. **Model study of laterally loaded piles**. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, v. 96, n. SM5, p. 1605–1627, set. 1970.

GARCIA, J. R. **Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP**. Campinas, 2015. 359 f. Tese (doutorado) - UNICAMP, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

SILVA JÚNIOR, J., PINTO, J. **Uso alternativo de pneus inservíveis em substituição às manilhas de concreto - análise pelo método dos elementos finitos**. 2018, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró.

PEZO, O. **Análises numéricas de provas de carga em radier estaqueado utilizando o método dos elementos finitos**. Recife, 2013. 132 f. Dissertação (mestrado) - UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

POULOS, H. Piled raft foundations: design and applications. **Géotechnique**, v. 51, n. 2, p. 95–113, 2001.

RANDOLPH, M. Design methods for pile groups and piled rafts. **Thirteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. v. 5, New Delhi, 1994.

RANDOLPH, M. **PIGLET: Analysis and design of pile groups**. Perth, 2021.

SOUZA, R. **Análise dos fatores de interação entre estacas em radier estaqueado: comparação entre duas ferramentas numéricas**. 2010. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.