



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



Laura Evangelista Rodrigues

INFLUÊNCIA DA EXCENTRICIDADE DAS ESTACAS E DA INTERAÇÃO BLOCO-SOLO NO COMPORTAMENTO DE FUNDAÇÃO COMPOSTO POR TREZE ESTACAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso 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

INFLUÊNCIA DA EXCENTRICIDADE DAS ESTACAS E DA INTERAÇÃO BLOCO-SOLO NO COMPORTAMENTO DE FUNDAÇÃO COMPOSTA POR TREZE ESTACAS

Laura Evangelista Rodrigues ¹
Jean Rodrigo Garcia ²

RESUMO

As excentricidades executivas em estacas de fundação são erros frequentes em obras de engenharia e estão previstas na norma brasileira de fundações. No caso de blocos com estacas desalinhadas, a norma estabelece que os esforços nas estacas devem ser verificados, permitindo, sem necessidade de correção ou esforço, um aumento de até 10% na carga axial de cálculo da estaca. Para desvios superiores, é necessária uma verificação estrutural, pois a excentricidade pode provocar redistribuições das cargas, alterando as interações entre as estacas e modificando o comportamento estrutural previsto no projeto. Com base nisso, foram realizadas análises numéricas por elementos finitos, utilizando modelagem tridimensional no software da Rocscience RS3, para investigar o impacto das excentricidades executivas de um bloco de coroamento apoiado sobre treze estacas, parte da construção de um edifício residencial em Uberlândia (MG). Os resultados das análises realizadas, mostraram que as excentricidades geraram uma redistribuição de cargas entre todas as estacas, sobrecarregando algumas e aliviando outras. Esse comportamento diferiu em todas as fases de carregamento em relação ao projeto, resultando em sobrecarga no grupo de estacas e a redução na contribuição da resistência bloco-solo. Nos estágios finais de carregamento, observou-se pouca variação na redistribuição de cargas, e várias estacas apresentaram fator de segurança abaixo do permitido por norma.

Palavras-chave: Excentricidade de estacas; Grupo de estacas; Bloco de coroamento; Análise tridimensional; Elementos finitos 3D.

ABSTRACT

Executive eccentricities in foundation piles are frequent errors in engineering works and are accounted for in the Brazilian foundation standard. In the case of blocks with misaligned piles, the standard specifies that the forces on the piles must be checked, allowing, without the need for correction or additional effort, an increase of up to 10% in the axial design load of the pile. For greater deviations, a structural verification is required, as the eccentricity may cause load redistributions, altering the interactions between the piles and modifying the structural behavior expected in the design. Based on this, numerical analyses were performed using finite elements, with three-dimensional modeling in Rocscience's RS3 software, to investigate the impact of executive eccentricities on a pile cap supported by thirteen piles, part of the construction of a residential building in Uberlândia (MG). The results of the analyses showed that the eccentricities caused a redistribution of loads among all the piles, overloading some and relieving others. This behavior differed at all loading stages compared to the design, resulting in overloading of the pile group and a reduction in the contribution of cap-soil resistance. In the final stages of loading, little variation in load redistribution was observed, and several piles showed a safety factor below the standard requirements.

Key words: Pile's Eccentricity; Pile Group; Pile cap; Three-dimensional analysis; 3D Finite Elements.

¹ Graduanda em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). E-mail: lauraevangelista41@hotmail.com

² Professor na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). E-mail: jean.garcia@ufu.br

1. INTRODUÇÃO

A fase de fundação é uma das etapas iniciais e cruciais na construção de um edifício, pois é necessário que a fundação estabeleça uma base sólida para a estrutura, transferindo ao maciço os esforços da edificação por meio dos elementos estruturais de fundação de maneira adequada sob o aspecto da capacidade de carga e recalque. Falhas no dimensionamento e na execução da infraestrutura podem gerar danos graves à superestrutura da edificação, aumentando os riscos para a segurança humana e impedindo que a construção atenda ao propósito inicial concebido durante a fase de projeto.

Há uma alta incidência de problemas estruturais em edificações devido a vícios patológicos, que têm origem principalmente nas fundações, comprometendo toda a estrutura, segurança e eficiência (Pereira Junior, *et al.* 2020). Durante todo o processo construtivo, há grandes chances de falhas de execução causadas pela falta de informação, pela carência de estudos preliminares nas áreas da construção civil por descuidos no planejamento, podendo afetar toda a estrutura da edificação (Helene, 2003).

Patologias em obras civis são recorrentes e observadas com frequência tanto na prática nacional como internacional, com casos clássicos como o da Torre de Pisa e edifícios em Santos, São Paulo, com alto grau de desaprumo, sendo extensivamente estudados e apresentados em publicações de divulgações técnicas, casos esses gerados por patologias de fundações. Essas patologias dentre tantas outras frequentemente geram atrasos e custos adicionais, diminuindo a qualidade e durabilidade da edificação.

Uma falha bastante comum nos canteiros de obras é a excentricidade executiva de estacas em fundação (Milititsky, Consoli e Schnaid, 2015). Sendo avaliado pela ABNT NBR 6122:2022, que diz que é tolerada, sem qualquer correção, uma excentricidade mínima de 10% do diâmetro do fuste da estaca. Para desvios superiores, deve ser realizada uma verificação estrutural, visto que, a excentricidade pode acarretar uma redistribuição incorreta das cargas sobre o bloco, resultando em novas interações entre as estacas e levando dúvidas sobre a confiabilidade do sistema.

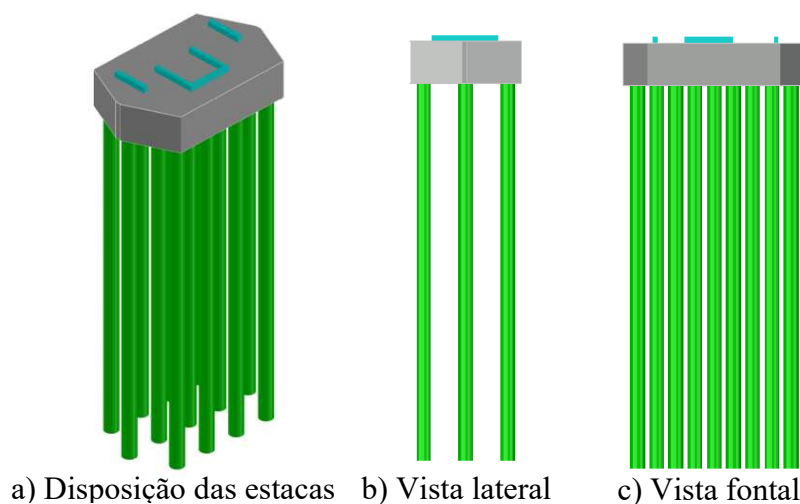
Um estudo em Cabo de Santo Agostinho, analisou as excentricidades das estacas do tipo hélice contínua em três obras locais, avaliando 1.075 dados. O estudo revelou uma média de excentricidade em torno de 6 cm para ambos os diâmetros analisados, as estacas de 400 mm de diâmetro apresentaram 15 % de excentricidade executiva, enquanto as estacas de 500 mm

apresentaram 12 % (el al, Maior e Oliveira, 2018). Esses resultados indicam a necessidade de um controle mais efetivo na execução no canteiro de obra, pois a baixa confiabilidade na execução justifica o uso de altos fatores de segurança no dimensionamento das fundações.

No dimensionamento desse tipo de fundação, muitas vezes a resistência no contato bloco solo é desconsiderada, dimensionando como se o elemento estrutural estivesse apenas apoiado sobre as estacas, como um fator de segurança. A estrutura de fundação de bloco sobre estacas envolve uma interação complexa entre os seus componentes e o solo, o que exige análises mais sofisticadas para o projeto, ponto esse que é frequentemente negligenciado. No entanto, o contato entre o bloco e o solo desempenha um papel significativo na dissipação de cargas, conforme demonstrado em estudos sobre esse tipo de fundação em solos, com destaque para: Garcia *et al.* (2024), Azevedo e Garcia (2023) e Garcia e Albuquerque (2021).

Nesse trabalho analisa-se os aspectos técnicos relacionados às fundações profundas de blocos sobre estacas, avaliando e discutindo o efeito da excentricidade executiva em um bloco de coroamento apoiado sobre treze estacas (Figura 1) em uma obra de um edifício residencial de 26º pavimentos, situado em Uberlândia (MG). O objetivo é avaliar a redistribuição de cargas no grupo de estacas e no bloco, e como esses aspectos podem influenciar o fator de segurança. Verificando também a participação do contato bloco solo frente ao efeito da excentricidade, analisando se o solo contribui na resistência nesse estudo de caso.

Figura 1- Bloco de coroamento para três pilares apoiado sobre treze estacas



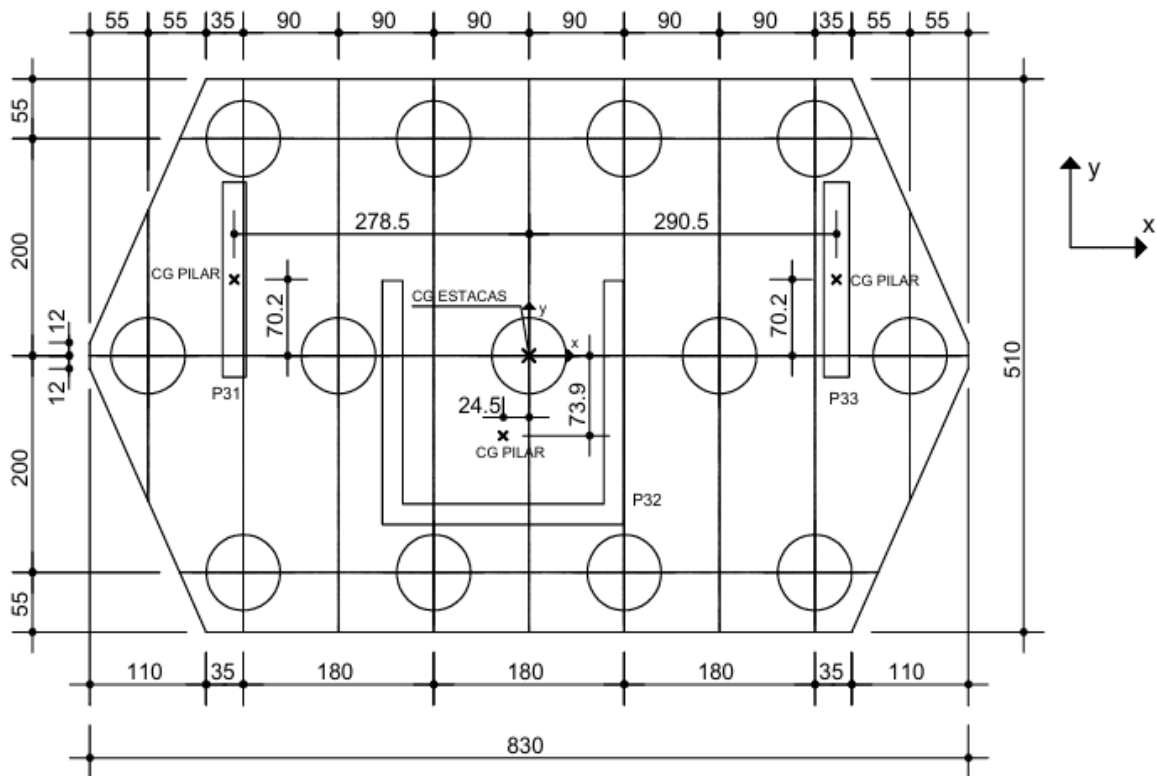
Fonte: Autores (2024).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho tem como objetivo analisar as excentricidades executivas em um bloco de coroamento apoiado sobre um grupo de treze estacas. Para isso, foram realizados cálculos analíticos e análises numéricas utilizando o método de elementos finitos, por meio de modelagem tridimensional no software RS3, com o intuito de investigar o comportamento do bloco de fundação.

O bloco em estudo possui formato prismático, com 2 metros de altura. A Figura 2 apresenta suas dimensões correspondentes em centímetros e a locação dos pilares, juntamente com seus respectivos centros de gravidade, bem como o centro de gravidade das estacas.

Figura 2 - Dimensões do Bloco de Coroamento

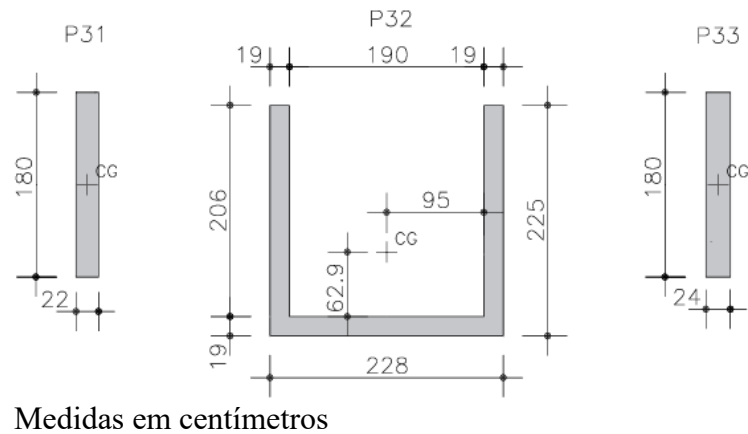


Medidas em centímetros

Fonte: Autores (2024).

O bloco suporta três pilares denominados no projeto de fundações como P31, P32 e P33. Os pilares P31 e P33 têm formato retangular, enquanto o pilar P32 possui formato em U (Figura 3).

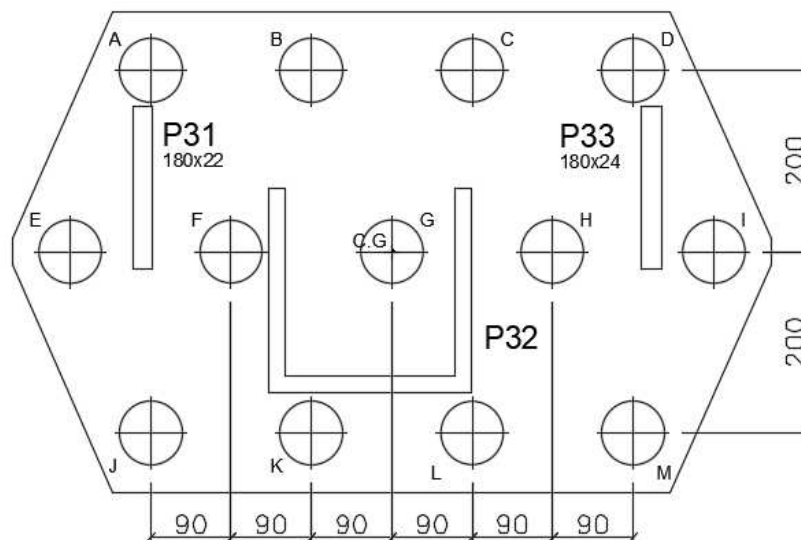
Figura 3 - Dimensões dos pilares



Fonte: Autores (2024).

O bloco é composto por treze estacas, nomeadas em sequência alfabética de A a M, dispostas em três fileiras: quatro estacas na primeira, cinco na segunda e quatro na terceira. O afastamento entre as estacas é de 180 cm horizontal e 200 cm vertical (Figura 4). Cada estaca possui 70 cm de diâmetro e uma profundidade de 18 metros. A cota de apoio do bloco está a 2,75 metros de profundidade em relação à sondagem.

Figura 4 – Disposição e identificação das estacas do bloco de fundação em estudo



Fonte: Autores (2024).

A localização dos pilares em relação ao centro de gravidade (CG) do bloco, demonstrada na Figura 2, está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Localização dos Pilares

Pilares	Localização	
	X (m)	Y (m)
P31	-2,785	0,702
P32	-0,245	-0,739
P33	2,905	0,702

Fonte: Autores (2024).

A sondagem do terreno, realizada por meio do ensaio SPT, foi analisada, e os valores obtidos possibilitaram a determinação dos parâmetros do solo com equações de correlação com N_{spt} . Estes parâmetros incluem o intercepto coesivo (c'), ângulo de atrito (ϕ') e peso específico (γ), que são essenciais para dar início à análise.

Para o peso específico, foram considerados nesse estudo os parâmetros obtidos por Oliveira e Garcia (2023) para a camada de até 7,5 metros, uma vez que se trata de um estudo situado na cidade de Uberlândia. Para as demais camadas, o peso específico foi determinado em função do número de golpes N_{SPT} e do tipo de solo, conforme a Tabela nº13 de Joppert (2007).

Para obter o ângulo de atrito, foi utilizada a fórmula desenvolvida por Teixeira (1996), por ser de autoria brasileira, o que possibilitou considerar as características específicas dos solos e das condições geotécnicas locais. A coesão foi determinada pela fórmula proposta por Kulhawy e Mayne (1990), enquanto o Módulo de Young foi calculado com a fórmula desenvolvida por Décourt (1995). Todos os dados obtidos estão representados na Tabela 2. Por fim, o coeficiente de Poisson foi determinado por meio da Tabela 7.1 contida em Albuquerque e Garcia (2020).

Tabela 2 - Parâmetros do solo

Início (m)	Fim (m)	Classificação	$N_{SPT} 72$ (golpes)	$N_{SPT} 60$ (golpes)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	ϕ (°)	α (-)	Es (MPa)	c (kN/m ²)
0,0	7,5	Areia Siltosa	5,1	6,1	16,0	-	25	3	15,30	37,21
7,5	10,5	Silte Arenoso, pouco compacto a medianamente compacto	8,7	10,4	17,0	18,0	28	3	26,10	63,47
10,5	13,7	Silte Argiloso mole a rijo	9,4	11,3	17,0	18,0	29	3	28,20	68,58
13,7	16,7	Silte Arenoso medianamente compacto	14,2	17,0	18,0	19,0	32	3	42,60	103,59
16,7	21,0	Silte Argiloso com traços de alteração de basalto, rijo a duro	30,8	37,0	19,0	19,0	40	3	92,40	224,70

Fonte: Autores (2024).

Os parâmetros do concreto armado do bloco, dos pilares e das estacas, como o ângulo de atrito e a coesão, foram pelo critério constitutivo de Mohr-Coulomb, abordagem comumente aplicada em projetos, conforme Ardiaca (2009). O Módulo de Young e o coeficiente de Poisson foram determinados de acordo com a ABNT NBR 6118:2023, e os dados para esses elementos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros dos elementos de concreto armado

Elemento	f_{ck} (MPa)	E (GPa)	ϕ (°)	c (kN/m ²)	ν
Estacas	30	30,67	45	450	0,2
Bloco	30	30,67	45	450	0,2
Pilares	30	30,67	45	450	0,2

Fonte: Autores (2024).

Nesse estudo, foi considerada a pior situação, combinando os fatores que envolvem, forças verticais, horizontais, vento e momentos apresentados no projeto. Os valores utilizados para a análise estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4- Combinação dos esforços para obtenção dos valores máximos de força normal (N_k) e Momento na direção x (M_x)

Pilares	N_k	M_x
	(kN)	(kN·m)
P31	5374	716
P32	10777	4374
P33	6178	765

Fonte: Autores (2024).

As excentricidades executivas de cada estaca, foram coletadas, durante a execução do projeto de fundações, tendo como referência o centro de gravidade (CG) de cada estaca. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 5. Verifica-se que as estacas A, D, E e J apresentam uma excentricidade medida superior ao limite permitido pela norma ABNT NBR 6122:2022.

Tabela 5 - Excentricidade das estacas medidas *in loco*

Excentricidade		
Estacas	X (cm)	Y (cm)
A	-1,4	7,2
B	3,6	0,2
C	-4,4	-3,8
D	-11,4	0,2
E	-2,9	8,7
F	-1,9	4,7
G	-0,4	-5,8
H	6,6	-3,3
I	-3,4	-1,3
J	-10,9	4,7
K	-3,9	-1,8
L	6,6	-4,3
M	3,1	3,2

Fonte: Autores (2024).

2.1 Modelagem numérica em MEF 3D

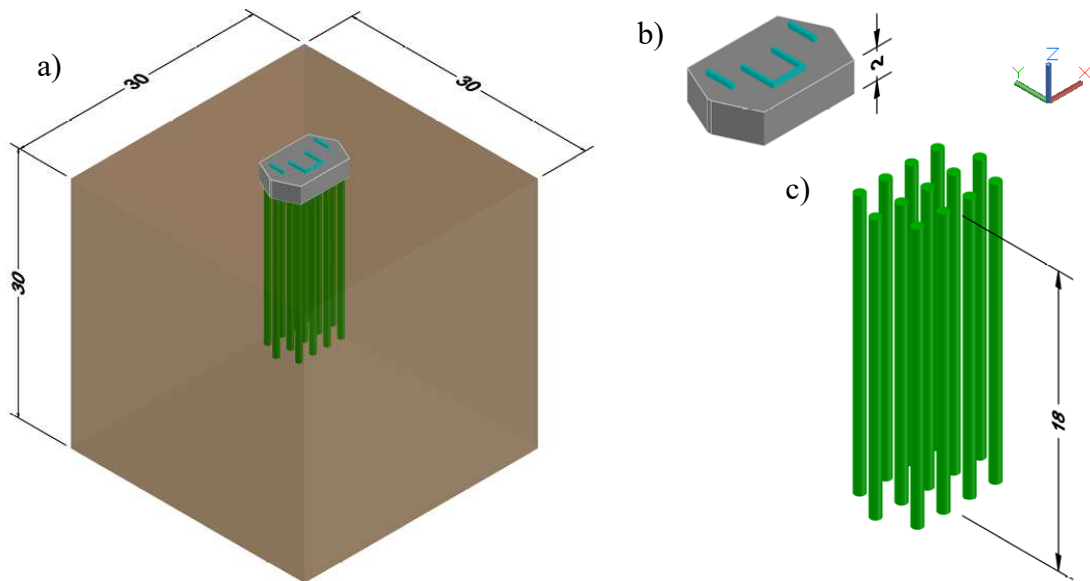
Para realizar a análise numérica em elementos finitos 3D, foi introduzido no software RS3 da Rocscience um maciço no formato de cubo com dimensões de 30 x 30 x 30 metros (Figura 5), sobre o qual o bloco está apoiado. Em seguida, foram avaliadas diferentes configurações das camadas do solo para representar o sistema, optando-se por reduzir a divisão das camadas para duas, a fim de otimizar o processo e proporcionar uma economia significativa no tempo de processamento e no esforço computacional. Assim, a primeira camada utilizada foi a areia siltosa, com profundidade de 0 a 7,5 metros e a segunda camada escolhida foi o silte argiloso mole a rijo, com profundidade de 7,5 a 30 metros (Tabela 6).

Tabela 6 - Camadas e parâmetros do solo utilizados na modelagem numérica

Início (m)	Fim (m)	Classificação	NSPT 72 (golpes)	NSPT 60 (golpes)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	ϕ (°)	α (-)	E_s (MPa)	c (kN/m ²)
0,0	7,5	Areia Siltosa	5,1	6,1	16,0	-	25	3	15,30	37,21
7,5	30,0	Silte Argiloso mole a rijo	9,4	11,3	17,0	18,0	29	3	28,20	68,58

Fonte: Autores (2024).

Figura 5 – a) Bloco de coroamento sobre 13 estacas apoiado no solo b) Bloco de coroamento c) Estacas



Medidas em metros

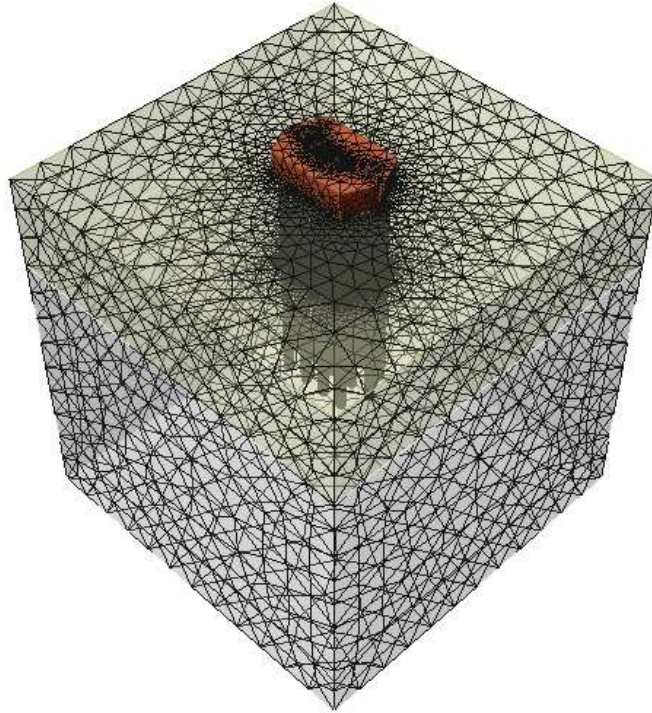
Fonte: Autores (2024).

Além disso, o carregamento dos pilares foi dividido em 11 estágios, fracionados de forma crescente, iniciando em 0 % de carga, ou seja, sem o carregamento nos pilares, considerando apenas com o peso próprio dos materiais. Em seguida, aplicou-se o carregamento de 10 % em 10 % para verificar o comportamento dos elementos nos diferentes estágios.

Durante o lançamento, os momentos presentes na combinação dos esforços (Tabela 4), que foram considerados nos cálculos analíticos, ainda não estão sendo identificados, uma vez que a versão atual do programa não permite lançar momentos resultantes da estrutura, apenas considera os momentos gerados das cargas dos pilares durante o processamento dos resultados.

A malha utilizada para a modelagem consistiu em elementos tetraédricos de quatro nós (Figura 6), e o coeficiente de empuxo em repouso (k_0) calculado foi de 0,5. As cargas axiais, representadas por σ_1 (tensão efetiva principal de compressão), foram medidas em cada estaca a uma profundidade de 0,2 metros em relação ao apoio do bloco, para avaliar a distribuição e transferência de carga. Além disso, as cargas axiais σ_1 também foram medidas a uma profundidade de 17,8 metros de cada estaca, com o objetivo de verificar a resistência de ponta do grupo de estacas.

Figura 6 - Malha de elementos tetraédricos de quatro nós.



Fonte: Autores (2024).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises foram conduzidas para os cenários conforme concebido no projeto, denominado grupo sem excentricidade (GSE) e para o cenário executado em obra, denominado grupo com excentricidade (GCE). O objetivo foi comparar os resultados, testando a distribuição dos esforços sobre as estacas pelo método analítico, frequentemente utilizado em análise de projeto, que considera o bloco estando apoiado somente nas estacas. Além disso, foi utilizado o software RS3 para avaliar a redistribuição, considerando que o bloco está apoiado não apenas nas estacas, como também no solo. Algumas verificações também foram realizadas para analisar o dimensionamento do elemento da fundação.

3.1 Método Analítico

Verificou-se a capacidade de carga admissível em uma estaca para analisar a quantidade de estacas necessárias frente a pior situação de carregamento no projeto. A verificação foi realizada por três métodos, sendo eles: Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996). Os valores obtidos foram 15, 13 e 14 estacas respectivamente, considerando resistência de ponta em ambas as análises. Desconsiderando a resistência de ponta os valores passam a ser 40, 15 e 24 estacas, respectivamente, segundo os mesmos autores.

Analisou-se também a eficiência do grupo de estacas pela fórmula das Filas e Colunas chegando a uma eficiência de 0,74. Assim, foi recalculado a quantidade de estacas por meio da Equação 1 utilizando os resultados da capacidade de carga admissível obtido pelos mesmos três métodos já citados. Considerando a resistência de ponta, obteve-se 22 estacas para resistência de Aoki-Velloso, e 18 estacas para o método de Décourt-Quaresma, assim como, para o método de Teixeira.

$$n_{estacas} = \frac{P_{1,d} + P_{2,d}}{R_{adm}} \times \frac{1}{\epsilon} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: $n_{estacas}$: número necessário de estacas no bloco; P_d : carga não majorada + peso do bloco (ou 5% de P); R_{adm} : Resistência admissível da estaca; ϵ : eficiência.

Devido ao efeito de grupo em blocos de coroamento com mais de uma estaca, alguns autores adotam como espaçamento mínimo entre eixos das estacas na ordem de 3 vezes o diâmetro para estacas moldadas *in loco*. Sendo assim, cada estaca possui 0,7 m de diâmetro, o que levaria a um espaçamento mínimo de 2,1 m. No entanto, esse espaçamento não é respeitado no distanciamento na direção x, que é de 1,8 m e nem na direção y, que é de 2 m.

Analisou-se também o centro de carga do bloco, levando em consideração as cargas verticais apresentadas na Tabela 4, a locação dos pilares e tomando como eixo de referência o centro de gravidade do bloco adotando o sentido apresentado, conforme a Figura 2. Dessa forma, foi determinado que o centro de carga do bloco estaria a 1,523 centímetros na direção x e 0,651 centímetros na direção y do CG do bloco. Por questões de estudo e pela dimensão do elemento estudado será avaliado como valores desprezíveis, podendo ser considerável o centro de carga igual ao centro de gravidade do bloco.

Com isso, ao transferir as cargas dos pilares para o centro de gravidade do bloco, calcularam-se os momentos gerados por esse deslocamento das cargas e foi possível obter os resultados conforme demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Momentos gerados

Momentos gerados		
Pilares	M_x (kN·m)	M_y (kN·m)
P31	3773	-14967
P32	-3971	-1317
P33	3773	15611

Fonte: Autores (2024).

Com a combinação dos momentos gerados (Tabela 7) e momentos da combinação dos esforços (Tabela 4) os valores finais dos esforços estão apresentados na Tabela 8.

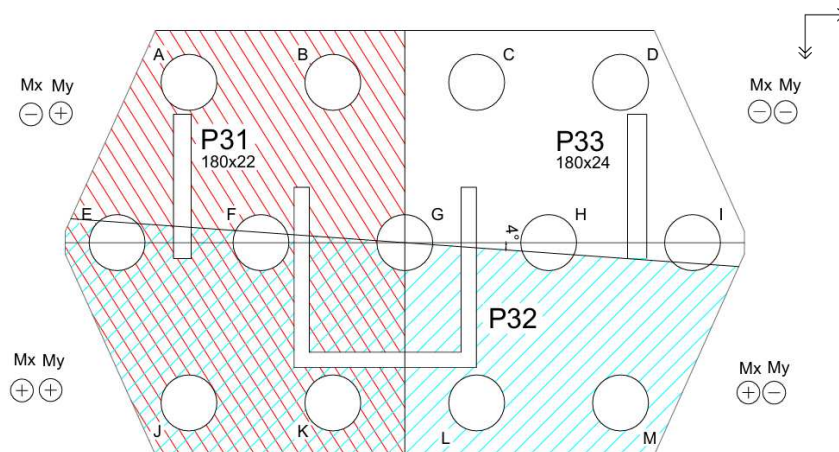
Tabela 8 - Esforços Finais

Pilares	Nk(kN)	Mx(kN·m)	My(kN·m)
P31	5374	4488	-14967
P32	10777	402	-1317
P33	6178	4537	15611
Σ	22330	9428	-672

Fonte: Autores (2024).

Por meio da Tabela 8, determinou-se o ângulo resultante dos momentos M_x e M_y e foi possível traçar a linha neutra de atuação do binário devido ao momento no bloco (Figura 7).

Figura 7 - Linha de compressão-tração



Fonte: Autores (2024).

Com base na Equação 2, foi determinada a força normal distribuída a cada estaca no GSE, de acordo com a locação das estacas. Os resultados estão dispostos na Tabela 9.

$$N_i = \frac{V}{\Sigma estacas} \mp M_x \frac{y_i}{\Sigma y_i^2} \mp M_y \frac{x_i}{\Sigma x_i^2} \quad \text{Equação 2}$$

Em que: N_i é a força normal na estaca analisada; V é a carga vertical; M_x é o momento na direção x que atua sobre o bloco; M_y é o momento na direção y que atua sobre o bloco; x_i é a distância na direção x da estaca em relação ao centro de carga do bloco; y_i é a distância na direção y da estaca em relação ao centro de carga do bloco; Σx_i^2 é a soma das distâncias ao

quadrado na direção x de todas as estacas contidas no bloco; $\sum y_i^2$ é a soma das distâncias ao quadrado na direção y de todas as estacas contidas no bloco;

Tabela 9 - Força normal distribuída nas estacas do GSE

ESTACAS	Localção				Força Normal (kN)
	X (m)	Y (m)	X ² (m ²)	Y ² (m ²)	
A	-2,70	2,00	7,29	4,00	1156
B	-0,90	2,00	0,81	4,00	1138
C	0,90	2,00	0,81	4,00	1119
D	2,70	2,00	7,29	4,00	1100
E	-3,60	0,00	12,96	0,00	1755
F	-1,80	0,00	3,24	0,00	1736
G	0,00	0,00	0,00	0,00	1718
H	1,80	0,00	3,24	0,00	1699
I	3,60	0,00	12,96	0,00	1680
J	-2,70	-2,00	7,29	4,00	2335
K	-0,90	-2,00	0,81	4,00	2316
L	0,90	-2,00	0,81	4,00	2298
M	2,70	-2,00	7,29	4,00	2279
Σ			64,8	32	22330

Fonte: Autores (2024).

Realizou-se o mesmo processo com as estacas GCE, conforme demonstra a Tabela 10.

Tabela 10 – Força normal distribuída nas estacas do GCE

ESTACAS	Localção				Força Normal (kN)
	X (m)	Y (m)	X ² (m ²)	Y ² (m ²)	
A	-2,714	2,072	7,366	4,293	1137
B	-0,864	2,002	0,746	4,008	1139
C	0,856	1,962	0,733	3,849	1133
D	2,586	2,002	6,687	4,008	1103
E	-3,629	0,087	13,170	0,008	1729
F	-1,819	0,047	3,309	0,002	1723
G	-0,004	-0,058	0,000	0,003	1735
H	1,866	-0,033	3,482	0,001	1708
I	3,566	-0,013	12,716	0,000	1685
J	-2,809	-1,953	7,890	3,814	2320
K	-0,939	-2,018	0,882	4,072	2320
L	0,966	-2,043	0,933	4,174	2308
M	2,731	-1,968	7,458	3,873	2268
Σ			65,373	32,106	22307

Fonte: Autores (2024).

Dessa maneira, obteve-se a distribuição das cargas no GSE e GCE, conforme demonstrado na Tabela 11, apresentada em ordem decrescente, da estaca mais sobrecarregada à estaca menos carregada.

Tabela 11 – Força normal distribuída nas estacas de forma decrescente.

Posição	GSE		GCE		Redistribuição	
	Estacas	Força Normal (kN)	Estacas	Força Normal (kN)	Estacas	Diferença (kN)
1°	J	2335	J	2320	J	-15
2°	K	2316	K	2320	K	4
3°	L	2298	L	2308	L	10
4°	M	2279	M	2268	M	-11
5°	E	1755	G	1735	G	17
6°	F	1736	E	1729	E	-26
7°	G	1718	F	1723	F	-14
8°	H	1699	H	1708	H	9
9°	I	1680	I	1685	I	4
10°	A	1156	B	1139	B	1
11°	B	1138	A	1137	A	-19
12°	C	1119	C	1133	C	14
13°	D	1100	D	1103	D	3
Σ		22330		22307		-23

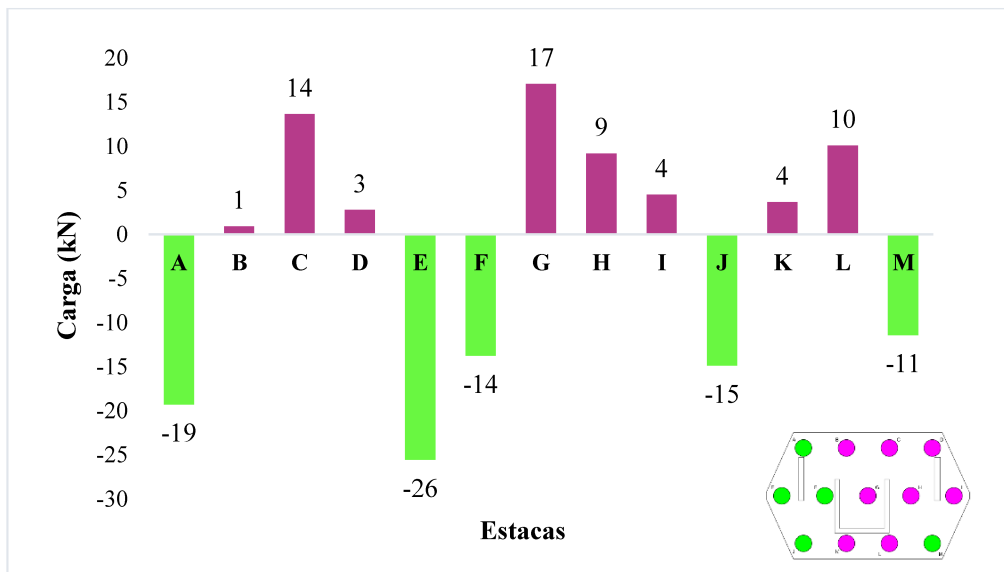
Fonte: Autores (2024).

Verificou-se que os valores calculados na distribuição GSE (Tabela 9) estavam conforme o esperado, conforme demonstrado na Figura 7. Isso se deve à magnitude do momento na direção x em relação ao momento na direção y. No qual, as estacas J, K, L e M são as mais sobrecarregadas, pois estão mais distantes do centro de carga do bloco, localizadas na área de compressão de M_x e com o maior braço de alavanca. Em contrapartida, as estacas A, B, C e D são as menos sobrecarregadas, pois estão na zona de tração de M_x . Nota-se que as estacas A e B têm cargas maiores em comparação com as C e D, uma vez que estão na zona de compressão de M_y . Por fim, as estacas E, F, G, H e I estão centralizadas ao longo do eixo x do bloco e detêm das cargas médias, uma vez que parte delas está na zona de compressão e outra parte na zona de tração de M_x . Percebe-se que as estacas E, F e G contêm maior carga que as estacas H e I por estarem na área de compressão de M_y .

Ao realizar a comparação entre a redistribuição das cargas nas estacas do GCE em relação ao GSE, observou-se que a estaca G passou da 7ª para 5ª posição em relação ao seu carregamento, apresentando uma sobrecarga de 17 kN, sendo a estaca com maior sobrecarga do grupo. Já a estaca E saiu da 5ª para 6ª posição com um alívio de 26 kN em relação ao seu carregamento previsto em projeto, sendo está a estaca com maior alívio. As estacas J, K, L, M, H, I, C e D permaneceram em suas posições, porém a estaca J e M sofreram um alívio de 15

kN e 11 kN, respectivamente. As estacas K, L, H, I, C e D, por outro lado, apresentaram sobrecargas, de 4 kN, 10 kN, 9 kN, 4 kN, 14 kN e 3 kN, na ordem mencionada. Além disso, as estacas F e A desceram uma posição, ao passo que a estaca B subiu uma posição em comparação ao carregamento em projeto (Tabela 11). A Figura 8 ilustra graficamente a redistribuição do carregamento devido à excentricidade executiva, analisada pelo método analítico, verificando uma redistribuição máxima de 1,5 % da carga média nas estacas.

Figura 8- Redistribuição do carregamento no GCE

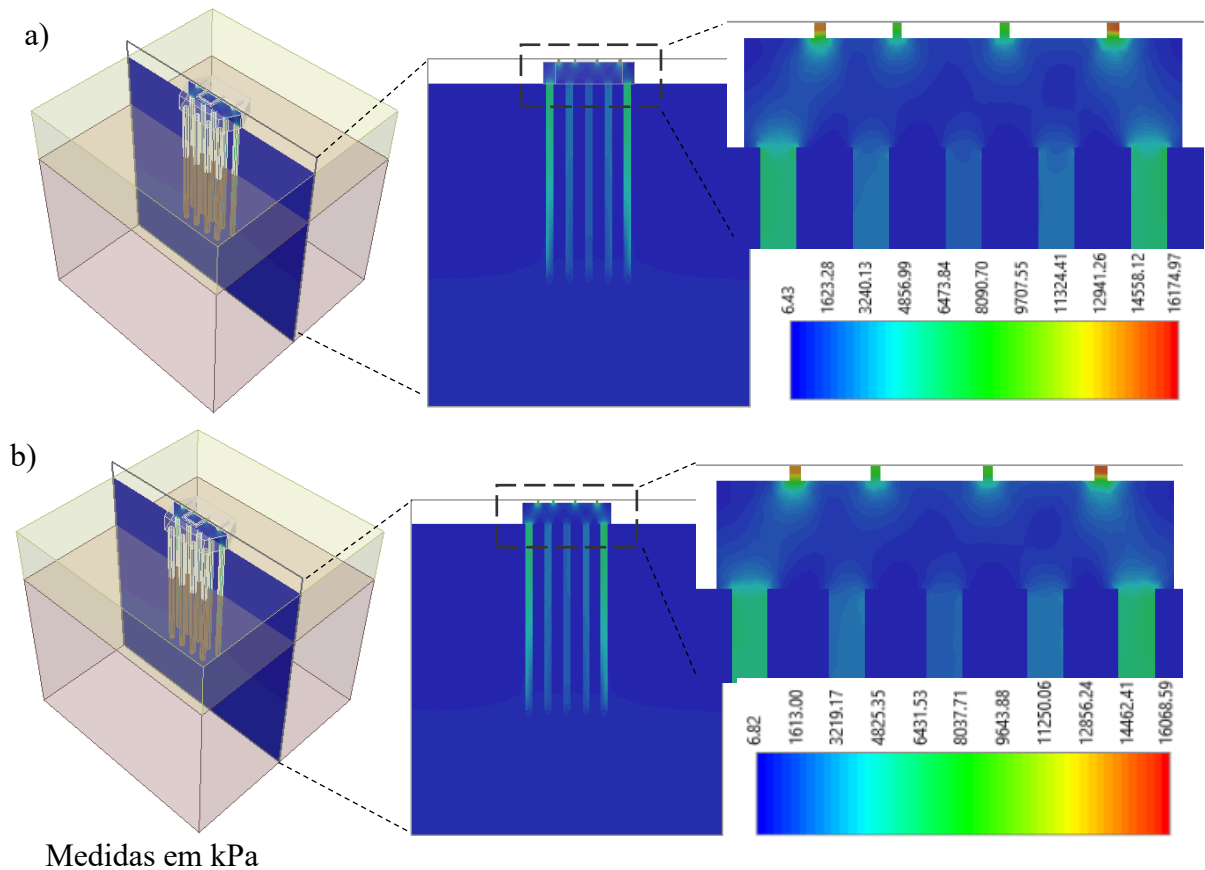


Fonte: Autores (2024).

3.2 Modelagem Tridimensional Por Meio de Análise Numéricas de Elementos Finitos

O comportamento do bloco de coroamento em relação ao carregamento ocorre de modo que as forças são transmitidas dos pilares para as estacas principalmente por meio das bielas de compressão, que apresentam suas formas e dimensões complexas. A formação das bielas pode ser observada em ambos os casos (Figura 9), ao verificar-se a distribuição das tensões efetivas σ_1 .

O comportamento do bloco GSE em relação à distribuição de sua carga nas estacas apresenta inicialmente 52 % e 48 % no contato bloco-solo, evidenciando uma significativa participação do contato bloco-solo nos estágios iniciais. Observa-se que o carregamento nas estacas aumenta progressivamente à medida que os estágios avançam (Figura 10), resultando em uma distribuição final de 87 % do carregamento nas estacas e 13 % no contato bloco-solo.

Figura 9 - Distribuição das tensões efetivas σ_1 : a) GSE b) GCE

Fonte: Autores (2024).

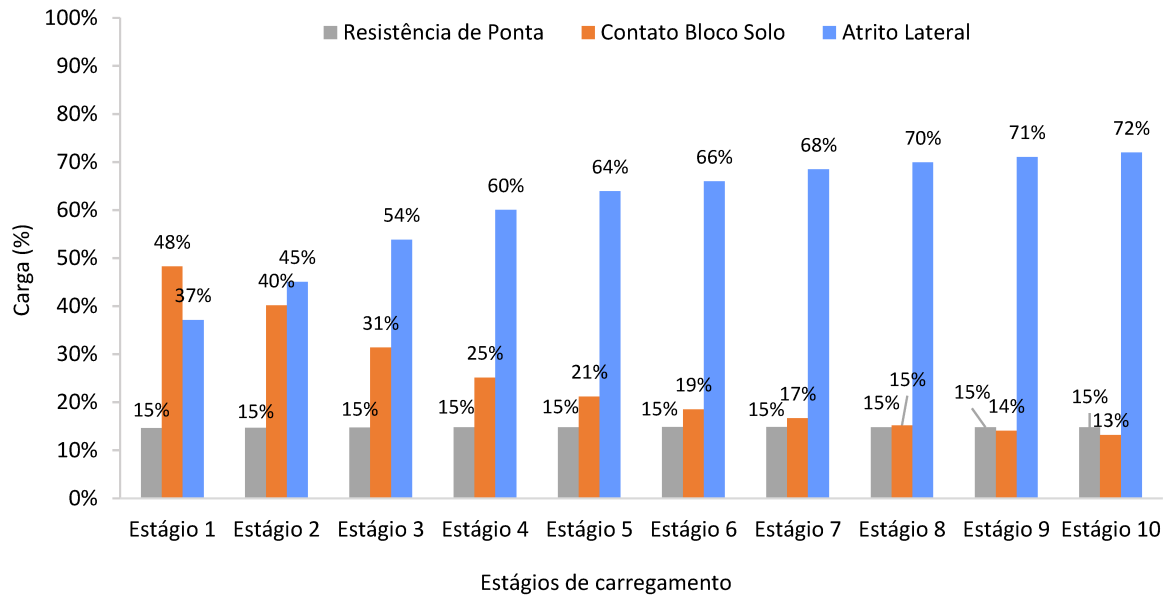
Por outro lado, o bloco GCE demonstrou um comportamento distinto nos estágios de carregamento. No início, as estacas absorveram 57 % do carregamento, enquanto 43 % foram dissipados no contato bloco-solo. À medida que os estágios progrediram, esse percentual variou, alcançando no estágio final uma distribuição em 90 % do carregamento nas estacas e 10 % no contato bloco-solo (Figura 11). Isso indica, uma maior sobrecarga nas estacas no GCE, que foi observado em todos os estágios de carregamento, apresentando variações de 4 % a 6 % dependendo do estágio de sobrecarga.

Segundo Azevedo e Garcia (2023) o contato bloco-solo pode contribuir significativamente para a capacidade de carga absorvida, em alguns casos superando até mesmo a carga absorvida pelo grupo de estacas. Outro fator relevante para essa contribuição é a geometria do bloco. No entanto, no dimensionamento de blocos de coroamento com grupo de estacas, essa contribuição é frequentemente negligenciada ou até desconsiderada.

Nos cálculos analíticos realizados nesse trabalho, o contato bloco-solo foi desprezado, uma vez que nos métodos utilizados não consideram essa interação, assumindo que o bloco esteja apoiado exclusivamente nas estacas. No entanto, na análise numérica realizada no

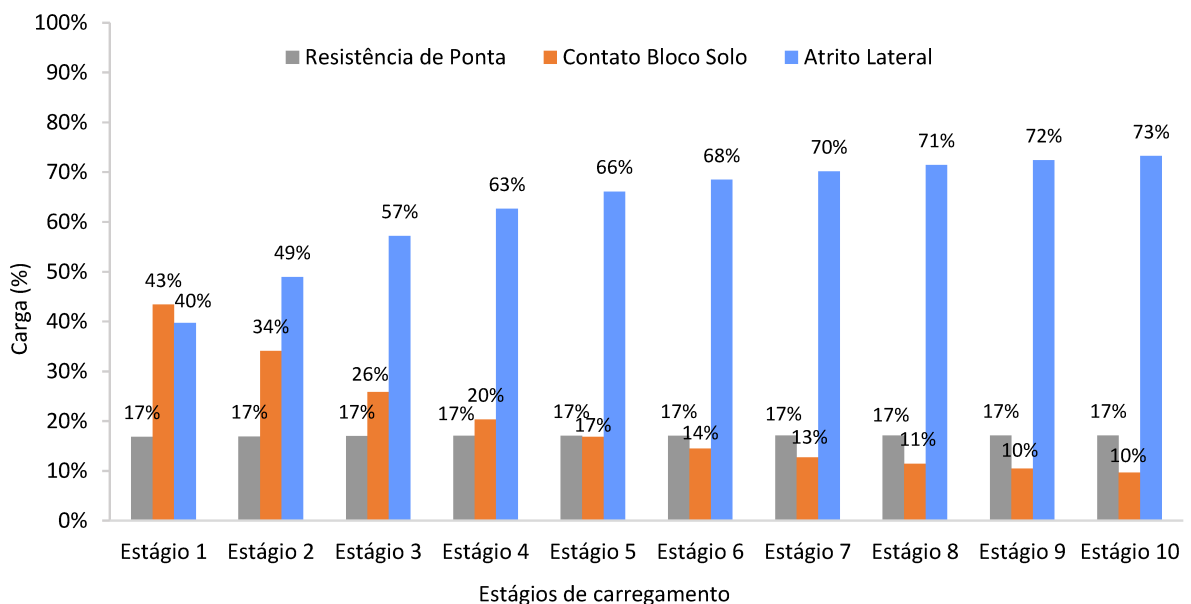
software RS3, considerou-se o bloco apoiado no solo, o que revelou que a interação bloco-solo distribui uma porcentagem significativa de carga para o solo, principalmente nos primeiros estágios de carregamento. No final, observou-se que 13 % da carga foi dissipada no solo no GSE e 10 % no GCE, o que destaca a importância de uma análise cuidadosa dessa interação para otimização do sistema de fundação.

Figura 10 - Distribuição do Carregamento no GSE



Fonte: Autores (2024).

Figura 11 - Distribuição do Carregamento no GCE

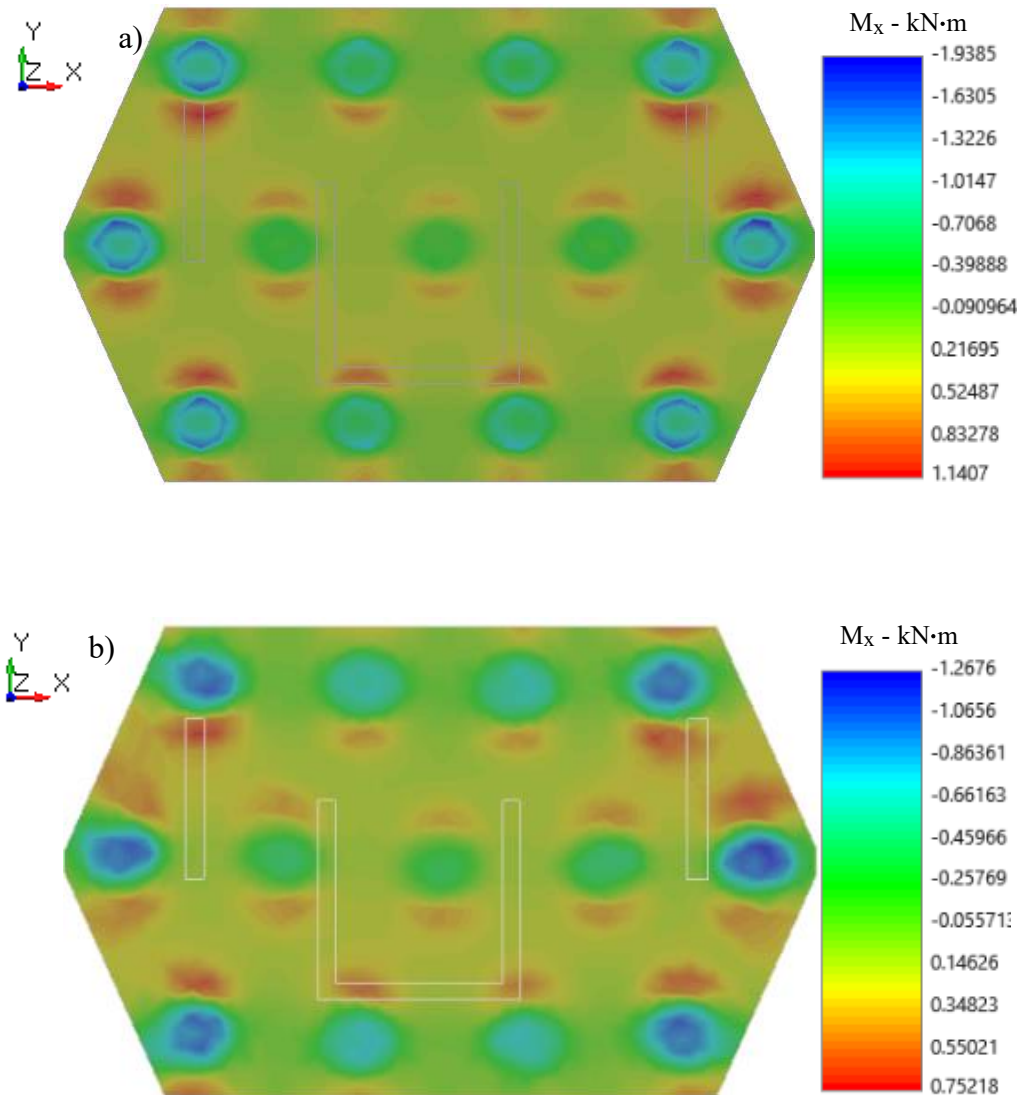


Fonte: Autores (2024).

Verificou-se que no GSE o atrito lateral aumentou de forma progressiva à medida que os estágios avançavam, atingindo 72 % do carregamento total no 10º estágio. A resistência de ponta, por sua vez, manteve-se constante em ambos os cenários, correspondendo a 15 % do carregamento. No GCE o comportamento foi semelhante, com o atrito lateral chegando a 73 % no estágio final e a resistência de ponta alcançando 17 % em todos os estágios, demonstrando uma maior participação da resistência de ponta no GCE.

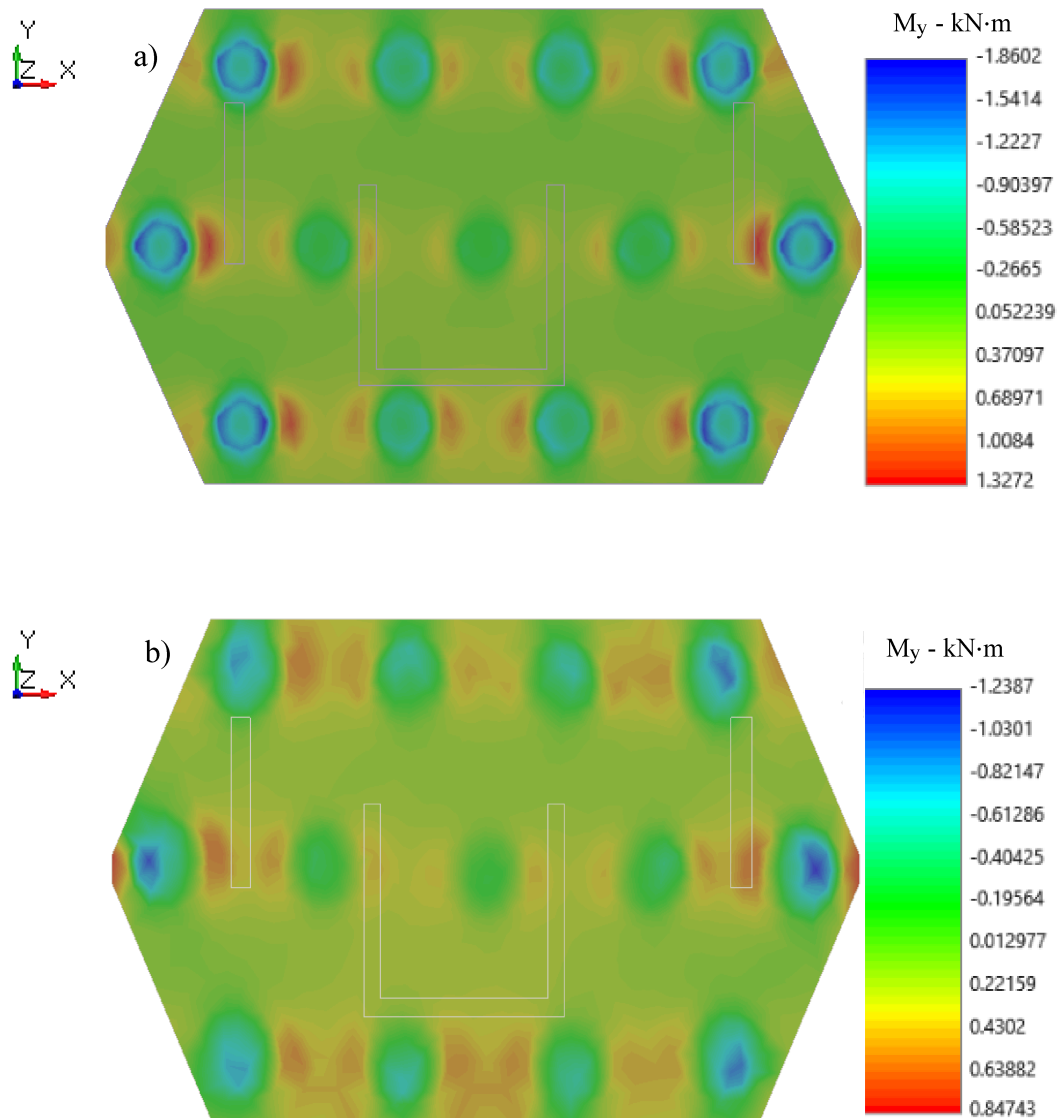
Na Figura 12, é apresentada a distribuição do momento na direção x (M_x) e, na Figura 13, a distribuição do momento na direção y (M_y) para os cenários de grupo sem excentricidade (GSE) e grupo com excentricidade (GCE).

Figura 12 - Momento na direção x: a) GSE b) GCE



Fonte: Autores (2024).

Figura 13 - Momento na direção y: a) GSE b) GCE

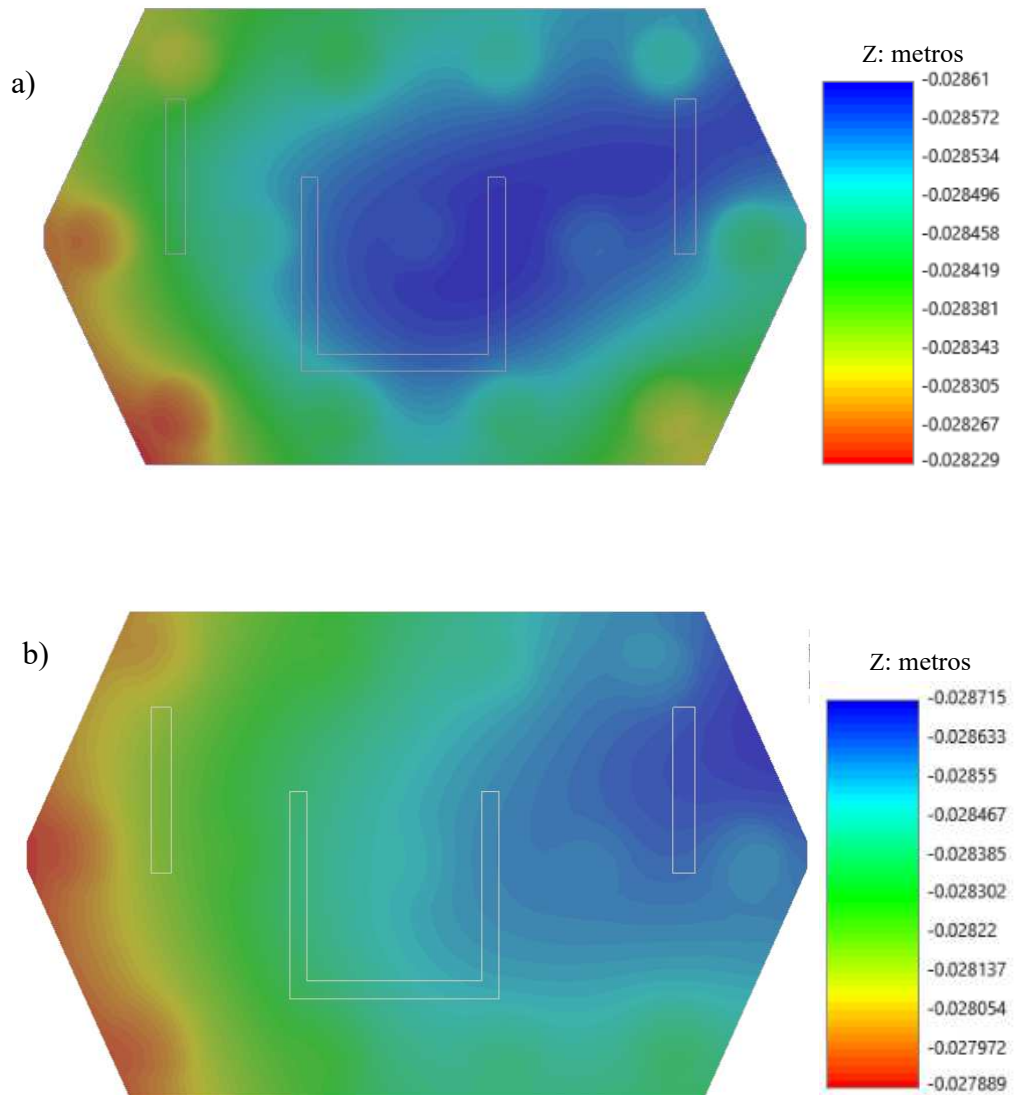


Fonte: Autores (2024).

Verificou-se pouca variação nos esforços causados pelas excentricidades. O momento máximo negativo na direção x (M_x) obtido no GSE foi de 1,94 $\text{kN}\cdot\text{m}$, enquanto no GCE de 1,28 $\text{kN}\cdot\text{m}$, e o momento máximo positivo foi de 1,14 $\text{kN}\cdot\text{m}$ no GSE e 0,75 $\text{kN}\cdot\text{m}$ no GCE. O momento máximo negativo na direção y (M_y) medido no GSE foi de 1,86 $\text{kN}\cdot\text{m}$, enquanto no GCE de 1,24 $\text{kN}\cdot\text{m}$. Já o momento máximo positivo na direção y foi de 1,33 $\text{kN}\cdot\text{m}$ no GSE e 0,85 $\text{kN}\cdot\text{m}$ no GCE.

Outra análise realizada foi o deslocamento vertical do bloco na direção z sob o carregamento ao longo dos estágios, chegando a uma média de deslocamento final de 0,028 m no contato bloco-solo, tanto no GSE quanto no GCE (Figura 14), confirmando a interação do contato bloco-solo, demonstrada nas Figura 10 e Figura 11.

Figura 14 - Deslocamento vertical na direção z do bloco: a) GSE b) GCE



Fonte: Autores (2024).

O fator de segurança (FS) das estacas dos grupos, GSE e GCE, foi verificado a partir das cargas obtidas pelos métodos analítico e numérico, com o objetivo de comparar o efeito das excentricidades no fator de segurança. Além disso, foi realizada uma comparação entre os dois métodos para avaliar o impacto do contato bloco-solo no fator de segurança. Para viabilizar essa análise, o momento proveniente da estrutura foi desconsiderado nos cálculos analíticos e recalculado a distribuição de cargas nas estacas, uma vez que, nos cálculos numéricos, esse momento não havia sido considerado, não interferindo nos resultados. A Tabela 12 apresenta a força normal em cada estaca obtida pelos métodos analítico e numérico.

A resistência última da estaca foi calculada utilizando o método semiempírico de Décourt-Quaresma (1978), resultando em 3035 kN. Com os dados da Tabela 12, foi possível

verificar o fator de segurança para ambos os casos, comparando os dois métodos de cálculo, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 12 - Força normal distribuída nas estacas

Força Normal (kN)				
ESTACAS	Sem contato		Com contato	
	GSE	GCE	GSE	GCE
A	1522	1515	2027	2083
B	1504	1504	1251	1276
C	1485	1490	1252	1264
D	1466	1468	2061	2115
E	1755	1745	1986	2000
F	1736	1731	802	836
G	1718	1724	662	706
H	1699	1702	800	868
I	1680	1682	2027	2127
J	1969	1964	1981	2073
K	1950	1952	1269	1363
L	1932	1935	1263	1385
M	1913	1909	2001	2078
Σ	22330	22322	19382	20173

Fonte: Autores (2024).

Tabela 13 - Fator de segurança das estacas

Fator de segurança global						
ESTACAS	Sem contato		Com contato		FSnumérico / FSanalítico	
	GSE	GCE	GSE	GCE	GSE	GCE
A (canto)	1,99	2,00	1,50	1,46	-33%	-38%
B (borda)	2,02	2,02	2,43	2,38	17%	15%
C (borda)	2,04	2,04	2,42	2,40	16%	15%
D (canto)	2,07	2,07	1,47	1,44	-41%	-44%
E (canto)	1,73	1,74	1,53	1,52	-13%	-15%
F (centro)	1,75	1,75	3,78	3,63	54%	52%
G (centro)	1,77	1,76	4,58	4,30	61%	59%
H (centro)	1,79	1,78	3,79	3,50	53%	49%
I (canto)	1,81	1,80	1,50	1,43	-21%	-26%
J (canto)	1,54	1,55	1,53	1,46	-1%	-6%
K (borda)	1,56	1,55	2,39	2,23	35%	30%
L (borda)	1,57	1,57	2,40	2,19	35%	28%
M (canto)	1,59	1,59	1,52	1,46	-5%	-9%

Fonte: Autores (2024).

Assim, foi possível verificar que, no método analítico, no GSE apenas as estacas B, C e D atendem aos requisitos de segurança da norma ABNT NBR 6122:2022, que estabelece que o fator de segurança global deve ser maior ou igual a 2. No GCE, apenas as estacas A, B, C e D estão em conformidade com a norma. No método numérico, tanto no GSE quanto no GCE, as estacas B, C, F, G, H, K e L cumprem os requisitos, enquanto as estacas A, D, E, I, J e M não atendem. A comparação entre os dois métodos revelou que a influência do contato bloco-solo resultou em um aumento do fator de segurança nas estacas B, C, F, G, H, K e L, variando de 15 % a 59 % no GCE e de 16 % a 61 % no GSE. Por outro lado, esse contato não favoreceu o aumento do fator de segurança nas estacas localizadas nas extremidades do bloco.

Neste estudo, verificou-se que os carregamentos das estacas nos cantos são superiores aos das estacas centrais e de borda, resultando em um fator de segurança reduzido. No GCE, a estaca central G foi o maior aumento em seu fator de segurança devido à influência do contato bloco-solo, com um aumento de 59 %, seguida das estacas centrais F e H, que tiveram aumentos de 52 % e 49 %, respectivamente. As estacas de borda B, C, K e L apresentaram aumentos de 15 %, 15 %, 30 % e 28 %, respectivamente. No GSE, a estaca G teve um aumento de 61 %, a estaca F aumentou 54 % e a H aumentou 53 %. As estacas de borda B, C, K e L mostraram aumentos de 17 %, 16 %, 35 % e 35 %, respectivamente.

Nesse sentido, constatou-se neste trabalho, que quando há presença do contato bloco-solo, as estacas centrais tendem a ficar menos carregadas, enquanto as estacas de cantos permanecem sobrecarregadas e as estacas de borda apresentam comportamento intermediário. Essa constatação vai ao encontro com estudos anteriores presentes na literatura, como por exemplo, um estudo realizado por Garcia e Albuquerque (2018) que constataram um comportamento semelhante sobre a influência do contato bloco-solo entre as estacas pertencentes a um grupo de 16 estacas. Estes autores, observaram que em um grupo de estacas coroadas por um bloco rígido, as estacas posicionadas nos cantos do bloco foram submetidas a sobrecargas em até 50 % comparada com a carga média, enquanto as estacas centrais permaneceram carregadas com cerca de 40 % dessa mesma carga. Enquanto, no estudo deste trabalho, as estacas de canto foram submetidas a sobrecarga de até 38 % no GSE e até 43 % no GCE comparada a carga média, enquanto as estacas centrais permaneceram carregadas com cerca de 51 % no GSE e 54 % no GCE da mesma carga.

4. CONCLUSÃO

Esse estudo teve como objetivo analisar o comportamento da excentricidade executiva em um bloco de coroamento, comparando-o com o bloco projetado. Verificou-se que houve uma redistribuição do carregamento nas duas análises realizadas, tanto por meio de cálculos analíticos que apresentou sobrecarga em algumas estacas e alívio em outras, quanto pela modelagem numérica que demonstrou um acréscimo de 4 % a 6 % de sobrecarga dependendo do estágio analisado. Foi constatado que o contato bloco-solo teve uma contribuição significativa para a capacidade de carga, tanto no GSE em 13 % quanto no GCE em 10 %. No entanto, as excentricidades executivas reduziram essa dissipação, resultando em uma maior parcela do carregamento sendo transferida para as estacas.

O deslocamento vertical do bloco na direção z apresentou um valor médio de 0,028 m, sendo idêntico em ambos os grupos (GCE e GSE), o que indica pouca variação devido às excentricidades. Além disso, as modelagens numéricas mostraram que a resistência de ponta no GSE foi de 15 %, enquanto no GCE foi de 17 %, indicando que o GCE suportou 2 % a mais do carregamento em comparação com GSE, o que sugere uma maior solicitação desse elemento.

A análise do fator de segurança das estacas, tanto pelo método analítico quanto pelo método numérico, revelou que, no método analítico no GSE, 10 estacas apresentaram fator de segurança abaixo de 2, enquanto no GCE, 9 estacas não atenderam ao mínimo permitido pela norma ABNT NBR 6122:2022. No método numérico, 6 estacas em ambos os grupos também ficaram aquém desse limite, destacando a importância do contato bloco-solo, que contribuiu para o aumento do fator de segurança em uma faixa de 15% a 59% no GCE e de 16% a 61% no GSE.

Apesar das excentricidades observadas serem superior ao permitido, a redistribuição do carregamento não sofreu alterações abruptas. Embora o fator de segurança não tenha sido considerado satisfatório em nenhuma das situações analisadas, o aumento observado devido à interação com o bloco-solo ressalta a relevância de sua influência. Isso indica que, mesmo diante de excentricidades executivas, o contato bloco-solo é crucial para a dissipação do carregamento, oferecendo a oportunidade de otimização nos projetos de fundações, tanto em termos técnicos quanto econômicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo suporte fornecido na obtenção das licenças do software utilizado neste estudo.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P. J. R.; GARCIA, J. R. **Engenharia de Fundações**. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- AOKI, N.; VELLOSO, D. D. A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. **V Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Buenos Aires, Argentina, 1975.
- ARDIACA, D. H. **Mohr-Coulomb parameters for modelling of concrete structures**. Plaxis Bull 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2023 Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122:2022 Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- AZEVEDO, G. F., GARCIA, J. R. **Influence of Pile Cap–Ground Contact Geometry on the Behavior of Piled Foundations**. Arabian Journal for Science and Engineering, 5 jul. 2023.
- DÉCOURT, L. **On the load-settlement behaviour of piles**. Revista Solos e Rochas, ABMS, São Paulo, Brasil, vol. 18, n. 2, ago. 1995.
- DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. **Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT**. VI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, p. 45-53, 1978.
- DELGADO, R. S., MAIOR, J. S. S. e OLIVEIRA P. E. S. **Análise Estatística de Excentricidades das Estacas do Tipo Hélice Contínua na Região do Paiva**. COBRAMSEG, Salvador, p. 1-5, ago. 2018.
- GARCIA, J. R., ALBUQUERQUE, P. J. R. **Influence of relative stiffness on the behavior of piled raft foundations** Acta Sci. Technol., 40 (1): 35209, 2018. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v40i1.35209>
- GARCIA J. R., ALBUQUERQUE, P. J. R. **Numerical analysis of the influence of block geometry on the behavior of piled foundations**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, vol. 14, maio 2021. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952021000100007>

GARCIA, J. R. *et al.* **Analysis of the behavior of piled foundations in unconventional soil.** Engineering Structures, p. 11, ago. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118832>

HELENE, P. R. L. **Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo, Red Rehabilitar, 2003.

JOPPERT JUNIOR, I. **Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução.** 1. ed, São Paulo, PINI, 2007, 221p.

KULHAWY, F. H; MAYNE, P. W. **Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design.** New York: Electric Power Research Institute, 1990.

MILITITSKY, J., CONSOLI, N. C., SCHNAID F. **Patologia das Fundações.** 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Oficina dos textos, 2015.

OLIVEIRA, E. A. S.; GARCIA, J. R. **An analysis of static loading tests on short bored pile in tropical soil.** Arabian Journal of Geosciences, 11 abr. 2023. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11399-w>

PEREIRA JUNIOR, M. C. *et al.* **Patologia em fundações: Identificação e prevenção de problemas.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 11, vol. 06, pp. 26-43, nov. de 2020.

TEIXEIRA, A.H. **Análise, Projeto e Execução de Fundações.** 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia PROJETO. Anais... Rio de Janeiro: ABNT: ABMS, 1996.