



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Bruno Gabriel Fernandes Alves

**ANÁLISE NUMÉRICA EM ELEMENTOS FINITOS 3D DE UM BLOCO
SOBRE DUAS ESTACAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador:
Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia

UBERLÂNDIA
2024.

ANÁLISE NUMÉRICA EM ELEMENTOS FINITOS 3D DE UM BLOCO SOBRE DUAS ESTACAS

Bruno Gabriel Fernandes Alves¹
Jean Rodrigo Garcia²

RESUMO

O setor da construção civil brasileiro tem experimentado um crescimento significativo, impulsionando a demanda por soluções de fundação mais eficientes. Nesse contexto, a análise numérica em elementos finitos 3D emerge como uma ferramenta essencial para a otimização de projetos de fundações. A consideração do contato entre o elemento superficial da fundação e o solo, frequentemente negligenciada em projetos convencionais, revela-se como um fator crucial para a obtenção de resultados confiáveis. Neste estudo, o software RS3 da Rocscience foi utilizado para realizar simulações numéricas, avaliando a influência desse contato no comportamento de fundações. Os resultados indicam que a consideração desse contato pode contribuir significativamente para a carga total da fundação, chegando a absorver 19% dela, o que reduz a carga transferida para as estacas e permitindo otimizações no projeto. Essa abordagem é comparada a projetos convencionais, que frequentemente desconsideram essa interação, o que pode levar a estimativas conservadoras e subdimensionadas dos recalques. Além disso, a pesquisa ressalta os benefícios econômicos e ambientais de otimizar o dimensionamento das fundações, como a redução no uso de materiais como concreto e aço, resultando em menor impacto ambiental. O estudo destaca a importância de análises detalhadas para alcançar um melhor desempenho estrutural e econômico em empreendimentos de alto padrão.

Palavras-chaves: Otimização de Fundações, Interação Bloco-Solo, Blocos de Fundação, Análise 3D com Elementos Finitos.

ABSTRACT

The Brazilian construction sector has experienced significant growth, driving demand for increasingly efficient foundation solutions. In this context, 3D finite element analysis has emerged as a fundamental tool for optimizing foundation designs. Considering the contact between the pile cap and the soil—often neglected in conventional designs—proves crucial for obtaining reliable results. In this study, Rocscience’s RS3 software was used to perform numerical simulations that evaluate the influence of this contact on foundation

behavior. The results indicate that accounting for this contact can significantly contribute to the total foundation load, absorbing up to 19% of it, thereby reducing the load transferred to the piles and enabling further design optimizations. This approach is compared to conventional designs, which often disregard this interaction, potentially leading to conservative and undersized settlement estimates. Furthermore, the research highlights the economic and environmental benefits of optimizing foundation design, including reductions in concrete and steel use, leading to a lower environmental impact. This study emphasizes the importance of detailed analyses to achieve superior structural and economic performance in high-standard projects.

Key words: Foundation Optimization, Pile Cap-Soil Interaction, Pile Cap, 3D Finite Element Analysis.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, observa-se um crescimento acentuado na construção civil, com lançamentos de edifícios altos se tornando cada vez mais frequentes. O processo de verticalização das cidades apresenta grandes desafios para a engenharia, exigindo soluções mais rigorosas e complexas no desenvolvimento de projetos para essas estruturas, a fim de garantir eficiência e segurança das edificações.

A escolha do tipo de fundação para essas construções deve considerar a viabilidade do projeto do ponto de vista técnico e financeiro. A opção por fundações rasas é frequentemente justificada pela facilidade de execução e pela otimização no uso de materiais, como concreto e aço, tornando-as uma solução interessante para diversos tipos de edificações. Entretanto, quando as cargas provenientes da edificação superam a capacidade de carga das camadas superficiais do solo, inviabilizando o uso de fundações rasas, a solução consiste na adoção de fundações profundas, como estacas. Essas fundações permitem a transferência das cargas para estrados do solo com maior resistência, localizados em profundidade.

Quando se torna necessário o uso de fundações profundas do tipo estacas, sejam elas pré-fabricadas ou moldadas *in loco*, é crucial integrar um elemento estrutural adicional. Esse elemento é responsável por assegurar que as cargas oriundas da superestrutura sejam adequadamente transferidas para as estacas. O bloco de coroamento desempenha um papel fundamental na distribuição das cargas, garantindo a estabilidade e a segurança da estrutura como um todo.

Entretanto, a interação solo-estrutura, especificamente no contato entre o bloco de coroamento e o solo, é frequentemente negligenciada nos cálculos de dimensionamento. Essa simplificação, embora comum na prática, diverge da realidade, onde o bloco exerce uma influência direta sobre a distribuição de tensões no solo e, conseqüentemente, sobre a capacidade de carga das estacas. Contudo, estudos mostram que os blocos possuem uma participação significativa na capacidade de carga das estacas (ALSHENAWY; ALREFEAI; ALSANABANI, 2016; FRANÇA; RODRIGO, 2023; GARCIA, 2015; GARCIA; ALBUQUERQUE, 2019; LONG PHUNG, 2010).

Na prática da engenharia geotécnica, as fundações estacadas são frequentemente entendidas como sistemas híbridos, resultantes da combinação de elementos de fundação rasa e profunda. Essa combinação é caracterizada pela interação entre os componentes como radiers, blocos ou sapatas e estacas individuais ou grupos de estacas (AZEVEDO, 2021). Por outro lado, o projeto convencional de fundações considera o grupo de estacas interligado pelo bloco de coroamento, sem levar em conta a influência do contato entre o bloco e o solo na capacidade de carga total da fundação, considerando apenas a capacidade das estacas. Essa simplificação pressupõe que o bloco não interage com o solo, ou seja, que não há transferência direta de cargas do bloco para o terreno, mesmo quando este apresenta capacidade de suporte.

Neste estudo, considera-se como fundação estacada aquela em que o elemento estrutural superficial, seja um radier, uma sapata ou um bloco de coroamento, estabelece contato direto com o solo, contribuindo para a distribuição de cargas e para a rigidez do sistema. Assim, o termo "grupo de estacas" será utilizado exclusivamente para designar sistemas em que o elemento superficial não interage diretamente com o solo, atuando apenas como elemento de ligação entre as estacas e a superestrutura.

As fundações estacadas podem ser classificadas com base na presença ou ausência de contato do elemento superficial com o solo. A Figura 1 exemplifica as principais diferenças entre os sistemas: a) estaca isolada, b) grupo de estacas e c) fundação estacada.

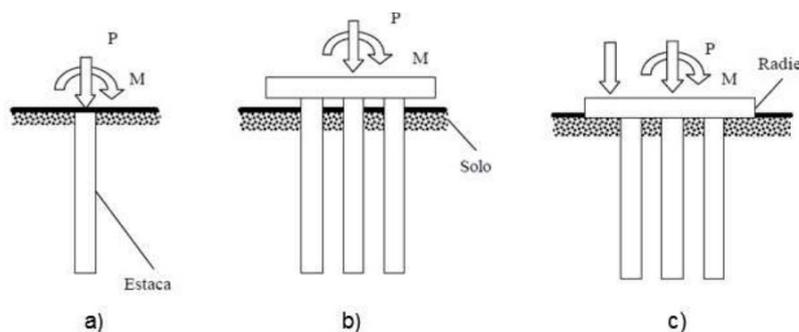
Katzenbach e Choudhury (2013) propõem uma distinção entre fundações estacadas e grupos de estacas. Para quantificar essa diferença, os autores introduzem o coeficiente α_{pr} , que estabelece uma relação entre valores característicos do sistema para um determinado recalque, s . Essa relação é expressa pelas Equação 1 e Equação 2.

$$\alpha_{pr} = \frac{\sum_{j=1}^m R_{pile,k,j}(s)}{R_{tot,k}(s)} \quad \text{Equação 1}$$

$$\alpha_s = \frac{S_{pr}}{S_r} \quad \text{Equação 2}$$

Os valores do coeficiente α_{pr} variam entre 0 e 1, refletindo a contribuição relativa do elemento de fundação superficial (bloco de coroamento) e do grupo de estacas na resposta da fundação. Quando $\alpha_{pr} = 1$, a contribuição do bloco de coroamento é nula, indicando que a resistência da fundação é fornecida exclusivamente pelas estacas. Por outro lado, quando $\alpha_{pr} = 0$, quando tem-se apenas o elemento de fundação superficial isolado.

Figura 1 - Sistema de fundações: a) estaca isolada, b) grupo de estacas, c) fundação estaqueada.



Fonte: Bezerra (2003).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se mostrado uma ferramenta poderosa para simular o comportamento de sistemas de fundação, proporcionando uma representação mais precisa e abrangente dos fenômenos complexos envolvidos, além de modelar de forma detalhada a não linearidade do solo, a heterogeneidade do material e a interação entre os diversos componentes da fundação, como estacas, solo e radier, resultando em análises mais realistas e confiáveis (BEZERRA, 2003a). Consoante a Garcia (2015), a utilização de modelo numérico tridimensional tornou-se prática comum nos trabalhos sobre o comportamento de fundações estaqueadas, uma vez que, a discretização da malha de elementos finitos nas três direções (x , y e z) permite obter valores de tensão e recalque mais precisos.

A literatura científica apresenta uma gama crescente de estudos sobre análise numérica do solo, com diversos trabalhos se debruçando sobre solos de diferentes regiões.

Dentre esses, destacam-se aqueles que, assim como o presente estudo, investigam a realidade de um solo tropical com características colapsíveis, permitindo uma comparação aprofundada dos resultados obtidos e um melhor entendimento da dinâmica dos solos locais ao longo do tempo (DOS SANTOS OLIVEIRA; GARCIA, 2023; GARCIA *et al.*, 2024; LOPES; GARCIA, 2024; OLIVEIRA; JUSTINO; GARCIA, 2022).

Neste trabalho analisa-se o comportamento de um bloco de coroamento sobre duas estacas de 20 metros de comprimento e 0,5 metro de diâmetro, executado em um empreendimento de alto padrão localizado na região sul de Uberlândia (MG). O objetivo é avaliar a influência da interação solo-estrutura, com ênfase na influência do contato bloco-solo, no comportamento da fundação estaqueada. Para tanto, foram realizadas simulações numéricas tridimensionais em elementos finitos por meio do *software* RS3 da Rocscience. A partir dos resultados destas análises foram obtidas as curvas carga-recalque para cada uma das fundações analisadas. Em seguida, realizou-se um estudo comparativo entre os resultados obtidos nas simulações numéricas, considerando o contato bloco-solo, e o projeto convencional na qual não leva em consideração a contribuição desse contato.

A otimização do projeto, por meio da consideração do contato bloco-solo e da aplicação de análises numéricas avançadas, permite alcançar diversos benefícios. Entre eles, destaca-se a redução significativa dos custos de produção. Além disso, essa abordagem contribui para a minimização dos impactos ambientais, uma vez que possibilita a otimização do dimensionamento das estruturas e a redução do consumo de recursos naturais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

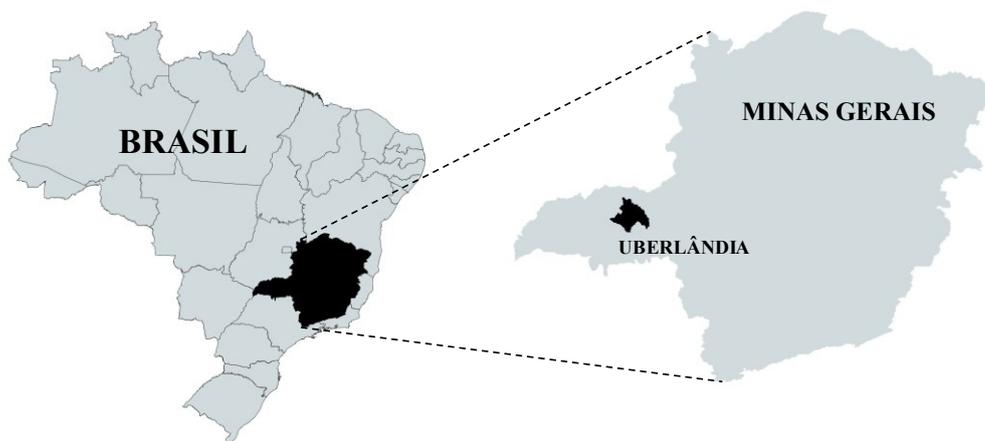
Este trabalho tem como objetivo principal investigar o comportamento de um bloco de coroamento sobre duas estacas de 20 metros de comprimento e 0,5 metro de diâmetro, executado em um empreendimento de alto padrão localizado na região sul de Uberlândia-MG (Figura 2). Assim como, a partir dos resultados, discutir sobre a possibilidade de otimização do projeto convencional.

2.1 Localização

A fundação em questão foi executada na porção sul do município de Uberlândia (MG), uma região caracterizada por rochas pertencentes ao Grupo São Bento, da Bacia

do Paraná, mais especificamente à Formação Serra Geral, conforme mapeamento geológico realizado pelo Projeto Triângulo Mineiro em 2017. A presença de solos com características colapsíveis nessa área representa um desafio adicional para a execução de fundações, exigindo análises geotécnicas mais detalhadas e o emprego de soluções de fundação adequadas para mitigar os riscos associados à ocorrência desse tipo de solo.

Figura 2 - Localização da região de estudo



Fonte: Autores (2024).

2.2 Parâmetros geotécnicos

Com base nos resultados das sondagens de simples reconhecimento com ensaio SPT (*Standard Penetration Test*), também conhecidas como sondagem à percussão, foi possível identificar as camadas que formam o perfil estratigráfico do subsolo local e os valores do índice de resistência à penetração (N_{SPT}). Assim como, foram determinados os tipos de solo presente no local, suas respectivas profundidades de ocorrência e a posição do nível d'água.

Por se tratar de uma análise preliminar, os parâmetros de resistência ao cisalhamento (c , ϕ) e de deformabilidade (E , ν) do solo foram estimados por meio de correlações semiempíricas, a partir dos resultados do índice de resistência à penetração (N_{SPT}). Como é de conhecimento geral, para fins de projeto executivo esses parâmetros do solo devem ser obtidos por meio de ensaios específicos, como por exemplo, cisalhamento direto ou triaxial.

Para tanto, foram utilizadas as equações propostas por Teixeira (1996) e Kulhawy (1990), respectivamente. Essas correlações, amplamente utilizadas na prática geotécnica,

relacionam o N_{SPT} com os parâmetros de resistência, ou seja, o ângulo de atrito interno (ϕ') (Equação 3) e a coesão efetiva (c') (Equação 4)

$$\phi' = 15^\circ + \sqrt{20 \cdot N_{SPT}} \quad \text{Equação 3}$$

$$\frac{c_u}{Pa} = 0,06 \times N_{SPT(60)} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$$Pa = 101,325 \text{ kPa};$$

$$N_{SPT(60)} = N_{SPT(72)} \cdot 1,2$$

Tabela 1 - Peso específicos de solos

Tipo de Solo	N_{SPT}	Peso específico natural (γ) (kN/m ³)
Argila arenosa pouco siltosa	0 - 2	15
	3 - 5	17
	6 - 10	18
	11 - 19	19
	≥ 20	20
Areia média e fina muito argilosa	0 - 4	17
	5 - 8	18
	9 - 18	19
	19 - 41	20

Fonte: Joppert (2007).

A determinação do módulo de Young, um parâmetro fundamental para a caracterização do comportamento elástico dos solos, foi realizada com base nas proposições de Teixeira e Godoy (1996), expresso na Equação 5. Essa equação estabelece uma relação entre o módulo de Young e o índice de resistência à penetração N_{SPT} permitindo estimar esse parâmetro a partir dos resultados dos ensaios de sondagem. Além disso, o coeficiente de Poisson, outro parâmetro elástico de fundamental importância, foi definido seguindo as recomendações de Albuquerque e Garcia (2020). A escolha desses autores se justifica pela relevância de seus trabalhos na área de geotecnia e pela adequação das propostas apresentadas às características dos solos investigados.

$$E_s = \alpha \cdot q_c = \alpha \cdot K \cdot N_{SPT} \quad \text{Equação 5}$$

O modelo numérico do sistema considerou uma discretização do solo em duas camadas distintas, cada uma com 15 metros de espessura. A definição dessa estratigrafia

foi embasada nos resultados dos ensaios N_{SPT} realizados no local. Nos primeiros 15 metros de profundidade, predominam solos argilo-areanosos, caracterizados por um valor médio de N_{SPT} de 8 golpes. Abaixo dessa camada, encontra-se uma areia-argilosa, apresentando um N_{SPT} médio de 18 golpes. Dessa forma, a Tabela 3 sintetiza os parâmetros geotécnicos adotados nas análises numéricas, incluindo o peso específico dos solos, o ângulo de atrito interno (ϕ'), coeficiente de Poisson e a coesão efetiva (c'). É importante ressaltar que os valores apresentados na tabela representam valores médios para cada camada de solo, considerando a heterogeneidade natural dos materiais.

Tabela 2 - Coeficiente de Poisson

Tipo de Solo	Coeficiente de Poisson
Argila não saturada	0,1 - 0,3
Argila saturada (não drenada)	0,5
Argila saturada (drenada)	0,2 - 0,4
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,3 - 0,4
Areia fofa	0,1 - 0,3
Silte	0,3 - 0,5

Fonte: Albuquerque e Garcia (2020).

Tabela 3 - Parâmetros do solo adotados nas simulações

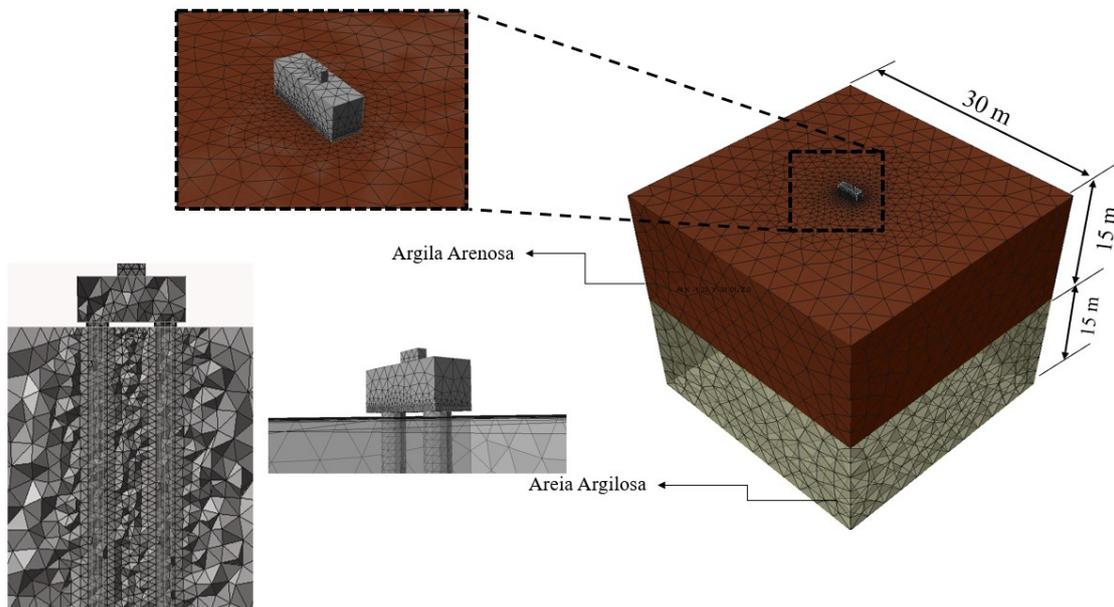
Material	Camada [m]	$N_{SPT,méd}$ [golpes/30cm]	γ_{nat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	ϕ [°]	c' [kPa]	ν [-]	E [kPa]
Argila Arenosa	0 - 15	8	18	19	27,6	13	0,3	16.800
Areia Argilosa	15 - 30	18	19	20	34,0	35	0,4	29.700

Fonte: Autores (2024).

3 ANÁLISE NUMÉRICA

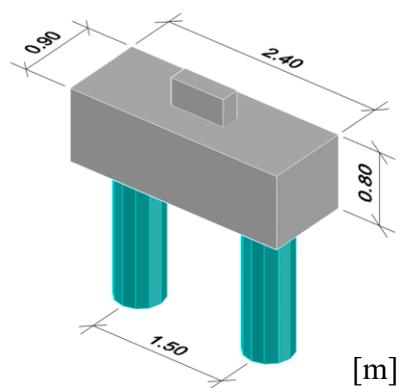
A análise numérica permitiu avaliar a distribuição de carga entre os elementos e determinar a curva de transferência de carga ao longo do comprimento das estacas. Além disso, foi possível quantificar os recalques da fundação e analisar o comportamento mecânico do bloco de coroamento, incluindo as tensões no topo das estacas, conforme modelo apresentado nas Figura 3 e Figura 4.

Figura 3 - Modelo tridimensional do grupo de estacas



Fonte: Autores (2024).

Figura 4 - Geometria da fundação analisada



Fonte: Autores (2024).

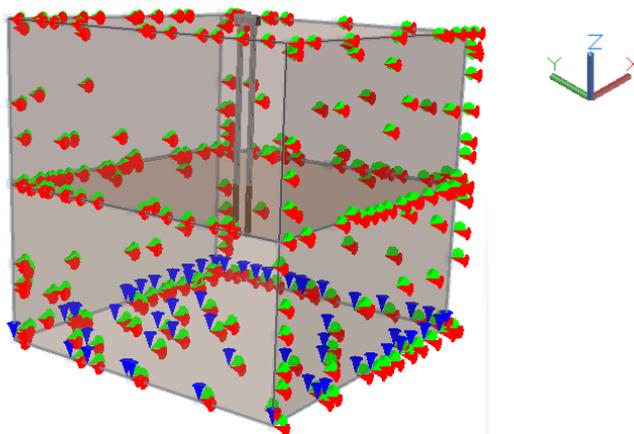
Para tanto, o *software* Rocscience RS3 foi empregado na elaboração de modelos tridimensionais da fundação, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) para a resolução dos problemas geotécnicos envolvidos. O RS3, *software* especializado em análise de estruturas geotécnicas, compõe-se de três módulos interligados: *Modeler*, *Compute* e *Interpret*.

Neste trabalho, foram utilizados elementos finitos tetraédricos com quatro nós para gerar a malha graduada, o que resultou em um número significativo de elementos

variando entre 185.000 e 200.000 para o grupo de estadas e para a fundação estaqueada, respectivamente.

Foram aplicadas restrições de deslocamento nas direções x , y e z à base do modelo, e nas direções x e y às faces laterais (Figura 5). A análise dos resultados mostrou que os deslocamentos nas regiões restritas foram desprezíveis, confirmando a eficácia das condições de contorno impostas.

Figura 5 - Restrições de deslocamentos aplicadas



Fonte: Autores (2024).

O critério de Mohr-Coulomb foi adotado como critério de ruptura do solo, considerando-o como um material plástico. Em contrapartida, o concreto armado foi modelado como um material elástico linear, obedecendo à Lei de Hooke. A análise numérica foi conduzida por meio do módulo *compute* do RS3, com um limite de 1.000 iterações e uma tolerância de 0,001 para a convergência absoluta de força e energia. O carregamento foi aplicado em 10 estágios, com incrementos de 10% em cada etapa. Os materiais foram submetidos ao seu peso próprio.

A relação entre as tensões vertical e horizontal no solo foi estabelecida de acordo com a proposta de Jacky (1948) para determinar o coeficiente de empuxo repouso. Essa abordagem pode ser adotada, uma vez que o problema se trata de uma fundação, logo, tem-se tensões iguais em todas as direções.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise numérica das tensões e recalques foi realizada utilizando o módulo *Interpret* do *software* RS3. A captura dos dados foi realizada com auxílio da ferramenta

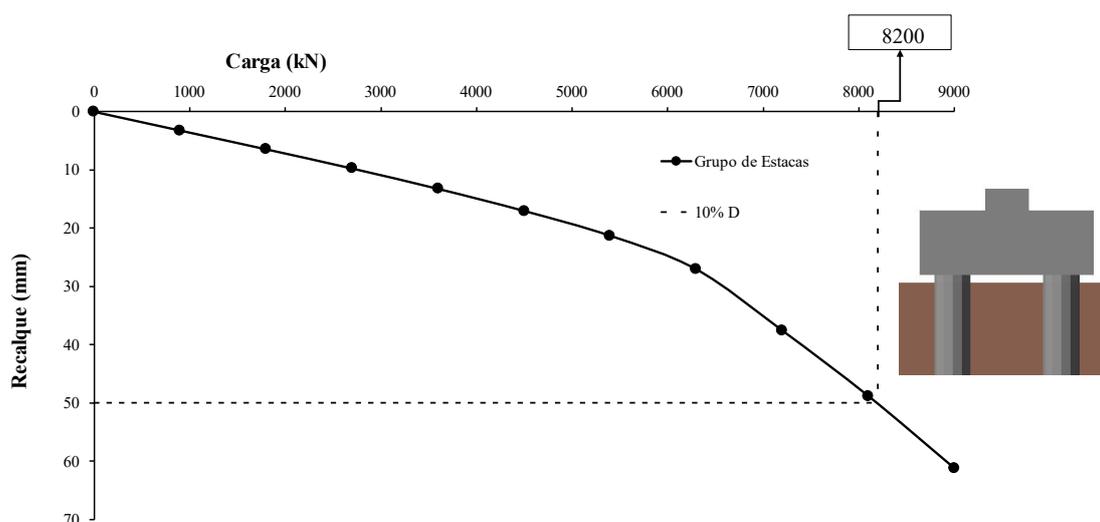
query, posicionada no topo e na ponta das estacas. O posicionamento das *query* visa efetuar medições em pontos comuns em uma análise experimental de fundação na qual essas medições são realizadas no topo e a ponta da estaca por meio de barras de aço instrumentadas com *strain gages*. O objetivo principal foi avaliar o comportamento de um grupo de estacas (desconsiderada o contato bloco-solo), e uma fundação estaqueada (considerada o contato bloco-solo), com ênfase na interação solo-estrutura na interface entre o bloco de fundação e o solo.

O grupo de estacas foi analisado sob duas abordagens: projeto convencional, em que toda a carga aplicada é transferida exclusivamente para as estacas; e outra realista, na qual o bloco de fundação se apoia sobre o solo e contribui para a capacidade de carga total do sistema, mobilizando tensões no contato solo-estrutura.

4.1 Curva carga vs recalque

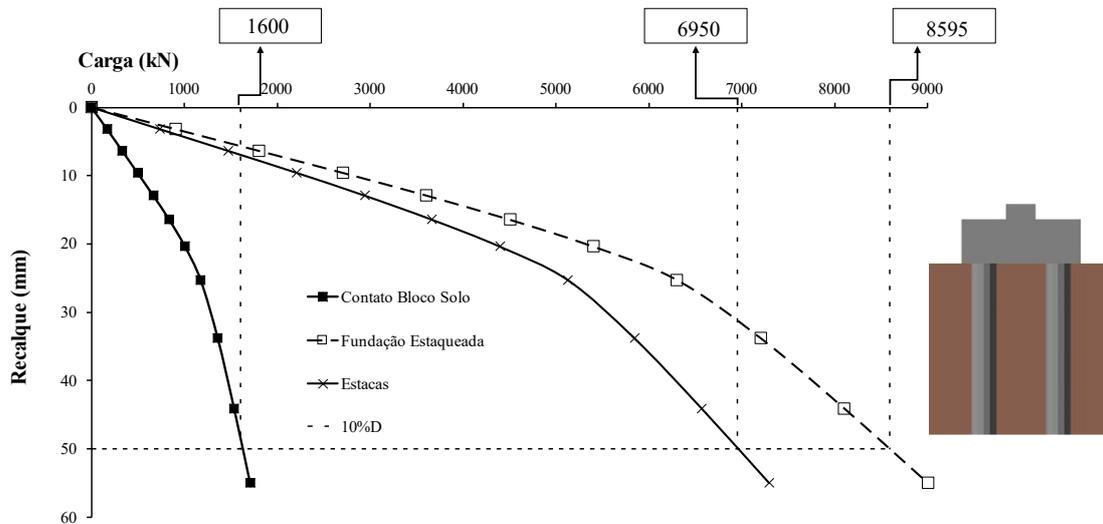
Para todas as configurações analisadas (fundação estaqueada com contato bloco-solo, grupo de estacas e elemento superficial isolado), foram geradas curvas carga vs recalque, conforme ilustrado nas Figura 6, 7 e 8, respectivamente. A carga de ruptura foi definida de acordo com o critério estabelecido no Eurocode, que convencionou a carga de ruptura para um deslocamento correspondente a 10% do diâmetro da estaca, desta forma, as fundações foram submetidas a carregamentos progressivos até que o recalque ultrapassasse 50 mm.

Figura 6 - Curva carga vs recalque - grupo de estacas



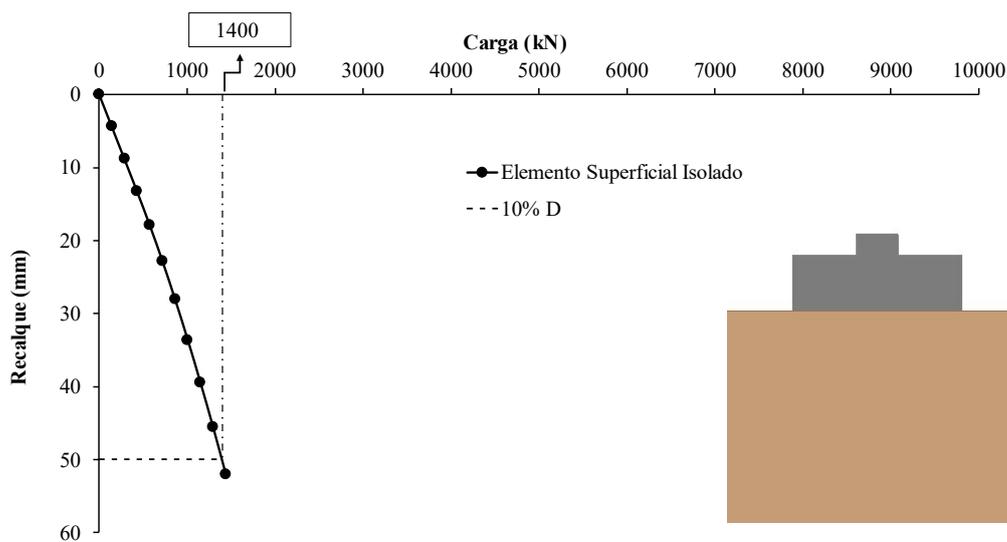
Fonte: Autores (2024).

Figura 7 - Curva carga vs recalque - fundação estaqueada



Fonte: Autores (2024).

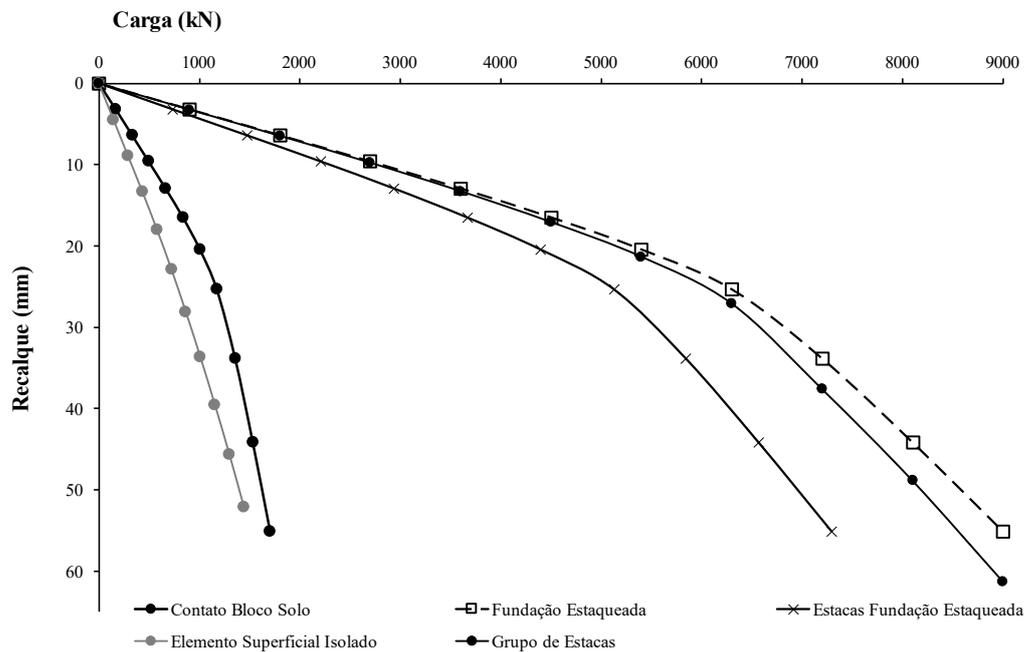
Figura 8 - Curva carga vs recalque - elemento superficial isolado



Fonte: Autores (2024).

Com base nas curvas carga vs recalque obtidas, determinou-se a carga última correspondente a um recalque de 50 mm. Utilizando um fator de segurança igual a 2, calculou-se a carga admissível para cada tipo de fundação. O recalque correspondente a carga admissível foi então obtida na curva carga vs recalque (Tabela 4). A compilação de todas as curvas carga vs recalque está apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Resumo das curvas carga vs recalque



Fonte: Autores (2024).

Tabela 4 - Resultado de carga admissível, recalque e rigidez

Fundações	Q_{ADM} [kN]	S_c [mm]	K [kN/mm]
Grupo de estacas	4100,0	15,2	270
Fundação estaqueada	4297,5	16,1	267
Estacas da fundação estaqueada	3475,0	16,9	206
Elemento superficial isolado	700,0	22,4	31

Legenda: Q_{ADM} - Carga admissível; S_c - Recalque correspondente a carga última; K - Rigidez

Fonte: Autores (2024).

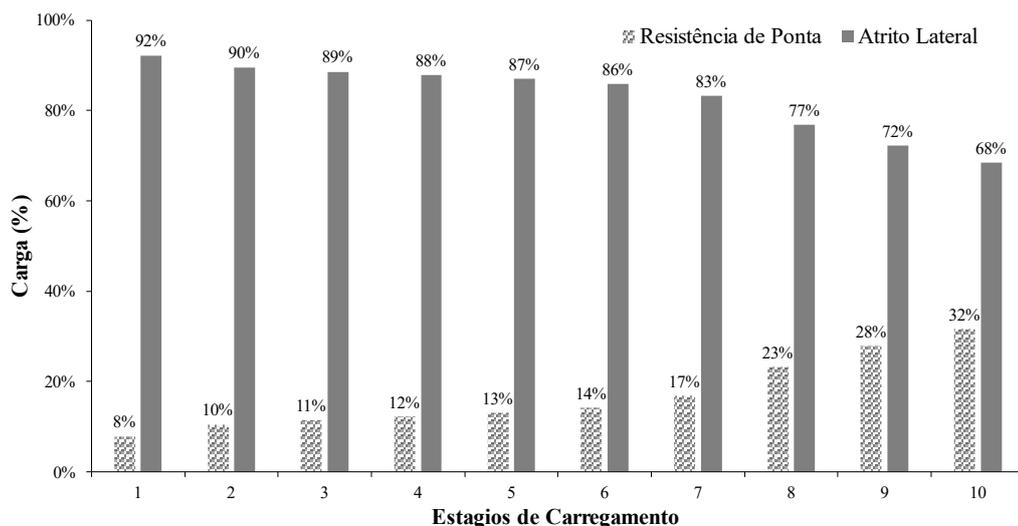
A análise dos resultados apresentados na

Tabela 4 demonstra que a fundação composta por um grupo de estacas apresentou o menor valor de recalque quando submetida à carga admissível, considerando um fator de segurança igual a 2. Essa performance superior pode ser explicada à luz dos estudos de (GARCIA *et al.*, 2024), os quais destacam que, na ausência de pressão de contato entre o bloco de coroamento e o solo, a compressibilidade do solo sob o bloco é significativamente reduzida. Como resultado, a deformabilidade do sistema diminui, resultando em menores recalques.

É importante destacar que a simplificação do modelo, ao desconsiderar o contato entre o bloco e o solo, pode subestimar os recalques. Os resultados obtidos nesta análise corroboram essa observação, evidenciando que a consideração do contato bloco-solo é essencial para uma avaliação mais precisa do comportamento da fundação.

A Figura 10 apresenta a distribuição de cargas no grupo de estacas, ilustrando a contribuição de cada componente para a capacidade de carga total. Observa-se que a resistência de ponta das estacas contribuiu com uma média de 17% para a carga suportada, indicando que a maior parte da carga foi transferida para o solo através do atrito lateral ao longo do fuste das estacas.

Figura 10 - Distribuição de carga no grupo de estacas

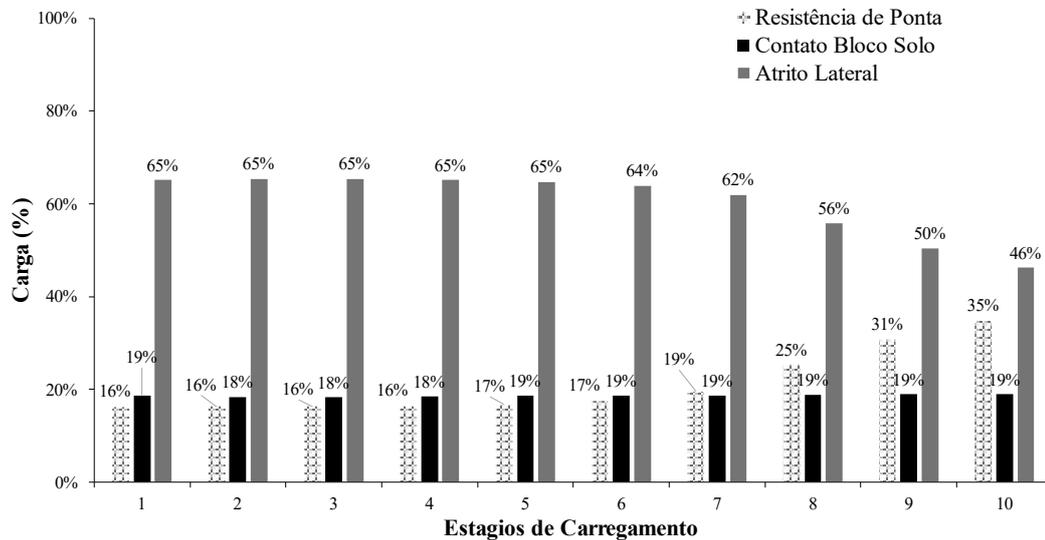


Fonte: Autores (2024).

A Figura 11 apresenta a distribuição de cargas na fundação estacada, evidenciando a evolução da participação de cada componente ao longo dos estágios de carregamento. Nos estágios iniciais, o atrito lateral nas estacas é predominante, absorvendo cerca de 65% da carga aplicada. O contato bloco-solo contribui em média com 19%. À medida que a carga aumenta, a participação do atrito lateral diminui gradualmente, enquanto a resistência de ponta se torna mais significativa, mantendo-se a contribuição do contato bloco-solo.

No estágio final, as estacas ainda suportam 81% da carga total, sendo 35% pela resistência de ponta e 46% por atrito lateral, enquanto o contato bloco-solo absorve 19% da carga.

Figura 11 - Distribuição de carga na fundação estacada



Fonte: Autores (2024).

4.2 Transferência axial de carga

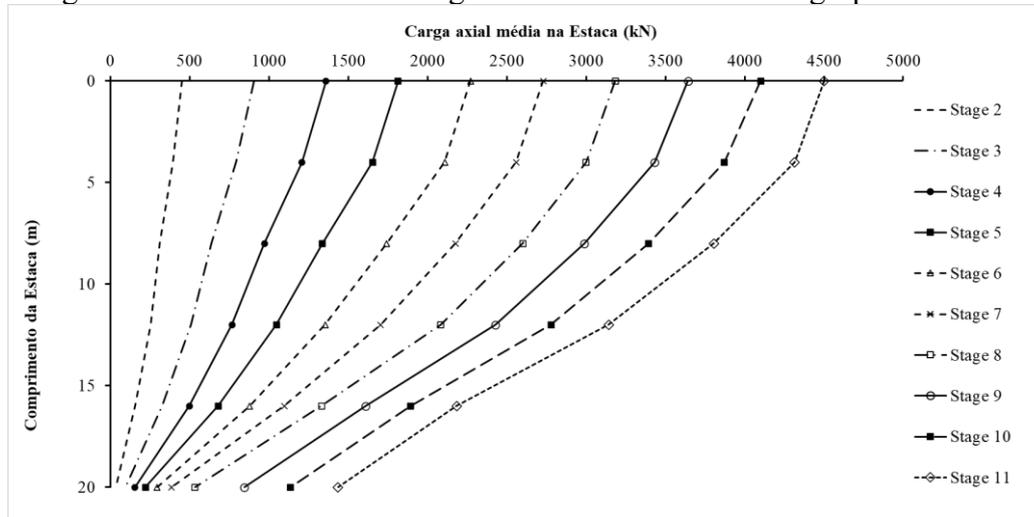
A Figura 12 ilustra a evolução da transferência de carga axial ao longo do fuste das estacas no grupo, ao longo dos diferentes estágios de carregamento. Observa-se um incremento progressivo do atrito lateral entre o fuste da estaca e o solo, desde o primeiro até o último estágio de carregamento. Concomitantemente, verifica-se um aumento gradual da participação da resistência de ponta na mobilização da capacidade de carga total.

No estágio final de carregamento, a resistência de ponta contribui com aproximadamente 32% da carga aplicada, evidenciando a importância tanto do atrito lateral quanto da resistência de ponta na mobilização da capacidade de carga total das estacas.

A Figura 13 apresenta a distribuição média da carga axial ao longo do fuste das estacas da fundação estacada, em diferentes estágios de carregamento. Observa-se um incremento gradual na contribuição da resistência de ponta das estacas na mobilização da capacidade de carga total. Além disso, a contribuição do contato entre o bloco de

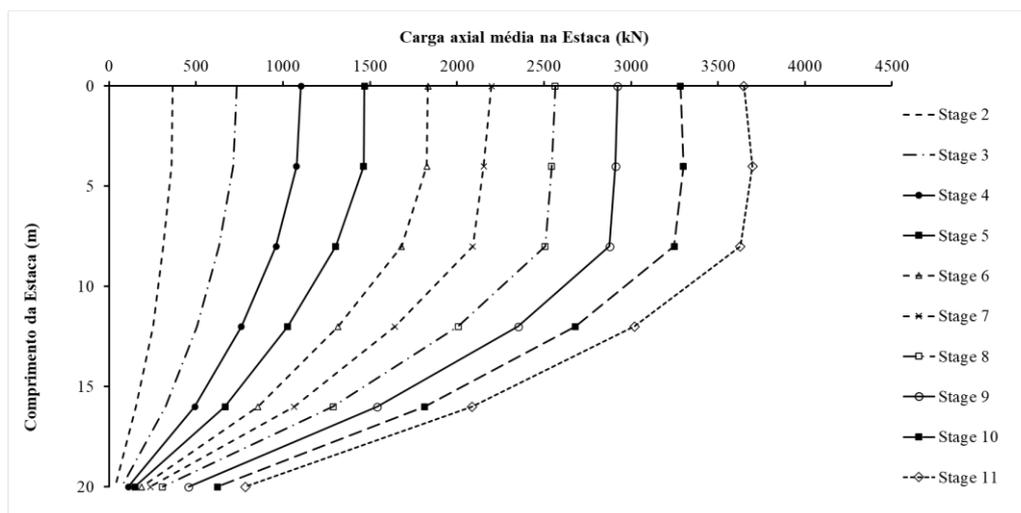
coroamento e o solo é significativa, atingindo 1704 kN no último estágio de carregamento.

Figura 12 - Transferência de carga axial média na estaca do grupo de estacas



O contato bloco-solo desempenha um papel importante na capacidade de carga total de fundações, podendo contribuir com mais de 36% dessa capacidade (GARCIA; ALBUQUERQUE, 2019). No entanto, a relevância desse contato varia de acordo com o comprimento da estaca, sendo maior em estacas mais curtas do que em estacas mais longas (ABDEL-AZIM; ABDEL-RAHMAN; EL-MOSSALLAMY, 2020). Esses resultados destacam a importância tanto da resistência de ponta das estacas quanto da interação solo-estrutura na mobilização da capacidade total de carga da fundação.

Figura 13 - Transferência de carga axial média na estaca da fundação estaqueada



4.3 Comparativo entre projeto convencional e a situação real da fundação

É evidente que o grupo de estacas, na qual o bloco não possui contato direto com o solo subjacente, apresenta o menor recalque sob a carga admissível, quando comparada à fundação estacada que considera esse contato. Essa diferença mostra que a estimativa de recalques em projetos de fundações pode ser significativamente afetada pela consideração ou não da pressão de contato entre o bloco de coroamento e o solo. Portanto, projetar as fundações sem levar em consideração essa interação evidenciada na prática, pode levar a resultados subestimados e, conseqüentemente, a um dimensionamento inadequado da fundação.

Em relação ao compartilhamento de carga, em projetos de fundações, considera-se a premissa do grupo de estacas, que não há contato entre o bloco e o solo, de modo que toda a carga proveniente da superestrutura seja transmitida exclusivamente para as estacas. Entretanto, conforme os resultados obtidos neste trabalho, observa-se que o contato entre o bloco e o solo desempenha um papel significativo absorvendo 19% da carga aplicada nos últimos estágios de carregamento, o que resulta em uma redução considerável da carga transferida para as estacas, especialmente na participação do atrito lateral. Por outro lado, houve um aumento significativo da participação da resistência de ponta o que uma vez não executada de forma adequada por trazer risco a fundação.

Em suma, a forma como se projeta fundações precisa ser alterada a situação do grupo de estacas não é algo encontrado na prática das fundações, o contato entre bloco de fundação e o solo exerce uma influência substancial sobre o comportamento da fundação, induzindo a formação de um bulbo de tensões e, conseqüentemente, aumentando os recalques. Esses fenômenos, frequentemente negligenciados em projetos convencionais, podem comprometer a segurança e a durabilidade da edificação. A capacidade de carga do sistema também é significativamente afetada por essa interação, e a desconsideração dessa influência pode levar a um dimensionamento superconservador das fundações, resultando em um aumento injustificado nos custos de construção.

5 CONCLUSÃO

Em síntese, os resultados do trabalho evidenciaram a relevância da consideração do contato entre o bloco e o solo na capacidade de carga das fundações analisadas. O estudo demonstrou que o contato entre elemento superficial e o solo contribuiu com cerca de

19% da capacidade de carga total da fundação, reduzindo a carga que chega até as estacas apresentando uma redução significativa no atrito lateral, um aumento na participação da resistência de ponta e absorção de carga por parte do bloco.

A consideração do contato bloco solo levou a um aumento no recalque da fundação, o que leva a questionar sobre a utilização dos recalques do grupo de estacas como referência para estimativas em projeto pode levar a uma subestimação do comportamento real das fundações, resultando em análises conservadoras e potencialmente inseguras, uma vez que a condição real da fundação é em contato direto com o solo formando um bulbo de tensões e intensificando as deformações formadas na região de contato.

Os resultados indicaram que, através de análises numéricas em elementos finitos 3D é possível explorar mais os resultados, tornando possível investigar pontos e aspectos específicos, logo, é possível realizar uma otimização dos projetos de fundações, especialmente em um bloco de duas estacas utilizado frequentemente na construção de edifícios. Essa otimização dos projetos de fundações, pode gerar uma redução do comprimento e/ou diâmetro das estacas, apresentando um potencial significativo para gerar benefícios econômicos e ambientais. Essa otimização diminui a demanda por materiais como aço e, principalmente, concreto, cujo principal componente, o cimento, é responsável por aproximadamente 5% das emissões globais de gases de efeito estufa, conforme evidenciado por diversos estudos. A redução no consumo desses materiais não apenas minimiza os custos da obra, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental ao reduzir a exploração de recursos naturais e as emissões de gases do efeito estufa associadas à produção e transporte desses materiais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo suporte fornecido na obtenção das licenças dos softwares utilizados neste estudo.

REFERÊNCIAS

ABDEL-AZIM, O. A.; ABDEL-RAHMAN, K.; EL-MOSSALLAMY, Y. M. Numerical investigation of optimized piled raft foundation for high-rise building in Germany. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 5, n. 1, p. 11, 17 abr. 2020. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s41062-019-0258-4>>.

ALBERTO HENRIQUES TEIXEIRA. Análise, Projeto e Execução de Fundações. *In:*

Rio de Janeiro: ABNT: ABMS, 1996, 1996.

ALSHENAWY, A. O.; ALREFEAI, T. O.; ALSANABANI, N. M. Analysis of piled raft coefficient and load-settlement on sandy soil. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 9, n. 6, p. 475, 23 maio 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12517-016-2494-7>>.

AZEVEDO, G. F. **ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO CONTATO BLOCO-SOLO NO COMPORTAMENTO DE FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS**Uberlândia. Universidade Federal de Uberlândia, 2021.

BEZERRA, J. E. **Estudo do Comportamento de Fundações em Radier Estaqueado: Conceitos e Aplicações**. 2003a. Unb, 2003.

BEZERRA, J. E. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE FUNDAÇÕES EM RADIER ESTAQUEADO: CONCEITOS E APLICAÇÕES**. 2003b. Universidade de Brasília, 2003.

DOS SANTOS OLIVEIRA, E. A.; GARCIA, J. R. An analysis of static loading tests on short bored pile in tropical soil. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 16, n. 5, p. 299, 11 maio 2023. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s12517-023-11399-w>>.

FRANÇA, A. G.; RODRIGO, G. J. Influence of Pile Cap–Ground Contact Geometry on the Behavior of Piled Foundations. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 48, n. 10, p. 14029–14041, 5 out. 2023. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s13369-023-08091-2>>.

FRED KULHAWY, P. W. M. **Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design**. 1. ed. New York: Electric Power Research Institute, 1990. 306 p.

GARCIA, J. R. **Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP**. 2015. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2015.

GARCIA, J. R.; ALBUQUERQUE, P. J. R. de. Analysis of the contribution of the block-soil contact in piled foundations. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 16, n. 6, 2019. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-78252019000600507&tlng=en>.

GARCIA, J. R.; DE ALBUQUERQUE, P. J. R.; DOS SANTOS, P. R. C.; DE FREITAS NETO, O. Analysis of the behavior of piled foundations in unconventional soil. **Engineering Structures**, v. 319, p. 118832, nov. 2024. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029624013944>>.

LONG PHUNG. Piled raft - a cost-effective foundation method for high-rises. **ResearchGate**, 2010.

LOPES, A. F. A.; GARCIA, J. R. Experimental and numerical analysis of single piled raft unit in unconventional soil. **Geomechanics and Geoengineering**, p. 1–12, 11 set. 2024. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17486025.2024.2402060>>.

OLIVEIRA, E. A. dos S.; JUSTINO, M. O.; GARCIA, J. R. Numerical analysis of piled rafts with short bored piles. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 4, 2022. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952022000400205&tlng=en>.

ROLF KATZENACH; DEEPANKAR CHOUDHURY. Combined Pile-Raft Foundation Guideline. **Darmstadt: Institute and Laboratory of Geotechnics**, 2013.