

Influência da Sobreposição da Área do Bloco de Coroamento Sobre o Comportamento do Grupo de Estacas

Gabriela França Azevedo

Doutoranda, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, gabrielaazevedotn@hotmail.com

Jean Rodrigo Garcia

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

RESUMO: A influência do suporte do bloco de coroamento no solo interfere na distribuição de carga no grupo de estacas e na transferência do atrito lateral ao solo. A distribuição estratégica de cargas, proporcionada pelo posicionamento adequado das estacas, contribui para suportar cargas mais elevadas ou aumentar o fator de segurança, especialmente em camadas superficiais menos resistentes. Neste contexto, este artigo investiga o impacto do aumento da área de sobreposição do bloco sobre o grupo de estacas. As análises numéricas tridimensionais em elementos finitos mostram que o aumento da área do bloco afeta significativamente a distribuição de cargas entre os elementos da fundação. A maior parte da carga é suportada pelo contato bloco-solo, variando entre 52% e 68%, com uma tendência ascendente na capacidade de carga do bloco até um aumento de 50% da área mínima, seguido por uma redução para 75% do cobrimento do bloco. Esses resultados sugerem uma área de sobreposição ótima, onde uma maior parte da carga é suportada pelo bloco. Destaca-se a importância de considerar o cobrimento do bloco para otimizar projetos estruturais e sistemas de fundações estaqueadas em diferentes contextos geotécnicos.

PALAVRAS-CHAVE: Bloco de Coroamento, Radier Estaqueado, Grupo de Estacas, Elementos Finitos 3D.

ABSTRACT: The influence of the pile cap support on the ground affects the load distribution to the pile group and the transfer of skin friction to the soil. The strategic load distribution, achieved through the proper positioning of the piles, contributes to supporting higher loads or increasing the safety factor, especially in less resistant surface layers. In this context, this article investigates the impact of increasing the overlapping area of the pile cap on the pile group. Three-dimensional numerical analyses using finite elements show that increasing the cap area significantly affects the load distribution among the foundation elements. Most of the load is supported by the cap-soil contact, ranging from 52% to 68%, with an upward trend in the cap's load capacity up to a 50% increase in the minimum area, followed by a reduction to 75% of the cap's coverage. These results suggest an optimal overlapping area, where a larger portion of the load is supported by the cap. This highlights the importance of considering the cap coverage to optimize structural designs and piled foundation systems in different geotechnical contexts.

KEYWORDS: Pile Cap, Piled Raft, Pile Group, 3D Finite Elements.

1 INTRODUÇÃO

A complexidade do radier estaqueado advém da integração entre diferentes tipos de fundações e da interação entre os elementos estruturais e o solo. Esta interação depende de uma série de parâmetros, tais como: diâmetro, comprimento, espaçamento e configuração das estacas; tamanho, espessura e rigidez do radier (Balakumar 2008).

Ao considerar cada elemento (estaca, radier e solo) separadamente, nota-se que a interação entre eles é inevitável. O radier é afetado pela presença das estacas, e as estacas são provavelmente afetadas pela pressão do solo proveniente do radier, uma vez que o aumento das tensões laterais sobre as estacas impacta sua capacidade de resistência lateral (Novak et al. 2005).

Ao analisar as fundações em radier estaqueado compostas por grupos de 9, 16 e 25 estacas, Garcia e Albuquerque (2018) constataram que para radiers de coroamento considerados rígidos (com uma altura de

2m), as estacas posicionadas nos cantos do bloco foram submetidas a sobrecargas de até 50% (no grupo de 16 estacas) além da carga média das estacas do grupo, enquanto as estacas centrais permaneceram carregadas com cerca de 40% da mesma carga média. Os autores também observaram que, para blocos de coroamento considerados flexíveis, com alturas de 0,5m e 1m, as cargas nas estacas central, de canto e borda não apresentaram variação significativa em relação à carga média das estacas.

Randolph (1994) ressalta que as fundações estaqueadas, com contato bloco-solo, contribuem de maneira significativa na redução dos recalques diferenciais e totais. Lima (2007) destaca a importância a consideração deste contato no projeto, pois leva a um aumento da capacidade de carga na fundação.

Dessa forma, este artigo investiga a influência da sobreposição da área do radier (bloco) sobre o grupo de estacas, ou cobrimento perimetral, que corresponde à distância entre o centro da estaca e a borda do radier, o qual coroa as estacas do grupo. Para isso, foram realizadas análises numéricas tridimensionais em grupos de estacas, cada um coroado por blocos de coroamento, considerando o contato entre o bloco e o solo no comportamento dessas fundações.

2 ANÁLISE NUMÉRICA

O software Plaxis 3D foi utilizado para criar modelos tridimensionais em elementos finitos (MEF-3D) destinados à avaliação das fundações em radier estaqueado, incluindo o modelo empregado na etapa de validação. Este software oferece modelos constitutivos pré-configurados para abordar questões tanto estruturais quanto geotécnicas. Ele consiste em dois programas especializados, cada um dedicado a uma fase específica da simulação numérica. O primeiro é o programa de entrada, um pré-processador utilizado para definir a geometria do problema, criar a malha de elementos e estabelecer as fases de cálculo. O segundo é o programa de saída, um pós-processador usado para visualizar os resultados dos cálculos e gerar gráficos de saída em pontos selecionados da geometria.

Foram realizados testes de validação e calibração do modelo com o intuito de garantir sua precisão e confiabilidade. Para otimizar o tempo e o esforço computacional, o modelo foi simplificado, considerando apenas $\frac{1}{4}$ da geometria da fundação e aproveitando sua simetria. Para o comportamento do perfil de solo foi adotado o modelo linear elástico perfeitamente plástico (Mohr-Coulomb), no qual representa uma aproximação de “primeira ordem” do comportamento do solo. De acordo com o manual do Plaxis, para cada camada estima-se uma rigidez média constante ou uma rigidez que aumenta linearmente com a profundidade. Devido a esta rigidez constante, os cálculos tendem a ser relativamente rápidos e obtém-se uma primeira estimativa de deformações.

A aplicação de restrições de deslocamento no modelo de elementos finitos foi necessária para simular as condições reais de contorno da estrutura em análise. O Plaxis restringe previamente as faces (superfícies), bordas ou pontos do modelo, foram selecionadas restrições permanentes em X, Y mínimo e máximo e Z mínimo na superfície (face, arestas e vértices) e sem restrições para Z máximo.

É fundamental destacar que este estudo se baseia na pesquisa conduzida por França e Rodrigo (2023), sendo os parâmetros geotécnicos do solo e da fundação derivados desse trabalho. Para a fundação, adotou-se o modelo linear elástico, baseado na lei da elasticidade isotrópica de Hooke e envolve dois parâmetros elásticos básicos, ou seja, módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν).

A modelagem por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) teve como objetivo simular o comportamento das fundações em radier estaqueado, submetidas ao peso próprio e a carregamentos externos. Esses carregamentos foram definidos para gerar um deslocamento máximo superior ao critério de ruptura, estabelecido como um deslocamento equivalente a 20% do diâmetro da estaca, ou seja, o dobro do deslocamento convencional comumente adotado com normas reconhecidas como o Eurocódigo em que o critério convencional de ruptura é baseado em deslocamentos equivalentes a 10% do diâmetro da estaca. Este critério foi selecionado com o intuito de permitir uma análise mais detalhada do comportamento da fundação em seu estado limite último, possibilitando, inclusive, a exploração do aspecto estrutural dos elementos de fundação.

2.1 Validação do modelo

Para a validação e calibração do modelo, foram conduzidas simulações a fim de assegurar que a resposta do sistema corresponde às expectativas em termos de carga e recalque, verificando assim, se a metodologia está sendo aplicada corretamente. Nesse contexto, foi replicada uma fundação em radier estaqueado modelada por França e Rodrigo (2023), composta por quatro estacas espaçadas a seis vezes o diâmetro da estaca. Os resultados obtidos, conforme ilustrado na Figura 1, demonstram uma resposta satisfatória durante os testes, o que indica uma validação adequada do modelo.

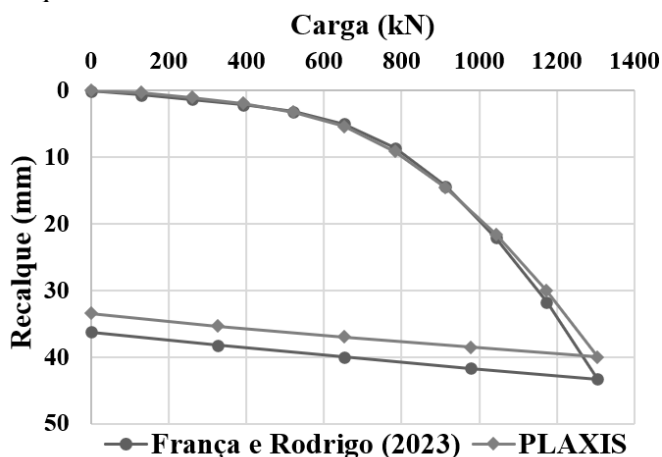


Figura 1. Comparação das curvas Carga vs Recalque: França e Rodrigo (2023) e validação (PLAXIS)

2.2 Calibração do modelo numérico

O processo de calibração implica uma série de etapas para obter o modelo físico que melhor represente o problema proposto. Uma vez estabelecidas as condições ideais para um modelo da fundação em estudo, essas condições foram aplicadas a outras situações-problema. Considerando que as dimensões do problema são semelhantes às analisadas por França e Rodrigo (2023), as dimensões de contorno do modelo foram definidas com base em seus estudos, adotando um semi-espaço aproximadamente 20 vezes maior que a dimensão do radier estaqueado, com uma profundidade proporcional ao perfil de solo adotado. É importante ressaltar que um carregamento mais elevado foi aplicado para verificar os deslocamentos nas extremidades da malha, os quais foram inferiores à ordem de 10^{-6} mm, confirmado a atribuição indeslocável para a condição do modelo.

Quanto à validação da malha do modelo, foi realizado um processo de refinamento da mesma, seguido por uma análise dos deslocamentos resultantes. No software utilizado, a densidade da malha é controlada pelo Fator de Rugosidade (Coarseness Factor), onde valores menores indicam uma malha mais refinada. Para a malha global conforme a configuração padrão do programa, a distribuição da malha varia de muito grossa para grossa, média, fina e muito fina. Inicialmente, adotou-se um “Coarseness Factor” menor na estrutura da fundação. Após verificar que a alteração da malha de média para fina não resultou em mudanças significativas nos deslocamentos, optou-se por usar a malha global tipo “média” na análise, com um fator de escala global de 1,2 e fator de tamanho mínimo do elemento de 5^{-3} , além de um “Coarseness Factor” de $\frac{1}{4}$ aplicado nos elementos da fundação.

2.3 Etapas de Cálculo

Após a validação e calibração do modelo, foram inseridos: a geometria, os parâmetros geotécnicos do solo e os parâmetros da fundação, bem como os deslocamentos impostos e a malha. Em seguida, avançou-se para as etapas de cálculo, divididas da seguinte forma:

Na primeira etapa, concentrou-se na obtenção do estado de tensões in situ, utilizando um método de cálculo tipo K_0 . Na segunda etapa, procedeu-se com a representação da escavação do solo, seguida pela etapa de construção da fundação. Por fim, foram aplicados os deslocamentos impostos para construção da curva carga

versus recalque, divididos em 15 estágios com os seguintes deslocamentos: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50 e 60 mm.

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

3.1 Fundação

Para investigar o impacto da área do radier sobre o grupo de estacas dispostos em uma geometria quadrada, adotou-se um modelo de referência e, em seguida, elevou-se a área de sobreposição sobre o grupo de estacas gradualmente em 25%, 50%, 75% e 100% resultando em cinco modelos de fundações distintos. A sobreposição de área do radier sobre o grupo de estacas, ou cobrimento, corresponde a distância entre o centro da estaca e a borda do radier que coroa as estacas do grupo, conforme ilustrado na Figura 2. Para efeito de comparação apenas do efeito do aumento do cobrimento, todas as fundações estaqueadas foram modeladas com quatro estacas de 0,30 m de diâmetro e 5 metros de comprimento, espaçadas a uma distância equivalente a 6 vezes o diâmetro das estacas ($s = 6d$). Além disso, a altura do bloco foi mantida constante em 1,05 m, para todos os cobrimentos adotados, preservando o ângulo da biela em 49° , o que confere rigidez à estrutura. A Tabela 1 apresenta os parâmetros geométricos das fundações estaqueadas analisadas neste estudo. Além disso, a capacidade de carga lateral do bloco foi desconsiderada, com o objetivo de avaliar apenas a capacidade de carga da área líquida de base do bloco em contato com o solo, somada à capacidade de carga das estacas. Para isso, uma pequena camada de solo foi removida em torno da lateral do bloco de coroamento do grupo de estacas.

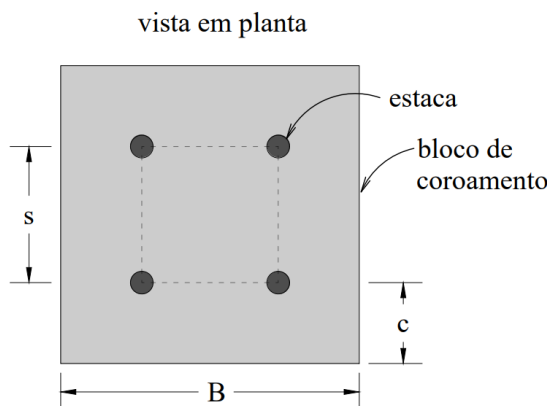


Figura 2. Planta baixa do bloco sobre quatro estacas

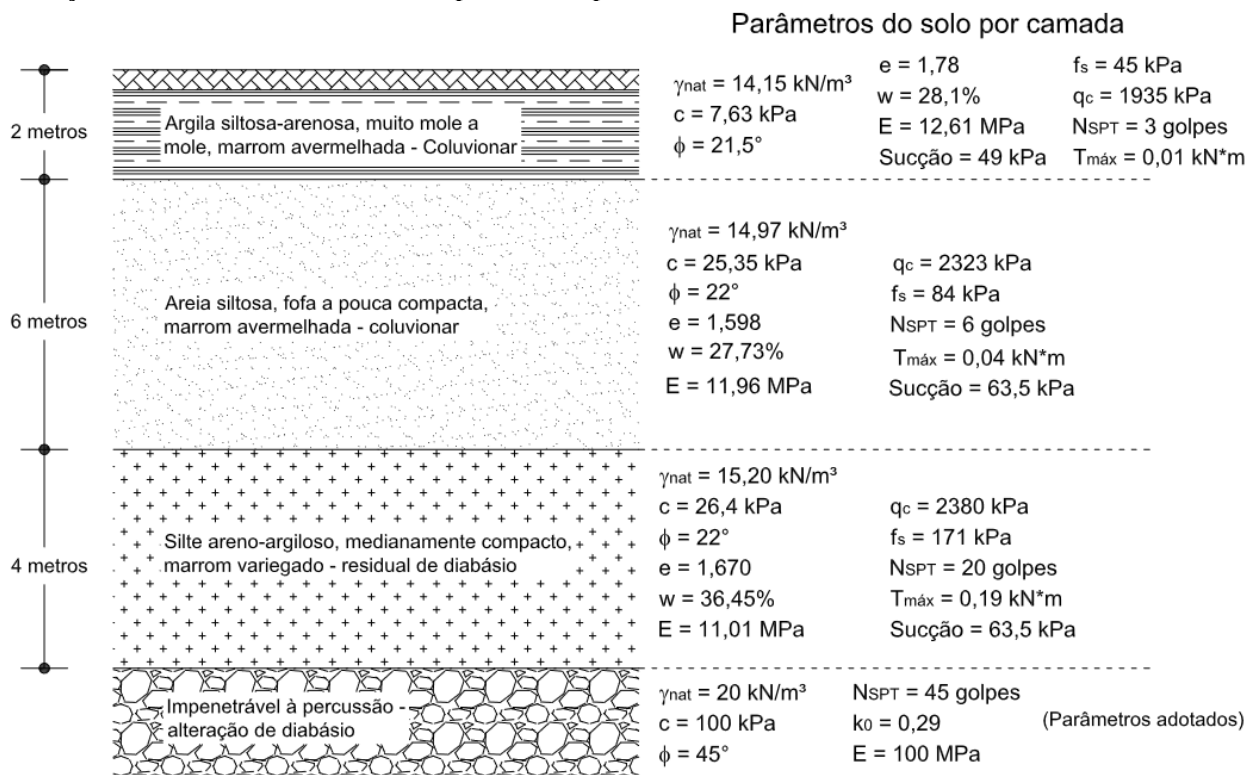
Tabela 1. Parâmetros geométricos das fundações estaqueadas

Caso	n_e [-]	ϕ_e [m]	c [m]	B [m]	U [m]	A [m ²]	$n_{es} * A_e$ [m ²]	A_{liq} [m ²]	ΔA [%]
I	4	0.30	0.54	2.88	11.52	8.29	0.28	8.01	0%
II	4	0.30	0.67	3.14	12.56	9.86	0.28	9.58	20%
III	4	0.30	0.80	3.40	13.60	11.56	0.28	11.28	41%
IV	4	0.30	0.94	3.68	14.72	13.54	0.28	13.26	66%
V	4	0.30	1.07	3.94	15.76	15.52	0.28	15.24	90%

Legenda: n_e - número de estacas; ϕ_e - diâmetro da estaca; c - cobrimento; B - lado do bloco; U - perímetro do bloco; A - área do bloco em planta; A_{liq} - área líquida do bloco em contato com o terreno; ΔA - ganho de área em relação ao caso I.

3.2 Parâmetros geotécnicos e parâmetros da fundação

Todos os parâmetros geotécnicos adotados neste estudo foram retirados da pesquisa conduzida por França e Rodrigo (2023), realizada em um perfil de solo tropical no campo experimental da Universidade de Campinas (Figura 3). Os autores adotaram para o solo o modelo de comportamento Mohr Coulomb, e forneceram todos os dados de entrada para o perfil de solo com base na calibração dos parâmetros geotécnicos utilizando resultados de ensaios de prova de carga experimentais. Quanto à estrutura da fundação, foi adotado o modelo linear elástico, seguindo a abordagem de França e Rodrigo (2023) e todos os parâmetros da fundação derivados desse estudo. Tais parâmetros podem ser consultados na Tabela 2.



LEGENDA:

E - módulo de Young do solo;
 w - umidade natural do solo;
 g - peso específico natural do solo;
 $T_{m\acute{a}x}$ - torque máximo;
 k_0 - coeficiente de empuxo em repouso do solo.

N - índice de resistência a penetração do amostrador padrão do ensaio SPT-T;
 q_c - resistência de ponta do cone do ensaio CPT;
 f_s - resistência por atrito lateral obtido no ensaio CPT;
 c' - coesão efetiva do solo;
 ϕ - ângulo de atrito efetivo do solo;

Figura 3. Parâmetros médios do perfil geológico (GARCIA, 2015).

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos do solo e parâmetros da fundação

Material	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν (-)	c' (kPa)	ϕ (°)	K_0	R_c (kPa)	R_t (kPa)
Solo de 0 a -2 m	14	23	0,33	7	10	0,6	-	-
Solo de -2 m a -10,8 m	15	24	0,33	10	10	0,6	-	-
Concreto	25	25000	0,2	-	-	-	30000	3000

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

É fundamental ressaltar que os resultados apresentados nesta análise correspondem a apenas 25% da fundação modelada. Na Figura 4, pode-se observar o comportamento carga versus recalque ao longo de 15

estágios de carregamento, variando o cobrimento do bloco. Conforme esperado, observa-se um aumento na capacidade de carga geral da fundação estaqueada à medida que o cobrimento é aumentado e conseqüentemente uma maior área de contato entre o bloco e o solo. Em comparação com a fundação base (0% de cobrimento), os incrementos de 25%, 50%, 75% e 100% no cobrimento promoveram aumentos de 13%, 27%, 47% e 61%, respectivamente, na capacidade de carga.

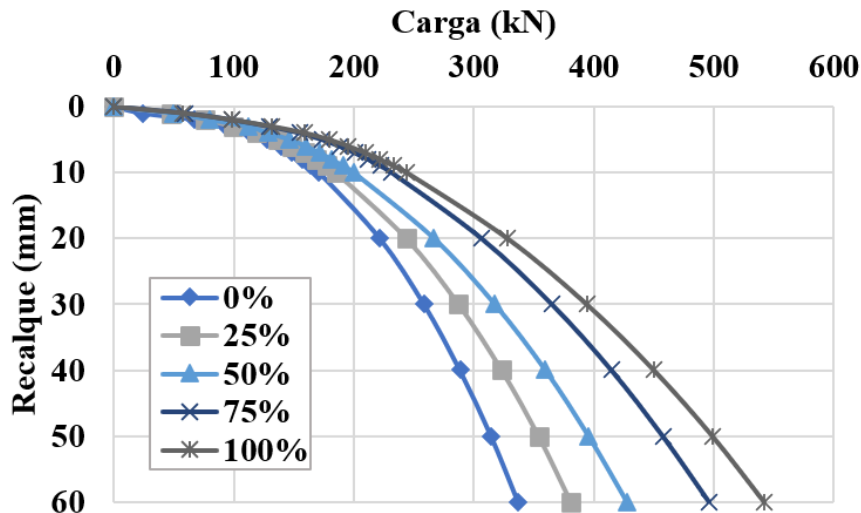


Figura 4. Comportamento carga versus recalque das fundações estaqueadas em relação a diferentes percentuais do cobrimento.

No contexto das fundações estaqueadas, é fundamental analisar a interação entre os elementos estruturais de fundação e o solo. Cada estaca é afetada pelos efeitos das demais estacas, do bloco e do próprio solo, enquanto o bloco também é influenciado pelas tensões geradas pelo conjunto de estacas. Neste estudo, todas as dimensões das estacas e o espaçamento foram mantidos constantes, variando-se apenas o cobrimento do bloco sobre as estacas, o que conseqüentemente aumenta a área do bloco. Na Figura 5, verifica-se a distribuição de cargas nos elementos da fundação estaqueada, bem como a carga total correspondente a um recalque estimado em 20% do diâmetro da estaca, ou seja, 60 mm. De modo geral, observou-se que o aumento do cobrimento do bloco influencia na distribuição de cargas entre as estacas e o bloco até certo ponto, após o qual essa tendência se inverte.

Em todos os cenários de variação do cobrimento analisados, o bloco sustentou a maior parcela da carga. Verificou-se um aumento na capacidade de carga do bloco até um aumento de 50% no cobrimento. Entretanto, com o aumento subsequente do cobrimento, ocorreu uma redução na capacidade do bloco, embora a maior parte da carga ainda fosse suportada por ele. Por outro lado, observou-se que a capacidade de carga suportada pelas estacas seguia uma tendência inversa.

Na Figura 6, é apresentada a transferência de carga axial ao longo do fuste para uma estaca de cada um dos percentuais de cobrimento de fundação estaqueada, considerando o carregamento total máximo analisado, conforme descrito na Figura 5. O efeito do bloco foi mais pronunciado na parte superior da estaca, onde ocorreu uma maior variação na capacidade de carga. Em contrapartida, a variação na porcentagem de carga suportada pela na ponta da estaca não foi significativa em comparação à carga suportada pelo topo. No entanto observa-se resultados semelhantes entre os modelos com 0%, 25% e 50% de cobrimento, bem como entre os modelos com 75% e 100% de cobrimento, mesmo sob diferentes níveis de carregamento aplicados à fundação. Isso sugere a existência de um intervalo de cobrimento no qual a carga suportada pelas estacas permanece constante.

Quando se analisa a distribuição percentual da carga axial em relação à carga total da fundação nos diferentes percentuais de cobrimento (Figura 7), é evidente uma maior mobilização do topo para a ponta, de forma crescente desde o cobrimento nulo (0%) até o cobrimento elevado em 50%. No entanto, essa tendência se inverte após esse cobrimento, onde a mobilização ao longo do fuste é maior para 75% do cobrimento do que para 100%. Nota-se uma maior mobilização decrescente do topo para a ponta da estaca, o que é justificado pela presença do radier. A transferência de cargas pelo maior contato do radier-solo provocou um aumento do

nível de tensões no solo, gerando uma maior mobilização do atrito lateral ao longo do fuste da estaca até 75% do cobrimento.

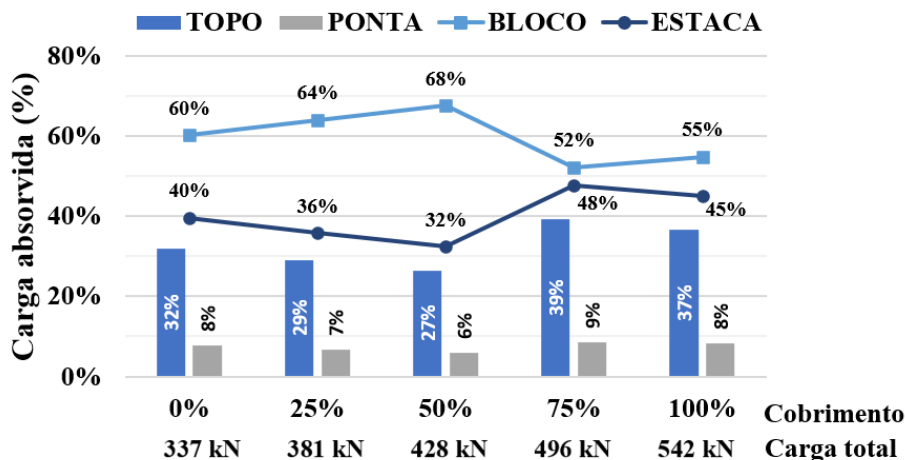


Figura 5. Distribuição de cargas na fundação estaqueada com o aumento do cobrimento.

Essa mesma tendência pode ser observada na distribuição do atrito lateral unitário (Figura 8), porém com uma maior mobilização do atrito lateral na profundidade entre 1 e 2 m. Os resultados são semelhantes para os menores cobrimentos com 0%, 25% e 50%. Entretanto, o comportamento muda para os maiores valores de cobrimento (75% e 100%) ao longo da profundidade da estaca. Enquanto no topo da estaca a mobilização do atrito lateral é maior para 100% de cobrimento na ponta da estaca acontece o inverso, a mobilização do atrito lateral é maior para 75% de cobrimento do que para 100%.

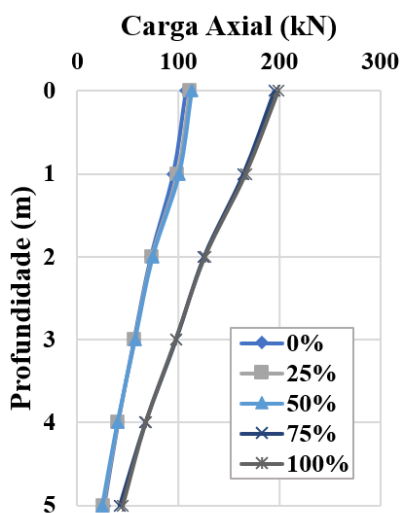


Figura 6. Transferência de carga axial média ao longo da profundidade.

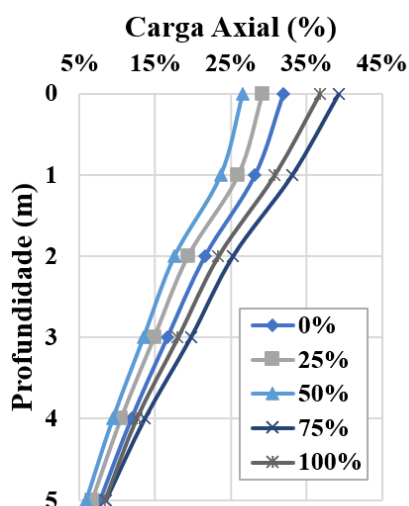


Figura 7. Distribuição percentual da carga axial em relação à carga total da fundação nos diferentes percentuais de cobrimento.

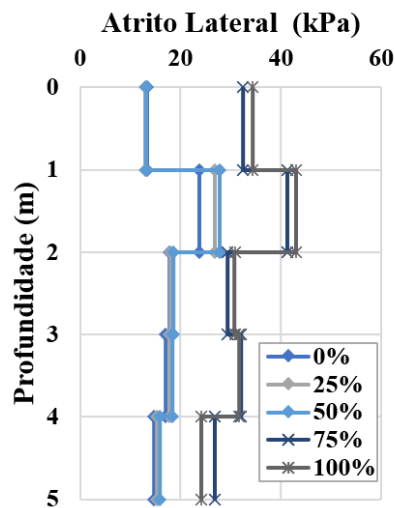


Figura 8. Atrito lateral unitário.

5 CONCLUSÕES

Este artigo investigou a influência da sobreposição da área do radier (bloco) sobre o grupo de estacas a partir de análises numéricas tridimensionais, considerando o contato entre o bloco e o solo no comportamento dessas fundações. Os resultados apontam que o aumento do cobrimento do bloco na fundação estaqueada resulta em uma maior capacidade de carga, uma vez que há uma maior área de contato entre o bloco e o solo. No entanto, é importante destacar que o aumento do cobrimento do bloco influencia diretamente na distribuição de cargas entre os elementos da fundação: estaca (topo e ponta) e bloco. Ou seja, considerando

um grupo de estacas idêntico, a variação no cobrimento do bloco resulta em uma variação na capacidade de carga do grupo de estacas. Para um grupo de estacas com as mesmas configurações adotadas neste estudo, essa variação pode oscilar entre 32% e 48% de acordo com o cobrimento adotado.

Além disso, observou-se uma distribuição não uniforme da carga entre as estacas e o bloco, com a maior parcela da carga sendo suportada pelo contato bloco-solo, variando entre 52% e 68%. Verificou-se uma tendência ascendente na capacidade de carga do bloco até um aumento de 50% no cobrimento, a partir do qual a capacidade de carga é reduzida para 75% do cobrimento do bloco. Tais resultados sugerem a existência de um cobrimento ótimo, onde uma maior porcentagem da capacidade de carga é suportada somente pelo bloco de coroamento.

Para a distribuição e transferência de cargas nas estacas, verifica-se uma semelhança no comportamento entre os menores cobrimentos com 0%, 25% e 50% e os maiores de cobrimentos dos blocos de coroamento (75% e 100%). O que indica a influência do cobrimento do bloco de coroamento na distribuição da carga axial ao longo do fuste da estaca. No geral, verifica-se uma mobilização decrescente do topo para a ponta da estaca, o que é justificado pela presença do radier. Enquanto o gráfico de atrito lateral mostra uma maior mobilização do atrito lateral na profundidade entre 1 e 2 m.

Dessa forma, ressalta-se a importância de considerar o contato entre o bloco de coroamento e o solo no projeto de fundações estaqueadas. Em especial é fundamental realizar uma análise detalhada da sobreposição da área do radier (bloco) sobre o grupo de estacas, sobretudo quanto aos critérios ou filosofias de projeto adotados. Isso inclui a decisão de adotar o grupo de estacas apenas como fator de segurança, para suportar parcialmente ou a maior parcela do carregamento total da fundação. Esta análise do tamanho do cobrimento do bloco sobre as estacas é essencial, pois influencia diretamente na capacidade de carga entre o bloco e o grupo de estacas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CAPES e a Universidade de Brasília (UnB), pelo suporte e recursos fornecidos para a realização deste estudo, em especial o Laboratório em especial ao Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (InfraLab) pela disponibilização da licença do software adotado neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balakumar, V. 2008. *“Experimental studies of model piled rafts on sand and field study of prototype behaviour.”* Anna University Chennai.
- França, A. G., e G. J. Rodrigo. 2023. *“Influence of Pile Cap–Ground Contact Geometry on the Behavior of Piled Foundations.”* Arab. J. Sci. Eng. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08091-2>.
- Garcia, J. R., and P. J. R. de Albuquerque. 2018. *“Influence of relative stiffness on the behavior of piled raft foundations.”* Acta Sci. Technol., 40 (1): 35209. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v40i1.35209>.
- Garcia, J. R. Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de campinas/sp. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2015.
- Lima, B. S. Otimização de Fundações Estaqueadas. [s.l.] Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.
- Novak, L. J., L. C. Reese, and S.-T. Wang. 2005. *“Analysis of Pile-Raft Foundations with 3D Finite-Element Method.”* Struct. Congr. 2005, 1–12. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Randolph, M. F. 1994. *“Design Methods for pile groups and pile rafts.”* XIII Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 61–82. New Delhi: ISSMGE.