

doi <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2022id7248>
ARTIGO ORIGINAL

SUBMETIDO 15/09/2022
APROVADO 08/11/2022
PUBLICADO ON-LINE 03/12/2022
PUBLICADO 10/10/2024
EDITOR ASSOCIADO
Andre Luis Christoforo

Análise numérica de blocos sobre doze estacas: estudo de caso

RESUMO: Os elementos de fundação têm a função de transferir as ações da superestrutura para o solo. Para escolher o tipo de fundação ideal, deve-se considerar o tipo de solo, a topografia da região, condições econômicas, as ações atuantes e as fundações disponíveis na região. Blocos de coroamento ou blocos sobre estacas têm a função de transmitir as ações do pilar para as estacas e, por serem elementos que não permitem inspeção visual, é importante conhecer seu comportamento em serviço e em iminência de ruptura, para poder dimensioná-los de forma eficiente e obter o melhor desempenho. Este trabalho realizou um estudo de caso de blocos sobre 12 estacas com pilares associados, comparando essa estrutura a modelos com pilar equivalente, por meio de modelagem computacional, considerando os materiais com comportamento elástico e linear. Para isso, foram estudados 36 modelos de blocos sobre 12 estacas, variando-se parâmetros como o tipo de pilar, a altura do bloco, a presença ou não de solo e a resistência característica à compressão do concreto. Como resultados, obtiveram-se as reações nas estacas, os deslocamentos verticais no pilar, na face inferior do bloco e na ponta das estacas centrais e as tensões de compressão e tração. Além disso, pôde-se avaliar qual a porcentagem da carga nos pilares que foi transferida para o solo na interface bloco/solo.

Palavras-chave: blocos sobre estacas; fundação; interação solo-estrutura.

Numerical analysis of twelve pile caps – Case study

ABSTRACT: The foundation elements have the function of transferring the actions of the superstructure to the soil. To choose the ideal type of foundation, one must consider the type of soil, the topography of the region, economic conditions, the concerned actions and the available foundations in the locality. Pile caps have the function of transmitting the actions of the column to the piles and for being elements that do not allow visual inspection, it is important to know their behavior in service and in the imminence of rupture, in order to be able to dimension them efficiently and obtain the best performance. This paper carried out a case study of 12 pile caps with associated columns, comparing this structure with equivalent column models, through computational modeling, considering the materials with elastic and linear behavior. For this, 36 models of twelve pile caps were studied, varying parameters such as the type of column, the height of the pile cap, the

 Danielle Brandão de Souza ^[1] *

 Rodrigo Gustavo Delalibera ^[2]

[1] daniellebrandaos@outlook.com.br

[2] delalibera@ufu.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

* Autor para correspondência.



presence or absence of soil and the characteristic resistance to the compression of the concrete. As a result, there have been obtained the reactions in the piles, the vertical displacements in the column, in the inferior face of the block and in the tip of the central piles and the compressive and tractional stresses. Furthermore, it has been possible to evaluate which percentage of the load in the columns was transferred to the soil in the block/soil interface.

Keywords: foundation; pile caps; structure-soil interaction.

1 Introdução

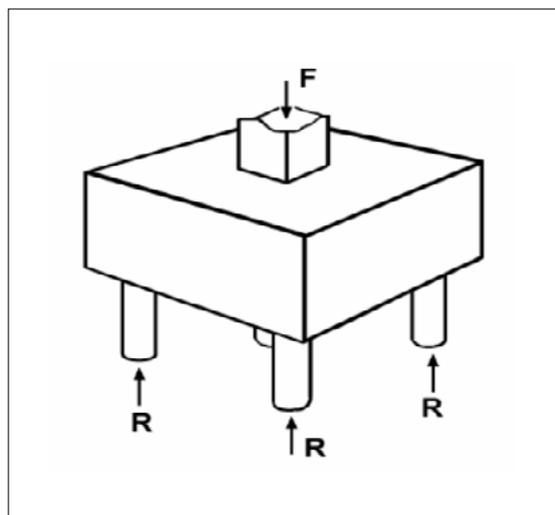
Nas edificações, existe um elemento que tem a função de transferir as ações atuantes para solo resistente, que é denominado de fundação. O tipo de fundação a ser utilizado deve ser escolhido considerando o tipo de solo, a topografia da região, condições econômicas, as ações incidentes, as fundações disponíveis na região e os aspectos dos edifícios limítrofes, como a sua proximidade, seu tipo de fundação e seu estado de conservação (Alonso, 2019).

As fundações podem ser superficiais ou profundas. As primeiras transmitem as cargas por pressões distribuídas na sua base. Já na fundação profunda, as cargas são transmitidas por sua superfície lateral, por sua base, ou por ambas. Um tipo de fundação profunda muito utilizado são as estacas. Elas são preferíveis quando as camadas superficiais do solo não são capazes de resistir às ações provenientes da superestrutura. As estacas podem ser de concreto armado, protendido, madeira ou aço (Alonso, 2019).

Nas fundações com estacas, é necessário que se utilizem elementos que possuem a função de transmitir as ações do pilar para as estacas, que são os blocos de coroamento ou blocos sobre estacas (Alonso, 2019). Por ser um elemento que não permite inspeção visual, é muito importante conhecer a fundo seu comportamento em serviço e também na iminência de ruptura, para poder dimensioná-lo de forma eficiente e se obter o melhor desempenho do elemento. A Figura 1 ilustra um bloco sobre estacas, onde F é a força aplicada no bloco e R são as reações nas estacas.

Figura 1 ►

Blocos sobre estacas.
Fonte: Delalibera (2006)

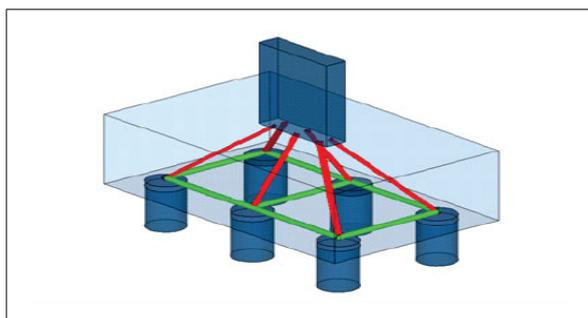


O principal método para dimensionar os blocos sobre estacas é o método de bielas e tirantes. O método de bielas e tirantes consiste na idealização de uma treliça e na representação dos campos de tensões de um elemento submetido ao Estado Limite Último (ELU). Nesse método, a armadura principal de tração nos blocos é chamada de tirante e fica situada na sua parte inferior (Fusco, 1994). Já a área de compressão é denominada biela (ou escoras) e está situada de forma inclinada nos blocos. Os nós são os elementos de ligação que unem a biela ao tirante, conforme se vê na Figura 2 – representação de um bloco em perspectiva em que as barras vermelhas ilustram as bielas e as barras verdes, os tirantes.

Figura 2 ▶

Treliça tridimensional em um bloco sobre "n" estacas.

Fonte: Oliveira, Barros e Giongo (2014)



Este trabalho tem sua importância devido ao fato de o elemento bloco sobre estacas não permitir inspeção visual, quando em serviço, e por ser um elemento relevante na estrutura da edificação. Ainda existem dúvidas a respeito do seu dimensionamento, principalmente em blocos sobre várias estacas, em função da incerteza da formação das bielas. Esse assunto se torna, portanto, interessante para ser abordado em várias pesquisas futuras, visto que existem vários fatores possíveis a serem analisados.

O trabalho teve como objetivo realizar um estudo de caso de blocos sobre estacas com pilares associados, comparando-os a modelos com pilar equivalente, por meio da análise de modelagem computacional, considerando que os materiais apresentam comportamento elástico e linear, e verificar qual porcentagem da carga do pilar é distribuída para o solo no contato da interface com o bloco, como analisado por Rasi *et al.* (2020). Optou-se inicialmente pela modelagem elástica e linear, para se ter melhor entendimento das formações das bielas e facilitar a proposição de ensaios experimentais em futuras pesquisas.

As demais seções deste trabalho contemplam um breve referencial teórico na seção 2, o método de pesquisa utilizado, indicado na seção 3, enquanto na seção 4 é apresentada a análise dos resultados e, por fim, as considerações finais na seção 5.

2 Referencial teórico

Nesta seção são expostas as principais definições sobre os blocos de coroamento e apresentadas as principais recomendações normativas quanto à aplicação de blocos sobre estacas.

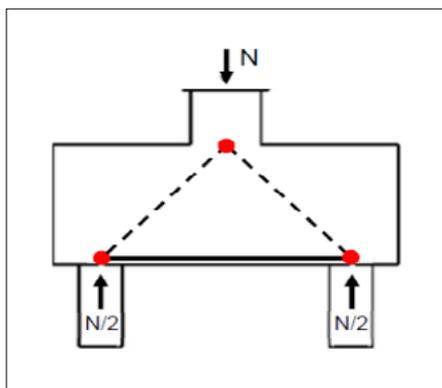
2.1 Modelo de bielas e tirantes

O modelo de bielas e tirantes é um procedimento de cálculo baseado no teorema do limite superior, que utiliza o conceito de plasticidade e consiste no dimensionamento por meio da idealização de uma treliça espacial composta pelas bielas (que representam os

campos de compressão), pelos tirantes (que representam os campos de tração) e pelos nós, que têm a finalidade de transferir as tensões (Silva; Giongo, 2000). A Figura 3 ilustra um bloco sobre estacas submetido à força concentrada N , em que as linhas tracejadas são as bielas, a linha contínua é o tirante e os nós são os pontos vermelhos.

Figura 3 ▶

Exemplo de modelo de bielas e tirantes para bloco sobre duas estacas.
Fonte: Mendonça (2017)



Segundo Resende (2019), pode-se dividir a rotina de projeto para o modelo de bielas e tirantes em algumas etapas, sendo elas: a definição da região de continuidade, a análise da estrutura, o processo do caminho das cargas (definição do fluxo das tensões principais) e a escolha do modelo mais adequado. É necessário se definirem esses dados, para, então, se dimensionarem as bielas e tirantes, verificarem-se as regiões nodais e se detalharem as armaduras.

2.2 Parâmetros do solo

O recalque é um fenômeno bastante comum que ocorre principalmente devido ao carregamento que é imposto ao maciço e ao rearranjo da estrutura no solo. Com o tempo, geram-se deformações que podem modificar a distribuição de carregamento na estrutura, provocando manifestações patológicas, que vão desde desconforto visual até danos severos que podem colocar em risco a estrutura (Velloso; Lopes, 2010).

Para evitar isso, é necessário elaborar projetos estruturais e geotécnicos de uma maneira integrada, com o objetivo de obter análises mais próximas à realidade. Frias *et al.* (2020) citam também a necessidade de se acompanhar o desempenho da edificação por meio dos monitoramentos de recalque, que devem ser iniciados na fase construtiva e permanecer ao longo da vida útil da edificação. A importância de se iniciar na fase construtiva se deve ao fato de se obter maior entendimento global do comportamento da edificação, logo a detecção prévia de anomalias.

Para a realização deste trabalho, fez-se necessário o conhecimento de parâmetros mecânicos do solo, que foram obtidos por meio de correlações empíricas comumente utilizadas. Segundo Sousa (2019), é difícil determinar o módulo de elasticidade de um solo, isso porque o solo é um material heterogêneo, ou seja, o módulo de elasticidade pode variar conforme o nível de carregamento aplicado e o nível de saturação do solo. Para determinação do valor do módulo de elasticidade (E), utilizou-se a Equação 1, proposta por Teixeira e Godoy (1998).

$$E = \alpha \cdot K \cdot N_{SPT} \quad (1)$$

sendo K um parâmetro que varia de acordo com o tipo de solo e que pode ser determinado utilizando-se os elementos descritos na Tabela 1, a seguir. O coeficiente α é um parâmetro que relaciona a resistência de ponta da estaca com o q – que é o resultado do ensaio de percussão simples (*Standard Penetration Test*) – e que pode ser encontrado na Tabela 2. Sobre o coeficiente de Poisson (ν), foi utilizada uma tabela proposta por Teixeira e Godoy (1998), que sugere valores baseados no q , demonstrados na Tabela 3.

Tabela 1 ▶

Valores propostos para o coeficiente K .
Fonte: adaptado de Teixeira (1993 apud Sousa, 2019)

Descrição do tipo de solo	K (MPa)
Areia com pedregulhos	1,10
Areia	0,90
Areia siltosa	0,70
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila arenosa	0,30
Silte argiloso	0,25
Areia siltosa	0,20

Tabela 2 ▶

Valores do parâmetro α .
Fonte: adaptado de Trofiemenkov (1974 apud Sousa, 2019)

Descrição do tipo de solo	α
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Tabela 3 ▶

Estimativa do módulo de deformabilidade do solo.
Fonte: adaptado de Teixeira e Godoy (1998)

Tipo de solo	Poisson
Areia fofa ($N_{SPT} \leq 4$)	0,30
Areia pouco compacta ($5 \leq N_{SPT} \leq 8$)	0,29
Areia medianamente compacta ($9 \leq N_{SPT} \leq 18$)	0,28
Areia compacta ($19 \leq N_{SPT} \leq 40$)	0,27
Areia muito compacta ($N_{SPT} > 40$)	0,26
Argila muito mole ($N_{SPT} \leq 2$)	0,24
Areia mole ($3 \leq N_{SPT} \leq 5$)	0,23
Areia média ($6 \leq N_{SPT} \leq 10$)	0,22
Areia rija ($11 \leq N_{SPT} \leq 19$)	0,21
Areia dura ($N_{SPT} > 19$)	0,21

2.3 Recomendações normativas

Nesta subseção são apresentadas as principais recomendações normativas que dizem respeito aos blocos sobre estacas.

2.3.1 Norma ABNT NBR 6118

A norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica os blocos como rígidos ou flexíveis. Para que o bloco seja considerado rígido, a Equação 2, abaixo, deve ser verificada nas duas direções, na qual h é a altura do bloco, a é a dimensão do bloco numa direção e a_p é a dimensão do pilar na mesma direção. Caso contrário, o bloco é classificado como flexível.

$$h \geq \frac{a - a_p}{3} \quad (2)$$

Na norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) é explicado que o comportamento do bloco rígido é caracterizado por trabalho à flexão nas duas direções, com as trações concentradas nas linhas sobre as estacas. Caracteriza-se também por forças transmitidas do pilar para as estacas por bielas de compressão e pelo trabalho ao cisalhamento nas duas direções.

Já para os blocos flexíveis, de acordo com a norma NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 190), “deve ser realizada uma análise mais completa, desde a distribuição dos esforços nas estacas, dos tirantes de tração, até a necessidade da verificação da punção”.

Conforme a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), é permitido o cálculo dos blocos de concreto a partir dos modelos de bielas e tirantes. A norma recomenda que o ângulo entre as bielas e o eixo da armadura horizontal esteja entre 30° e 63°. Nas faixas entre as estacas, devem ser dispostos mais de 85% da armadura de flexão, considerando o equilíbrio com as respectivas bielas. A norma brasileira prevê a utilização de armaduras adicionais para controlar a fissuração, porém não traz as orientações quanto à verificação do cisalhamento.

2.3.2 Norma ACI 318-19

A norma americana ACI 318-19 (ACI, 2019) permite o cálculo e o dimensionamento de blocos sobre estacas com base na teoria de vigas, em que a seção crítica é dimensionada à flexão e verificada ao cisalhamento, para blocos flexíveis; o modelo de bielas e tirantes é o aplicado para dimensionar blocos rígidos.

A norma americana estabelece que os blocos rígidos também devem ser verificados quanto ao momento fletor e quanto ao efeito de força cortante. Essas verificações devem ser feitas em seções transversais diferentes.

2.3.3 Norma CEB-FIP Model Code 2010

A norma CEB-FIP Model Code 2010 (CEB, 2012) não apresenta diretrizes para o detalhamento de blocos sobre estacas, apenas indica que blocos devem ser tratados como elementos de região D. Também apresenta recomendações sobre o modelo de bielas e tirantes a ser utilizado no cálculo e ilustra os tipos de nós existentes.

2.3.4 Norma EHE-08

Segundo a norma espanhola EHE-08 (CPH, 2011), os blocos sobre estacas podem ser classificados em rígidos e flexíveis, com um critério que depende da altura e da distância $V_{\text{máx}}$, que é a distância horizontal entre a face do pilar e o eixo da estaca. O bloco é considerado rígido se o valor de $V_{\text{máx}}$ for menor que duas vezes sua altura, caso contrário é considerado flexível.

3 Método da pesquisa

Foram modelados blocos sobre 12 estacas, inicialmente sem o solo e, posteriormente, considerando-se a presença do solo (o solo foi modelado como meio contínuo). A modelagem dos blocos sem a presença do solo foi realizada em função de situações como estacas com ponta em rocha e ao longo do fuste, presença de água (caso de pontes) ou solos muito moles, que impõem a resistência lateral (atrito) igual a zero. Metade dos modelos possui um pilar retangular, de área equivalente aos dois pilares associados, que possuem formato de “L”. Para realizar a análise e o estudo em questão, variaram-se os parâmetros:

- presença ou não do solo, em que foi utilizada uma sondagem como base de análise;
- pilares associados com formato em “L” e pilar retangular com área equivalente;
- resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) de 25 MPa, 35 MPa e 45 MPa;
- altura dos blocos, sendo variada entre 54 cm, 110 cm e 165 cm.

A análise numérica foi realizada por meio da modelagem, utilizando-se a ferramenta computacional Ansys®, que é baseada no método dos elementos finitos (MEF). Foi utilizada a versão 2021 R1 e a plataforma Workbench. Para os blocos e o solo, utilizaram-se elementos finitos volumétricos, tipo Solid 85, existentes na biblioteca do Ansys. Não foi considerado atrito entre as estacas e o solo, sendo os nós modelados com aderência perfeita. Para se diferenciar o material do bloco do material do solo, modificou-se o módulo de elasticidade longitudinal dos materiais.

As seções dos pilares estão representadas nas Figuras 4a e 4b; a Figura 5 mostra os blocos analisados numericamente. Nos modelos sem a presença de solo (Figuras 5a e 5b), restringiram-se as translações nas direções X, Y e Z dos nós da ponta das estacas. Nas Figuras 5c e 5d, são apresentados os modelos simulados com a presença do solo, sendo as camadas representadas em cores e descritas na Tabela 4, mais adiante apresentada.

Figura 4 ►

Seção dos pilares
(dimensões em cm).

(a) Pilares associados.

(b) Pilar retangular.

Fonte: dados da pesquisa

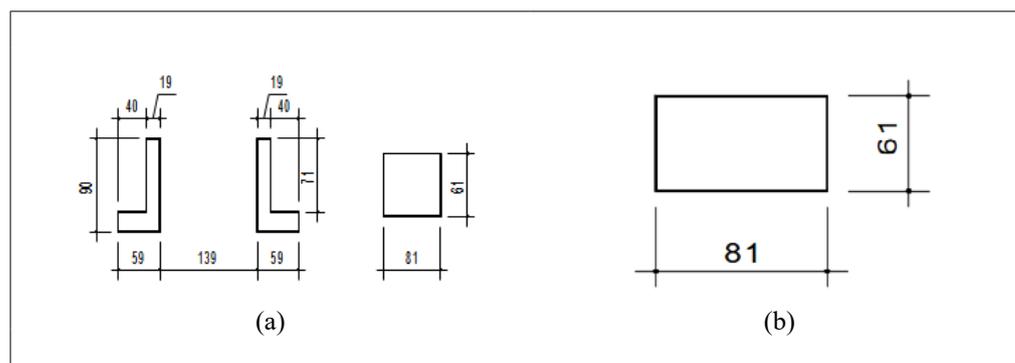


Figura 5 ▶

Blocos analisados numericamente. (a) Bloco com pilar equivalente, sem solo. (b) Bloco com pilar associado, sem solo. (c) Bloco com pilar equivalente, com solo. (d) Bloco com pilar associado, com solo.

Fonte: elaborado pelos autores

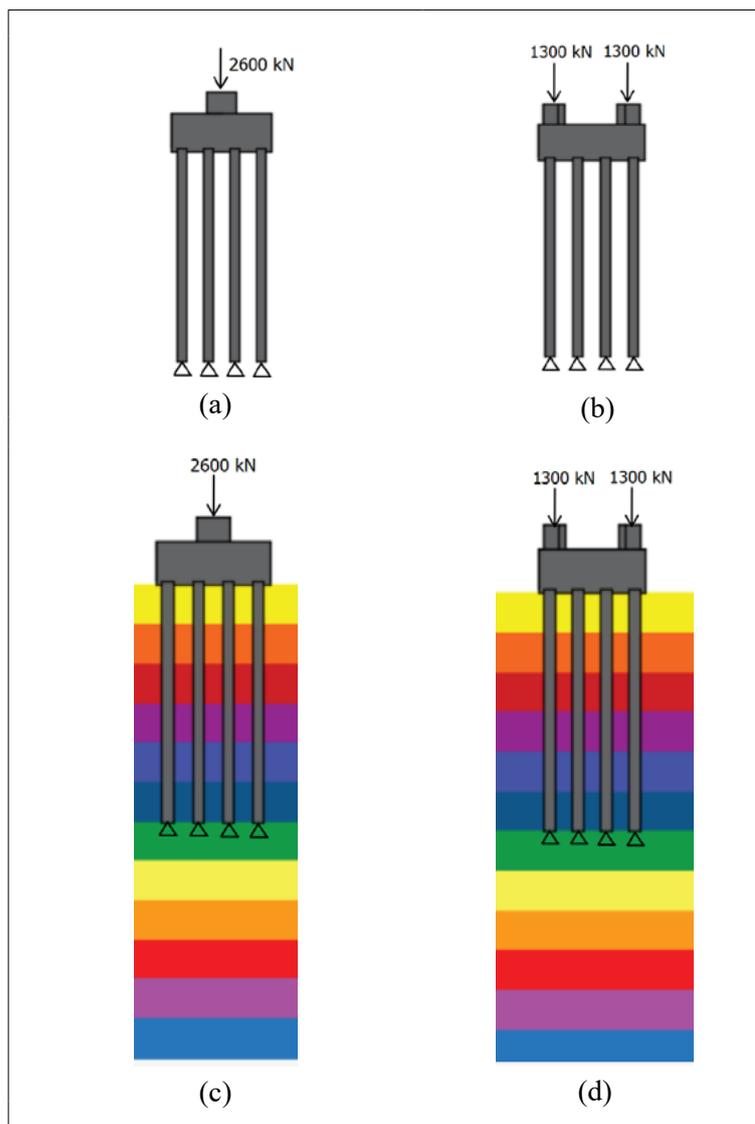


Tabela 4 ▶

Parâmetros do solo utilizados na modelagem.

Fonte: dados da pesquisa

Profundidade (m)	NSPT	Característica	Tipo de solo	E (KN/CM ²)	ν
0	0	Médio	Silte argiloso	0	0,24
-1	6	Médio	Silte argiloso	0,75	0,22
-2	7	Pouco compacto	Silte arenoargiloso	1,25	0,22
-3	10	Medianamente compacto	Silte arenoargiloso	1,75	0,22
-4	12	Medianamente compacto	Silte arenoargiloso	2,1	0,21
-5	19	Compacto	Silte arenoargiloso	3,33	0,21
-6	28	Duro	Silte argiloso	3,5	0,21
-7	38	Duro	Silte argiloso	4,75	0,21
-8	38	Duro	Silte argiloso	4,75	0,21
-9	32	Duro	Silte argiloso	4	0,21
-10	36	Duro	Silte argiloso	4,5	0,21
-11	42	Duro	Silte argiloso	5,25	0,21
-12	42	Duro	Silte argiloso	5,25	0,21

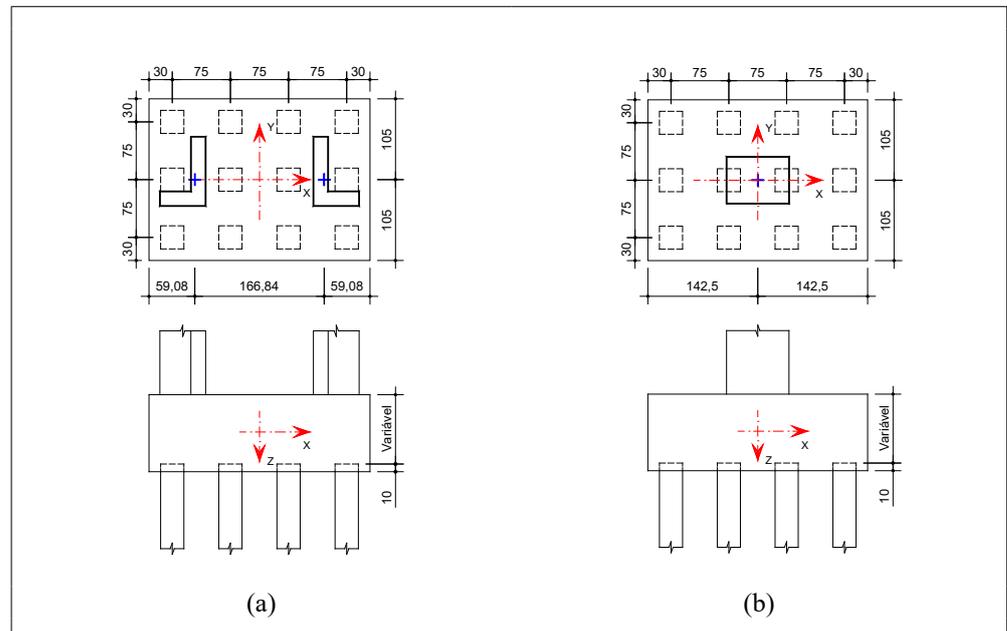
As características do solo foram definidas com base em uma sondagem na região do município de Uberlândia, estado de Minas Gerais (MG), da qual resultaram os valores de módulo de deformação (E) e coeficiente de Poisson (ν). Esses valores foram utilizados nas simulações numéricas e são apresentados na Tabela 4. As estacas dos blocos foram quadradas, com uma dimensão de 29,5 cm de lado; seu comprimento foi calculado de acordo com o método de Aoki e Velloso (1975), sendo igual a 6 m.

A força normal de compressão utilizada nos pilares foi determinada multiplicando-se a capacidade de carga geotécnica das estacas pelo número de estacas existentes no bloco, ou seja, 12 estacas. Adotou-se, portanto, uma força normal de compressão igual a 1300 kN em cada pilar dos blocos com pilares associados e de 2600 kN nos blocos com pilar equivalente. Nesta análise, não foram consideradas a existência de momentos, pois pretendeu-se analisar qual porcentagem da carga aplicada nos pilares é distribuída na interface base do bloco/solo.

De acordo com as medidas das estacas, foram definidos os espaçamentos necessários e, com isso, foram calculados o comprimento e largura do bloco, que foi igual a 285 cm de comprimento e 210 cm de largura. A NBR 6118 (ABNT, 2014) determina os ângulos mínimo e máximo da inclinação da biela; com isso foi possível calcular a altura do bloco. Foi adotado um valor mínimo de altura, um médio e um máximo, sendo 54 cm, 110 cm e 165 cm, respectivamente. A Figura 6 representa uma planta baixa dos blocos que possuem pilares associados (Figura 6a) e dos que possuem pilar equivalente (Figura 6b), respectivamente.

Figura 6 ►

Dimensões dos blocos (medidas em cm).
(a) Blocos com pilares associados. (b) Blocos com pilar equivalente.
Fonte: dados da pesquisa



Após todas as considerações apresentadas anteriormente sobre os modelos analisados, foram nomeados os blocos. Os nomes de todos os blocos se iniciaram com a letra B – que é representativa da palavra *bloco*. Na sequência, a informação a respeito do pilar, sendo *Pr* para os pilares com seção retangular e *Pa* para os pilares associados. A letra *H* representa a altura do bloco e foi indicada pelos números 1, 2 ou 3, demonstrando as três alturas diferentes. A letra *S* indica a presença do solo, e a falta dessa letra indica os blocos em que não foi considerada a influência do solo. No final, a letra *C* indica o f_{ck} do concreto do bloco. Na Tabela 5, estão representados os nomes dos blocos, com as considerações de cada um.

Tabela 5 ►
Representação dos blocos.
Fonte: dados da pesquisa

Nomeação dos blocos	Tipo de pilar	Altura do bloco (cm)	Consideração do solo	f_{ck} do bloco (MPa)
BPrH1C25	Retangular	54	Não	25
BPrH1C35	Retangular	54	Não	35
BPrH1C45	Retangular	54	Não	45
BPrH2C25	Retangular	110	Não	25
BPrH2C35	Retangular	110	Não	35
BPrH2C45	Retangular	110	Não	45
BPrH3C25	Retangular	165	Não	25
BPrH3C35	Retangular	165	Não	35
BPrH3C45	Retangular	165	Não	45
BPrH1SC25	Retangular	54	Sim	25
BPrH1SC35	Retangular	54	Sim	35
BPrH1SC45	Retangular	54	Sim	45
BPrH2SC25	Retangular	110	Sim	25
BPrH2SC35	Retangular	110	Sim	35
BPrH2SC45	Retangular	110	Sim	45
BPrH3SC25	Retangular	165	Sim	25
BPrH3SC35	Retangular	165	Sim	35
BPrH3SC45	Retangular	165	Sim	45
BPaH1C25	Associados	54	Não	25
BPaH1C35	Associados	54	Não	35
BPaH1C45	Associados	54	Não	45
BPaH2C25	Associados	110	Não	25
BPaH2C35	Associados	110	Não	35
BPaH2C45	Associados	110	Não	45
BPaH3C25	Associados	165	Não	25
BPaH3C35	Associados	165	Não	35
BPaH3C45	Associados	165	Não	45
BPaH1SC25	Associados	54	Sim	25
BPaH1SC35	Associados	54	Sim	35
BPaH1SC45	Associados	54	Sim	45
BPaH2SC25	Associados	110	Sim	25
BPaH2SC35	Associados	110	Sim	35
BPaH2SC45	Associados	110	Sim	45
BPaH3SC25	Associados	165	Sim	25
BPaH3SC35	Associados	165	Sim	35
BPaH3SC45	Associados	165	Sim	45

4 Análise de resultados

Nesta seção, são apresentadas as análises dos resultados. Detalhes específicos sobre as modelagens, gráficos e demais resultados podem ser observados em Souza (2022).

4.1 Reação das estacas

Tabela 6 ▼

Resultado das reações das estacas em kN.

Fonte: dados da pesquisa

Foram calculados os resultados das reações das estacas em cada um dos modelos analisados. Na Tabela 6, são apresentados os valores das reações em cada estaca e o valor da reação que passa para o solo nos modelos com a influência do solo.

Blocos	Est* 1	Est* 2	Est* 3	Est* 4	Est* 5	Est* 6	Est* 7	Est* 8	Est* 9	Est* 10	Est* 11	Est* 12	Total	Reação Solo
BPrH1C25	156,84	251,99	251,99	156,84	181,34	301,01	301,01	181,34	156,84	251,99	251,99	156,84	2600	–
BPrH1C35	163,49	248,64	248,64	163,49	184,74	291,00	291,00	184,74	163,49	248,64	248,64	163,49	2600	–
BPrH1C45	168,12	246,22	246,22	168,12	187,18	284,16	284,16	187,18	168,12	246,22	246,22	168,12	2600	–
BPrH2C25	205,34	224,03	224,03	205,34	209,48	231,76	231,76	209,48	205,34	224,03	224,03	205,34	2600	–
BPrH2C35	206,92	223,03	223,03	206,92	210,45	229,65	229,65	210,45	206,92	223,03	223,03	206,92	2600	–
BPrH2C45	207,96	222,36	222,36	207,96	211,10	228,26	228,26	211,10	207,96	222,36	222,36	207,96	2600	–
BPrH3C25	212,82	219,35	219,35	212,82	214,35	221,33	221,33	214,35	212,82	219,35	219,35	212,82	2600	–
BPrH3C35	213,36	218,97	218,97	213,36	214,67	220,66	220,66	214,67	213,36	218,97	218,97	213,36	2600	–
BPrH3C45	213,73	218,72	218,72	213,73	214,89	220,22	220,22	214,89	213,73	218,72	218,72	213,73	2600	–
BPrH1SC25	271,4	171,93	171,93	271,4	143,7	80,7	80,7	143,7	271,4	171,93	171,93	271,4	2222,12	377,88
BPrH1SC35	271,8	171,66	171,66	271,8	143,66	80,184	80,184	143,66	271,8	171,66	171,66	271,8	2221,53	378,47
BPrH1SC45	272,05	171,48	171,48	272,05	143,62	79,85	79,85	143,62	272,05	171,48	171,48	272,05	2221,06	378,94
BPrH2SC25	273,65	170,41	170,41	273,65	143,68	78,147	78,147	143,68	273,65	170,41	170,41	273,65	2219,89	380,11
BPrH2SC35	273,73	170,34	170,34	273,73	143,61	78,002	78,002	143,61	273,73	170,34	170,34	273,73	2219,50	380,50
BPrH2SC45	273,78	170,3	170,3	273,78	143,56	77,908	77,908	143,56	273,78	170,3	170,3	273,78	2219,25	380,74
BPrH3SC25	251,9	223,18	223,18	251,9	123,83	160,34	160,34	123,83	251,9	223,18	223,18	251,9	2468,66	131,34
BPrH3SC35	251,89	223,24	223,24	251,89	123,8	160,29	160,29	123,8	251,89	223,24	223,24	251,89	2468,7	131,3
BPrH3SC45	251,88	223,28	223,28	251,88	123,78	160,26	160,26	123,78	251,88	223,28	223,28	251,88	2468,72	131,28
BPaH1C25	215,46	194,08	194,08	215,46	258,72	222,29	222,29	258,72	221,86	187,59	187,59	221,86	2600	–
BPaH1C35	215,91	196,60	196,60	215,91	253,69	221,38	221,38	253,69	221,44	190,98	190,98	221,44	2600	–
BPaH1C45	216,17	198,36	198,36	216,17	250,25	220,80	220,80	250,25	221,11	193,32	193,32	221,11	2600	–
BPaH2C25	216,71	212,59	212,59	216,71	224,09	217,43	217,43	224,09	217,83	211,36	211,36	217,83	2600	–
BPaH2C35	216,71	213,16	213,16	216,71	223,04	217,32	217,32	223,04	217,66	212,11	212,11	217,66	2600	–
BPaH2C45	216,71	213,55	213,55	216,71	222,35	217,25	217,25	222,35	217,55	212,60	212,60	217,55	2600	–
BPaH3C25	216,65	215,50	215,50	216,65	218,79	217,01	217,01	218,79	216,94	215,10	215,10	216,94	2600	–
BPaH3C35	216,66	215,68	215,68	216,66	218,48	216,96	216,96	218,48	216,90	215,32	215,32	216,90	2600	–
BPaH3C45	216,66	215,79	215,79	216,66	218,28	216,92	216,92	218,28	216,87	215,47	215,47	216,87	2599,98	–
BPaH1SC25	273,08	170,03	170,03	273,08	145,15	78,325	78,325	145,15	272,73	169,76	169,76	272,73	2218,15	381,85
BPaH1SC35	273,24	170,01	170,01	273,24	144,87	78,171	78,171	144,87	272,94	169,79	169,79	272,94	2218,04	381,96
BPaH1SC45	273,34	170	170	273,34	144,7	78,07	78,07	144,7	273,07	169,81	169,81	273,07	2217,98	382,02
BPaH2SC25	273,91	170,1	170,1	273,91	143,91	77,80	77,80	143,91	273,86	170,04	170,04	273,86	2219,24	380,76
BPaH2SC35	273,95	170,08	170,08	273,95	143,81	77,707	77,707	143,81	273,91	170,03	170,03	273,91	2218,97	381,03
BPaH2SC45	273,98	170,07	170,07	273,98	143,74	77,647	77,647	143,74	273,94	170,02	170,02	273,94	2218,794	381,206
BPaH3SC25	252	223,16	223,16	252	123,92	160,33	160,33	123,92	251,96	223,13	223,13	251,96	2469	131
BPaH3SC35	251,97	223,23	223,23	251,97	123,88	160,28	160,28	123,88	251,94	223,19	223,19	251,94	2468,93	131,07
BPaH3SC45	251,95	223,27	223,27	251,95	123,85	160,25	160,25	123,85	251,92	223,23	223,23	251,92	2468,94	131,06

* Estaca



Na Tabela 7, apresentam-se as porcentagens de reações transmitidas para o solo em relação à força atuante total nos modelos com a presença do solo. Observa-se, na Figura 7, que os blocos com menor rigidez transmitem maior parcela do carregamento do pilar para o solo na interface bloco/solo. Também se observa que não há influência entre os modelos com pilares associados e com pilar equivalente. Na Figura 7, a sigla “PRCS” significa blocos com Pilares Retangulares equivalentes Com a consideração do Solo, e a sigla “PACS”, blocos com Pilares Associados Com a presença de Solo.

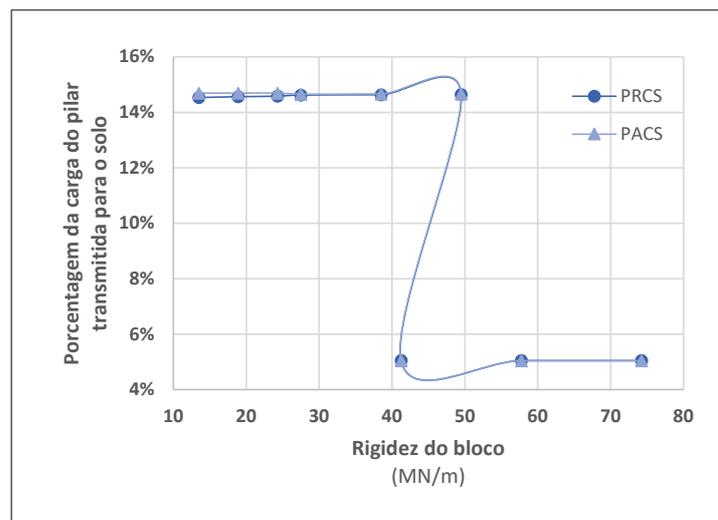
Tabela 7 ▼

Porcentagem das reações transmitidas para o solo.
Fonte: dados da pesquisa

Blocos	Reação transmitida para o solo	Blocos	Reação transmitida para o solo
BPrH1SC25	14,53%	BPaH1SC25	14,69%
BPrH1SC35	14,56%	BPaH1SC35	14,69%
BPrH1SC45	14,58%	BPaH1SC45	14,69%
BPrH2SC25	14,62%	BPaH2SC25	14,65%
BPrH2SC35	14,63%	BPaH2SC35	14,66%
BPrH2SC45	14,64%	BPaH2SC45	14,66%
BPrH3SC25	5,05%	BPaH3SC25	5,04%
BPrH3SC35	5,05%	BPaH3SC35	5,04%
BPrH3SC45	5,05%	BPaH3SC45	5,04%

Figura 7 ►

Distribuição da carga do pilar no solo.
Fonte: dados da pesquisa



Observou-se que a alteração da rigidez do bloco diminui a transferência de carga para o solo; por meio da mudança do f_{ck} , nos blocos que possuíam o pilar retangular e sem a influência do solo, os valores das reações das estacas posicionadas nas laterais foram maiores nos modelos com f_{ck} igual a 45 Mpa; nas estacas centrais, esses valores foram maiores nos modelos com f_{ck} de 25 MPa. Isso indica que, nos blocos com maior rigidez, as reações das estacas periféricas são maiores.

Nos modelos com pilares associados, os maiores resultados de reação foram nas estacas 5 e 8. Nos modelos que possuem a influência do solo, tanto nos que possuem o pilar retangular quanto nos que possuem pilares associados, os valores foram próximos e apresentaram pouca variação ao se alterar o f_{ck} . Os maiores valores se deram nas estacas de canto, que foram as estacas 1, 4, 9 e 12.

Já quando se analisa a variação da altura, para os modelos de blocos sem influência do solo, as estacas 2, 3, 6 e 7 foram as mais solicitadas. No restante das estacas, o maior valor ocorreu para os modelos com a altura máxima. Nos modelos com pilar associado com altura mínima, os maiores valores de reações foram nas estacas 5 e 8.

Nos modelos que possuem a influência do solo com pilar retangular e com pilares associados, os maiores valores de reação foram encontrados nas estacas 4 e 9, para os blocos com altura mínima e média.

Comparando-se os blocos com os diferentes tipos de geometria do pilar, verificou-se que, nos blocos com presença do solo e com pilar retangular, as estacas com maiores reações foram 2, 3, 6, 7, 10 e 11. Nos modelos de bloco com o pilar de área equivalente, as estacas com maiores reações foram 1, 4, 5, 8, 9 e 12.

Para os modelos com a presença de solo, ocorreu uma variação pequena nos resultados das reações das estacas em relação aos blocos com pilar retangular e associados. A variação da geometria do pilar não influenciou, portanto, nesses modelos.

Já ao se alterar a presença ou não do solo, foi possível verificar que, nos blocos sem a presença do solo, as reações das estacas são distribuídas mais uniformemente entre as estacas. E nos modelos com presença de solo, os maiores valores de reações estão concentrados nas estacas 1, 4, 9 e 12.

4.2 Deslocamentos

Obtiveram-se os deslocamentos verticais nos blocos na ponta das estacas centrais, na face superior do pilar e na face inferior do bloco e analisou-se a influência dos parâmetros variados nos resultados obtidos. Na Tabela 8, apresentam-se os valores de deslocamento na ponta das estacas centrais.

Tabela 8 ►

Deslocamento na ponta das estacas centrais (em cm).
Fonte: dados da pesquisa

Blocos	Deslocamento	Blocos	Deslocamento
BPrH1SC25	0,056	BPaH1SC25	5,6
BPrH1SC35	0,057	BPaH1SC35	5,6
BPrH1SC45	0,056	BPaH1SC45	5,6
BPrH2SC25	0,056	BPaH2SC25	5,6
BPrH2SC35	0,056	BPaH2SC35	5,6
BPrH2SC45	0,056	BPaH2SC45	5,6
BPrH3SC25	0,054	BPaH3SC25	5,4
BPrH3SC35	0,054	BPaH3SC35	5,4
BPrH3SC45	0,054	BPaH3SC45	5,4

Os deslocamentos nas estacas centrais não tiveram grande modificação quando se alterou o valor do f_{ck} , tendo valores menores nos blocos de menor altura. Portanto, a variação do f_{ck} não influenciou significativamente no deslocamento das estacas do centro. Observou-se que, em se aumentando a altura, os valores de deslocamento são menores; assim, pode-se afirmar que o deslocamento das estacas centrais é inversamente proporcional às alturas dos blocos.

Tabela 9 ▼

Deslocamentos verticais no topo do pilar obtidos numericamente (em cm).
Fonte: dados da pesquisa

Os valores dos deslocamentos nas estacas centrais foram próximos nos modelos com pilar equivalente e com pilares associados. Apenas nos blocos com menor altura os valores foram maiores nos blocos com pilar equivalente em comparação aos blocos com pilares associados. Na Tabela 9, são apresentados os valores obtidos para o deslocamento no pilar.

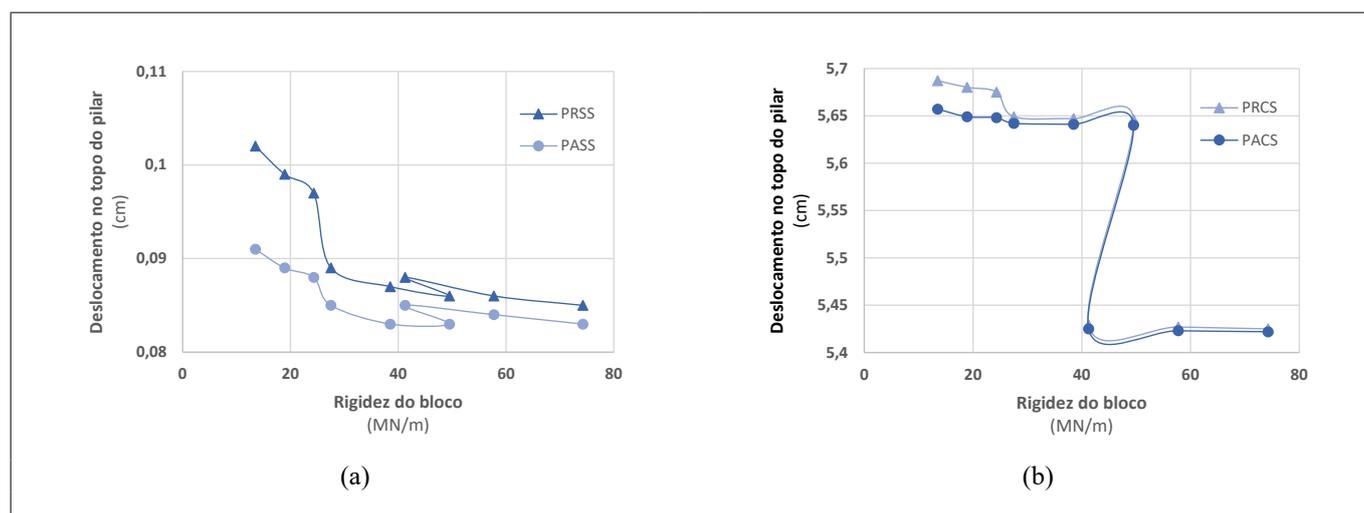
Blocos	Desloc.* Pilar	Blocos	Desloc.* Pilar	Blocos	Desloc.* Pilar	Blocos	Desloc.* Pilar
BPrH1C25	0,102	BPRH1SC25	5,687	BPaH1C25	0,091	BPaH1SC25	5,657
BPrH1C35	0,099	BPrH1SC35	5,680	BPaH1C35	0,089	BPaH1SC35	5,649
BPrH1C45	0,097	BPrH1SC45	5,675	BPaH1C45	0,088	BPaH1SC45	5,648
BPrH2C25	0,089	BPrH2SC25	5,649	BPaH2C25	0,085	BPaH2SC25	5,642
BPrH2C35	0,087	BPrH2SC35	5,647	BPaH2C35	0,083	BPaH2SC35	5,641
BPrH2C45	0,086	BPrH2SC45	5,646	BPaH2C45	0,083	BPaH2SC45	5,640
BPrH3C25	0,088	BPrH3SC25	5,429	BPaH3C25	0,085	BPaH3SC25	5,425
BPrH3C35	0,086	BPrH3SC35	5,427	BPaH3C35	0,084	BPaH3SC35	5,423
BPrH3C45	0,085	BPrH3SC45	5,425	BPaH3C45	0,083	BPaH3SC45	5,422

* Deslocamento

Figura 8 ▼

Deslocamentos nos topos dos pilares. (a) Bloco sem solo. (b) Bloco com solo.
Fonte: dados da pesquisa

As Figura 8a e 8b indicam a relação dos deslocamentos no topo do pilar, em função das rigidezes dos blocos. Constatou-se que os blocos de maiores rigidezes apresentam menor deslocamento.



PRSS: bloco com Pilar Retangular equivalente Sem Solo. PASS: bloco com Pilar Associado sem solo.
PRCS: bloco com Pilar Retangular equivalente Com Solo. PACS: bloco com Pilar Associado Com Solo.

Conforme os resultados de deslocamento no pilar indicados na Figura 8, não houve grande variação ao se alterar a rigidez do bloco, por meio da alteração do f_{ck} , tanto nos modelos sem presença do solo quanto nos modelos com o solo. A variação do f_{ck} não influenciou, portanto, nesses resultados. Ao se alterarem as alturas, também se observou que não houve influência nos valores do deslocamento do pilar nos modelos sem presença de solo. Nos modelos com a presença do solo, verificou-se que, ao se aumentar a altura, o deslocamento do pilar diminuiu.

Tabela 10 ▼

Deslocamento na face inferior do bloco (em cm).
 Fonte: dados da pesquisa

Não houve grandes variações ao se alterar a geometria do pilar. Os valores encontrados foram próximos, tanto nos modelos com presença do solo quanto nos modelos sem essa consideração. Pode-se verificar que os valores de deslocamento na face do pilar são maiores nos modelos com presença do solo do que nos modelos sem a presença do solo. Pode-se também afirmar que o solo é um parâmetro influente nesse resultado. Na Tabela 10, estão presentes os resultados de deslocamento na face inferior do bloco.

Blocos	Desloc.* face inferior bloco	Blocos	Desloc.* face inferior bloco	Blocos	Desloc.* face inferior bloco	Blocos	Desloc.* face inferior bloco
BPrH1C25	0,067	BPrH1SC25	5,654	BPaH1C25	0,043	BPaH1SC25	5,618
BPrH1C35	0,064	BPrH1SC35	5,647	BPaH1C35	0,043	BPaH1SC35	5,616
BPrH1C45	0,062	BPrH1SC45	5,642	BPaH1C45	0,043	BPaH1SC45	5,614
BPrH2C25	0,049	BPrH2SC25	5,611	BPaH2C25	0,044	BPaH2SC25	5,605
BPrH2C35	0,048	BPrH2SC35	5,609	BPaH2C35	0,044	BPaH2SC35	5,604
BPrH2C45	0,047	BPrH2SC45	5,608	BPaH2C45	0,044	BPaH2SC45	5,604
BPrH3C25	0,046	BPrH3SC25	5,388	BPaH3C25	0,044	BPaH3SC25	5,386
BPrH3C35	0,045	BPrH3SC35	5,387	BPaH3C35	0,044	BPaH3SC35	5,385
BPrH3C45	0,045	BPrH3SC45	5,386	BPaH3C45	0,044	BPaH3SC45	5,385

* Deslocamento

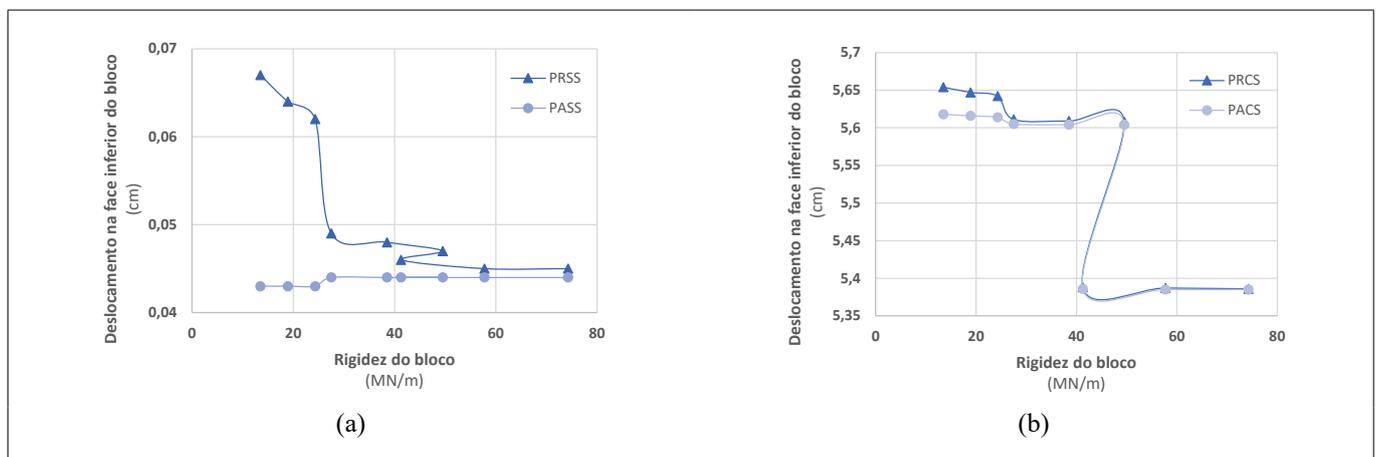
A variação do f_{ck} não interferiu significativamente nos valores de deslocamento da face inferior do bloco. Nos modelos sem a presença do solo, não há uma diferença significativa nos valores ao se alterar a altura. Nos modelos com a presença do solo, os valores de deslocamento são menores nos modelos com a maior altura. Ou seja, o deslocamento é inversamente proporcional à altura do bloco.

Não houve uma grande interferência nos resultados de deslocamento na face inferior do bloco, mas, nos modelos com a menor altura, o deslocamento nos modelos com pilar retangular foi maior que nos modelos com pilares associados. Pode-se observar que os valores do deslocamento na face inferior do bloco foram cerca de 85 a 125 vezes maiores nos blocos com a presença de solo em relação aos modelos sem a presença do solo.

Nas Figuras 9a e 9b, apresentam-se os deslocamentos na face inferior dos blocos, em função de suas rigidezes.

Figura 9 ▼

Deslocamentos nas bases dos blocos.
 Fonte: dados da pesquisa



PRSS: bloco com Pilar Retangular equivalente Sem Solo. PASS: bloco com Pilar Associado Sem Solo.
 PRCS: bloco com Pilar Retangular equivalente Com Solo. PACS: bloco com Pilar Associado Com Solo.

4.3 Compressão

Tabela 11 ▼

Tensões de compressão nos modelos numéricos (em MPa).

Fonte: dados da pesquisa

Nesta subsecção, são apresentadas as tensões de compressão nos modelos numéricos, cujos resultados estão descritos na Tabela 11.

Blocos	Compr.*	Blocos	Compr.*	Blocos	Compr.*	Blocos	Compr.*
BPRH1C25	0,80	BPrH1SC25	4,82	BPaH1C25	1,52	BpaH1SC25	5,20
BPRH1C35	0,76	BPrH1SC35	4,42	BpaH1C35	1,48	BpaH1SC35	4,76
BPRH1C45	0,76	BPrH1SC45	4,24	BpaH1C45	1,45	BpaH1SC45	4,44
BPRH2C25	0,60	BPrH2SC25	4,51	BpaH2C25	1,16	BpaH2SC25	4,63
BPRH2C35	0,58	BPrH2SC35	4,11	BpaH2C35	1,14	BpaH2SC35	4,22
BPRH2C45	0,58	BPrH2SC45	3,81	BpaH2C45	1,13	BpaH2SC45	3,92
BPRH3C25	0,58	BPrH3SC25	2,86	BpaH3C25	1,13	BpaH3SC25	2,90
BPRH3C35	0,57	BPrH3SC35	2,60	BpaH3C35	1,12	BpaH3SC35	2,64
BPRH3C45	0,57	BPrH3SC45	2,41	BpaH3C45	1,10	BpaH3SC45	2,45

* Compressão

Pode-se perceber que há uma alteração nos valores da compressão nos modelos com a presença do solo. Quanto maior o valor do f_{ck} , menores os valores de compressão nesses modelos.

Pode-se observar que os valores de tensões de compressão diminuíram ao se aumentar a altura. Nos modelos com a presença do solo, houve uma redução maior nos valores da compressão.

Tanto nos modelos sem presença do solo quanto nos modelos com a presença do solo, as tensões de compressão foram maiores ao se utilizarem os pilares associados. Pode-se perceber que as tensões foram maiores nos modelos com o solo, sendo que os valores diminuíram conforme se aumentaram o f_{ck} e a altura. A Tabela 12 ilustra os valores de tensões de compressão longitudinal. Esse corte foi considerado no meio do bloco, sendo feito um corte paralelo à maior dimensão do bloco.

Tabela 12 ▼

Tensões de compressão longitudinal (em MPa).

Fonte: dados da pesquisa

Blocos	Comp. Long.*	Blocos	Comp. Long.*	Blocos	Comp. Long.*	Blocos	Comp. Long.*
BPrH1C25	0,80	BPrH1SC25	1,19	BPaH1C25	0,63	BPaH1SC25	0,47
BPrH1C35	0,76	BPrH1SC35	1,05	BPaH1C35	0,63	BPaH1SC35	0,41
BPrH1C45	0,73	BPrH1SC45	0,96	BPaH1C45	0,63	BPaH1SC45	0,38
BPrH2C25	0,57	BPrH2SC25	0,52	BPaH2C25	0,53	BPaH2SC25	1,43
BPrH2C35	0,56	BPrH2SC35	0,53	BPaH2C35	0,53	BPaH2SC35	1,44
BPrH2C45	0,55	BPrH2SC45	0,54	BPaH2C45	0,53	BPaH2SC45	1,45
BPrH3C25	0,53	BPrH3SC25	1,05	BPaH3C25	0,52	BPaH3SC25	1,05
BPrH3C35	0,52	BPrH3SC35	1,05	BPaH3C35	0,52	BPaH3SC35	1,04
BPrH3C45	0,52	BPrH3SC45	1,04	BPaH3C45	0,52	BPaH3SC45	1,04

* Compressão Longitudinal



Pode-se perceber que os valores de compressão longitudinal foram próximos ao se alterar o valor do f_{ck} . Nos modelos com a altura mínima e presença do solo, houve uma redução maior nos valores de compressão ao se aumentar o f_{ck} , ou seja, nesses modelos, a variação do f_{ck} influenciou a compressão longitudinal. Verifica-se que, nos modelos sem a presença do solo, os valores de compressão longitudinal diminuíram conforme se aumentou a altura. Já nos modelos com a presença do solo e com pilar retangular, os menores valores de compressão foram nos modelos de altura média; logo depois, vieram os valores dos modelos com a altura máxima; os maiores valores de tensões foram encontrados nos modelos com menor altura. Nos blocos com pilares associados, as tensões de compressão longitudinal foram menores do que nos blocos com pilar retangular.

Nos blocos com altura média e presença do solo, os valores de compressão foram maiores que nos modelos com pilar retangular. O valor das tensões de compressão longitudinal, nos modelos com pilar retangular e alturas mínima e máxima e nos modelos com pilares associados e alturas média e máxima, foi maior quando havia a presença do solo. Já nos outros modelos, os valores maiores de tensão se deram nos modelos sem a presença do solo. A Tabela 13 mostra os resultados máximos de compressão no corte transversal.

Tabela 13 ▼

Tensões de compressão transversal (em MPa).

Fonte: dados da pesquisa

Blocos	Comp. Transv.*	Blocos	Comp. Transv.*	Blocos	Comp. Transv.*	Blocos	Comp. Transv.*
BPrH1C25	0,010	BPrH1SC25	0,957	BPaH1C25	0,024	BPaH1SC25	0,941
BPrH1C35	0,099	BPrH1SC35	0,958	BPaH1C35	0,024	BPaH1SC35	0,944
BPrH1C45	0,098	BPrH1SC45	0,959	BPaH1C45	0,024	BPaH1SC45	0,947
BPrH2C25	0,112	BPrH2SC25	0,954	BPaH2C25	0,011	BPaH2SC25	0,951
BPrH2C35	0,114	BPrH2SC35	0,956	BPaH2C35	0,012	BPaH2SC35	0,954
BPrH2C45	0,115	BPrH2SC45	0,958	BPaH2C45	0,012	BPaH2SC45	0,956
BPrH3C25	0,136	BPrH3SC25	1,342	BPaH3C25	0,029	BPaH3SC25	1,342
BPrH3C35	0,135	BPrH3SC35	1,345	BPaH3C35	0,029	BPaH3SC35	1,345
BPrH3C45	0,136	BPrH3SC45	1,347	BPaH3C45	0,029	BPaH3SC45	1,347

* Compressão Transversal

A variação do f_{ck} não influenciou significativamente nas tensões de compressão transversal, pois os resultados com os três valores de f_{ck} resultaram em valores de compressão transversal próximos. Percebe-se que a influência maior da variação da altura se deu nos modelos com presença do solo. O valor de compressão cresceu ao se aumentar a altura, portanto são grandezas diretamente proporcionais.

Ao modificar o tipo da geometria do pilar, vê-se que os modelos sem a presença do solo resultaram em valores menores de compressão transversal. Já nos modelos com a presença do solo, não houve uma grande influência nas tensões em função da alteração do tipo de geometria do pilar. Observa-se também que, ao se considerar a presença do solo, os valores das tensões de compressão transversal foram maiores, tanto nos modelos com pilar equivalente quanto nos modelos com pilares associados.

4.4 Tração X

Tabela 14 ▼
Tensões de tração na direção X (em MPa).
Fonte: dados da pesquisa

Foram calculadas as tensões de tração nas direções X e Y, em todos os modelos. Na Tabela 14, estão presentes os valores de tração máximos na direção X. Nas Tabelas 15 e 16, apresentam-se as tensões de tração nos sentidos transversal e longitudinal, respectivamente.

Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração
BPrH1C25	6,57	BPrH1SC25	9,08	BPaH1C25	1,80	BPaH1SC25	3,11
BPrH1C35	6,75	BPrH1SC35	8,89	BPaH1C35	1,80	BPaH1SC35	3,03
BPrH1C45	6,88	BPrH1SC45	8,94	BPaH1C45	1,80	BPaH1SC45	2,97
BPrH2C25	2,21	BPrH2SC25	2,47	BPaH2C25	0,78	BPaH2SC25	1,56
BPrH2C35	2,22	BPrH2SC35	2,42	BPaH2C35	0,78	BPaH2SC35	1,51
BPrH2C45	2,23	BPrH2SC45	2,37	BPaH2C45	0,79	BPaH2SC45	1,48
BPrH3C25	1,14	BPrH3SC25	2,27	BPaH3C25	0,74	BPaH3SC25	2,13
BPrH3C35	1,14	BPrH3SC35	2,23	BPaH3C35	0,72	BPaH3SC35	2,09
BPrH3C45	1,14	BPrH3SC45	2,20	BPaH3C45	0,72	BPaH3SC45	2,06

Tabela 15 ▼
Tensões de tração longitudinal na direção X (em MPa).
Fonte: dados da pesquisa

Blocos	Tração Long.*	Blocos	Tração Long.*	Blocos	Tração Long.*	Blocos	Tração Long.*
BPrH1C25	6,56	BPrH1SC25	9,08	BPaH1C25	1,79	BPaH1SC25	2,19
BPrH1C35	6,74	BPrH1SC35	8,89	BPaH1C35	1,79	BPaH1SC35	2,22
BPrH1C45	6,87	BPrH1SC45	8,93	BPaH1C45	1,79	BPaH1SC45	2,25
BPrH2C25	2,21	BPrH2SC25	2,26	BPaH2C25	0,73	BPaH2SC25	0,50
BPrH2C35	2,22	BPrH2SC35	2,26	BPaH2C35	0,740	BPaH2SC35	0,50
BPrH2C45	2,22	BPrH2SC45	2,26	BPaH2C45	0,74	BPaH2SC45	0,50
BPrH3C25	1,13	BPrH3SC25	1,62	BPaH3C25	0,67	BPaH3SC25	1,48
BPrH3C35	1,14	BPrH3SC35	1,61	BPaH3C35	0,67	BPaH3SC35	1,47
BPrH3C45	1,14	BPrH3SC45	1,60	BPaH3C45	0,68	BPaH3SC45	1,46

* Longitudinal

Tabela 16 ▼

Tensões de tração transversal
na direção X (em MPa).

Fonte: dados da pesquisa

Blocos	Tração Transv.*	Blocos	Tração Transv.*	Blocos	Tração Transv.*	Blocos	Tração Transv.*
BPrH1C25	6,17	BPrH1SC25	8,14	BPaH1C25	1,59	BPaH1SC25	0,57
BPrH1C35	6,37	BPrH1SC35	8,23	BPaH1C35	1,63	BPaH1SC35	0,58
BPrH1C45	6,52	BPrH1SC45	8,40	BPaH1C45	1,66	BPaH1SC45	0,57
BPrH2C25	2,15	BPrH2SC25	2,13	BPaH2C25	0,73	BPaH2SC25	0,37
BPrH2C35	2,16	BPrH2SC35	2,14	BPaH2C35	0,73	BPaH2SC35	0,37
BPrH2C45	2,17	BPrH2SC45	2,15	BPaH2C45	0,73	BPaH2SC45	0,37
BPrH3C25	1,09	BPrH3SC25	1,49	BPaH3C25	0,60	BPaH3SC25	0,80
BPrH3C35	1,09	BPrH3SC35	1,49	BPaH3C35	0,60	BPaH3SC35	0,80
BPrH3C45	1,09	BPrH3SC45	1,50	BPaH3C45	0,60	BPaH3SC45	0,80

* Transversal

Segundo os dados obtidos, em todos os modelos, ao se alterar a geometria do pilar retangular para associado, os valores de tensões de tração na direção X diminuíram. Os modelos que sofreram uma redução maior nessa tensão foram os modelos com a altura de 54 cm, ou seja, a altura mínima. Observando os resultados obtidos, entende-se que, ao se considerar a presença do solo, os valores de tensões de tração na direção X foram maiores, principalmente nos modelos com a altura maior. A Tabela 15, anteriormente vista, apresenta os maiores valores de tração longitudinal na direção X.

Nos modelos com pilar retangular sem presença de solo, os valores de tração sofreram acréscimo ao se aumentar o f_{ck} . Nos outros modelos, os valores de tensões diminuíram, ou seja, foram inversamente proporcionais. Daí se conclui que, em todos os modelos, ocorreu uma diminuição dos valores das tensões de tração conforme se alterou a altura. Assim sendo, a tração na direção X e a altura são inversamente proporcionais, pois, ao se aumentar a altura, os valores de tensões diminuíram.

Também se verificou que, ao se alterar o f_{ck} , não houve grande variação nos valores de tensões de tração, portanto o parâmetro f_{ck} não possui influência nesse resultado. Observa-se que, na grande maioria dos modelos, ao se aumentar a altura, os valores de tensões de tração longitudinal diminuíram. Nos modelos com presença de solo e pilares associados, os valores de tensões aumentaram para os blocos com a altura máxima. Ao se alterar a geometria do pilar – de retangular para pilares associados em “L” –, encontraram-se resultados menores de tensões de tração longitudinal.

Nos modelos com a menor altura dos blocos, ocorreu maior redução nos valores de tensões. A partir desses resultados, concluiu-se que, em sua maioria, ocorreu um aumento dos valores de tensão de tração nos modelos sem presença do solo em relação aos modelos com presença do solo. A Tabela 16 apresenta os resultados de tração transversal na direção X.

Observou-se que não ocorreu grande influência nos valores de tração ao se aumentar o f_{ck} , portanto este não é um parâmetro relevante nesse resultado. Pode-se verificar

que, ao aumentar a altura dos blocos, os valores de tração transversal na direção X diminuíram, portanto são inversamente proporcionais, exceto nos modelos com pilares associados e com presença do solo.

É possível observar que, em se comparando os blocos com pilar retangular aos blocos com pilares associados, os valores das tensões de tração transversal na direção X são bem maiores nos modelos com pilar retangular. Daí se entende que os valores de tensões de tração transversal são maiores quando há presença do solo. Isso ocorreu na maioria dos modelos, exceto nos modelos com pilares associados e com alturas mínima e média, em que os valores são maiores nos blocos sem a presença do solo.

Tabela 17 ▼

Tensões de tração na direção Z (em MPa).

Fonte: dados da pesquisa

4.5 Tração Z

Na Tabela 17 são apresentados os valores das tensões de tração máximas na direção Z, sendo essa direção perpendicular ao plano XY.

Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração
BPrH1C25	4,58	BPrH1SC25	7,22	BPaH1C25	3,78	BPaH1SC25	5,89
BPrH1C35	4,62	BPrH1SC35	7,22	BPaH1C35	3,82	BPaH1SC35	5,87
BPrH1C45	4,71	BPrH1SC45	7,22	BPaH1C45	3,84	BPaH1SC45	5,87
BPrH2C25	1,41	BPrH2SC25	1,80	BPaH2C25	1,20	BPaH2SC25	1,83
BPrH2C35	1,41	BPrH2SC35	1,78	BPaH2C35	1,20	BPaH2SC35	1,80
BPrH2C45	1,41	BPrH2SC45	1,77	BPaH2C45	1,21	BPaH2SC45	1,77
BPrH3C25	0,75	BPrH3SC25	1,48	BPaH3C25	0,83	BPaH3SC25	1,49
BPrH3C35	0,76	BPrH3SC35	1,49	BPaH3C35	0,79	BPaH3SC35	1,49
BPrH3C45	0,76	BPrH3SC45	1,49	BPaH3C45	0,76	BPaH3SC45	1,49

Observou-se que o parâmetro f_{ck} não influenciou de forma significativa nos valores de tensões de tração na direção Z, não sendo um parâmetro relevante nesse resultado. Ao se aumentar a altura dos blocos, os valores das tensões de tração na direção Z diminuíram, demonstrando que a tensão de tração e a altura são inversamente proporcionais.

Nos modelos sem presença do solo e com altura mínima e média, os valores de tensões de tração na direção Z foram maiores quando se utilizou pilar retangular. Nos modelos sem presença de solo e com altura máxima, os valores de tração foram maiores ao se considerarem pilares associados. Já nos blocos que tiveram a consideração do solo, com a altura mínima, os valores maiores se deram nos modelos de pilar retangular; nas outras alturas, os valores de tensão maiores foram para os modelos de pilares associados. Observando a influência da presença ou não do solo, percebe-se que, em todos os modelos, os maiores valores de tensão de tração na direção Z se dão ao se considerar a presença do solo. A Tabela 18 mostra os resultados de tensões de tração longitudinal na direção Z.

Tabela 18 ▼

Tensões de tração longitudinal na direção Z (em MPa).
Fonte: dados da pesquisa

Blocos	Tração Long.*	Blocos	Tração Long.*	Blocos	Tração Long.*	Blocos	Tração Long.*
BPrH1C25	4,51	BPrH1SC25	5,80	BPaH1C25	2,59	BPaH1SC25	4,07
BPrH1C35	4,62	BPrH1SC35	5,92	BPaH1C35	2,67	BPaH1SC35	4,15
BPrH1C45	4,71	BPrH1SC45	6,02	BPaH1C45	2,72	BPaH1SC45	4,20
BPrH2C25	1,18	BPrH2SC25	1,55	BPaH2C25	0,75	BPaH2SC25	1,14
BPrH2C35	1,19	BPrH2SC35	1,56	BPaH2C35	0,75	BPaH2SC35	1,15
BPrH2C45	1,20	BPrH2SC45	1,57	BPaH2C45	0,75	BPaH2SC45	1,15
BPrH3C25	0,42	BPrH3SC25	0,99	BPaH3C25	0,41	BPaH3SC25	1,01
BPrH3C35	0,42	BPrH3SC35	0,99	BPaH3C35	0,41	BPaH3SC35	1,02
BPrH3C45	0,42	BPrH3SC45	1,00	BPaH3C45	0,41	BPaH3SC45	1,02

* Longitudinal

Houve uma influência nas tensões de tração longitudinal na direção Z ao se aumentarem os valores de f_{ck} . Quando ocorreu um aumento nesse parâmetro, houve um aumento nos valores de tensão de tração longitudinal. Assim, em todos os modelos, ao se aumentar a altura do bloco, os valores de tração longitudinal diminuíram, logo o parâmetro altura tem influência nesses resultados.

Tabela 19 ▼

Tensões de tração transversal na direção Z (em MPa).
Fonte: dados da pesquisa

As análises também permitiram concluir que, em todos os modelos, ao se alterar a geometria do pilar de pilar retangular para pilares associados, o valor das tensões de tração longitudinal diminuiu. Desse modo, ao se considerar o solo nos modelos, os valores das tensões de tração longitudinal foram maiores do que quando não se considerou a presença do solo. A Tabela 19 apresenta os resultados de tensões de tração transversal na direção Z.

Blocos	Tração Transv.*	Blocos	Tração Transv.*	Blocos	Tração Transv.*	Blocos	Tração Transv.*
BPrH1C25	4,49	BPrH1SC25	5,74	BPaH1C25	1,45	BPaH1SC25	2,88
BPrH1C35	4,62	BPrH1SC35	5,88	BPaH1C35	1,50	BPaH1SC35	2,93
BPrH1C45	4,71	BPrH1SC45	5,99	BPaH1C45	1,53	BPaH1SC45	2,96
BPrH2C25	1,20	BPrH2SC25	1,54	BPaH2C25	0,57	BPaH2SC25	1,16
BPrH2C35	1,21	BPrH2SC35	1,55	BPaH2C35	0,57	BPaH2SC35	1,17
BPrH2C45	1,22	BPrH2SC45	1,56	BPaH2C45	0,58	BPaH2SC45	1,17
BPrH3C25	0,58	BPrH3SC25	1,35	BPaH3C25	0,38	BPaH3SC25	1,32
BPrH3C35	0,54	BPrH3SC35	1,35	BPaH3C35	0,38	BPaH3SC35	1,32
BPrH3C45	0,53	BPrH3SC45	1,36	BPaH3C45	0,38	BPaH3SC45	1,33

* Transversal



Conforme se demonstra na Tabela 19, ao se aumentar o f_{ck} , os valores das tensões de tração também aumentaram, sendo essas grandezas diretamente proporcionais, contudo pouco significativas.

Ao se aumentar a altura do bloco, o valor de tensões de tração transversal na direção Z diminuiu, portanto são grandezas inversamente proporcionais, exceto nos modelos com pilares associados e com presença de solo, situação em que o valor máximo de tensões se deu nos modelos com a altura média.

Observa-se que os blocos com pilares retangulares tiveram resultados maiores de tensões de tração, portanto os blocos com pilares associados têm resultados menores. Os blocos com menor altura apresentaram maiores diferenças quando comparados os resultados dos blocos com os dois tipos de geometria do pilar. Os blocos com a presença do solo indicaram maiores valores de tensões de tração transversal na direção Z em comparação aos blocos sem a presença do solo.

5 Considerações finais

Sobre as reações das estacas, percebeu-se que, ao se alterar o f_{ck} , as reações nas estacas centrais, nos modelos com pilar retangular e altura mínima, foram maiores. Já nos outros modelos, a reação foi dividida de forma homogênea entre as 12 estacas.

Ao se alterar a altura dos blocos, concluiu-se que, nos modelos sem a presença de solo, os blocos com a altura média e máxima (110 cm e 165 cm) tiveram valores de reações com maior homogeneidade entre as estacas. Já nos modelos com a altura de 54 cm, os valores das reações se concentraram nas estacas 2, 3, 6, 7, 10 e 11 nos blocos com o pilar retangular, e, nos blocos com pilares associados, os valores de reações se concentraram nas estacas 5 e 8. Nos modelos com a presença do solo, na altura máxima, as reações se concentraram nas estacas 2, 3, 6, 7, 10 e 11.

A geometria do pilar teve maior influência nos modelos sem presença do solo, pois, nos blocos com pilar retangular e com altura de 54 cm, os valores maiores de reações se mostraram nas estacas 6 e 7; nos blocos com pilares associados e mesma altura, as reações se concentraram mais nas estacas 5 e 8. Já nos modelos com o solo, não houve variação considerável entre os valores de reações dos modelos com geometria de pilar diferente. Quando se considera o solo, percebe-se, portanto, mudança na concentração das reações das estacas.

Nos modelos com pilares retangulares, quando não se considera o solo, as maiores reações se dão nas estacas 6 e 7; se, entretanto, o solo for considerado, as reações serão mais intensas nas estacas 1, 4, 9 e 12.

Nos modelos com pilares associados, quando não se considera o solo, as tensões se concentram nas estacas 5 e 8; se, porém, se considerar o solo, as tensões se concentrarão nas estacas 1, 4, 9 e 12.

Nos modelos com a presença do solo, o parâmetro altura se torna influente ao se analisar o valor das reações transmitido para o solo. Já o f_{ck} e o tipo de geometria do pilar não influenciam nos valores desse resultado.

A respeito do deslocamento das estacas centrais, o f_{ck} não influenciou significativamente. O aumento da altura dos blocos provocou uma diminuição dos deslocamentos. Alterando-se a geometria do pilar, nos blocos com a altura de 54 cm, observaram-se maiores deslocamentos.

O deslocamento do pilar não sofreu muitas alterações nos seus valores ao se alterar o f_{ck} . Ao aumentar a altura do bloco, o deslocamento do pilar diminuiu. Os resultados do deslocamento no pilar foram maiores nos modelos com pilar retangular. A consideração do solo influenciou significativamente nos valores de deslocamento do pilar, tendo maiores resultados nos blocos com a presença do solo.

No deslocamento da face inferior do bloco, o f_{ck} também não interferiu de forma significativa. A altura do bloco é inversamente proporcional ao deslocamento, pois, conforme se aumentou a altura, os valores de deslocamento dos blocos diminuiram. Em se alterando a geometria do pilar, ocorreu uma maior influência nos resultados nos blocos de menor altura, situação em que os deslocamentos são maiores nos modelos com pilares associados. A consideração do solo impactou muito nos resultados de deslocamento dos blocos, sendo o parâmetro que influenciou de maneira mais efetiva nos resultados.

Em relação às tensões de compressão, ao aumentar o f_{ck} , os valores de compressão diminuem, havendo uma redução maior nos modelos com presença do solo. Ao aumentar a altura do bloco, as tensões de compressão diminuem. Apenas quando se analisou o corte transversal é que se constatou que as tensões máximas de compressão diminuiram com a variação da altura.

Em relação ao tipo de pilar, os maiores valores de compressão se deram nos modelos com pilares associados. Já nos cortes longitudinais e transversais, os maiores valores de compressão foram nos blocos com pilares retangulares. Isso se deu no lugar onde foi feito o corte, que era situado no meio do bloco. As tensões de compressão foram maiores nos modelos com a consideração do solo.

Sobre as tensões de tração, ao aumentar o f_{ck} , não se provocou uma grande influência nos valores das tensões de tração. Ao se aumentar a altura, os valores dessas tensões diminuiram. Os blocos com pilar retangular tiveram valores maiores de tensões de tração, quando comparados aos blocos com pilares associados. Os blocos modelados com a influência do solo apresentaram valores maiores de tensões de tração. Assim, conclui-se que, para blocos cujas estacas apresentem muita resistência de ponta, é fundamental que o cálculo das reações das estacas seja realizado por um processo tridimensional.

Após essas análises, pode-se afirmar que a influência do solo e a altura do bloco são fatores relevantes no comportamento estrutural dos blocos. Dessa maneira, serão realizados ensaios experimentais, variando-se a altura e considerando-se a presença do solo.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

Financiamento

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), processo n. TEC-APQ-02184-17.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Nota

Os resultados deste trabalho são oriundos da dissertação de mestrado de Danielle Brandão de Souza, disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.504>.

Contribuições ao artigo

SOUZA, D. B.: Concepção ou desenho do estudo/pesquisa. DELALIBERA, R. G.: análise e/ou interpretação dos dados. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills: ACI Concrete, 2019.

ALONSO, U. R. **Exercícios de fundações**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2019.

AOKI, N.; VELLOSO, D. A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. *In*: PAN AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING, 5., 1975, Buenos Aires. **Anais [...]**. Buenos Aires: ISSMFE, 1975. p. 367-376.

CEB – COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 2010**: Final Draft. Switzerland: FIB, 2012. v. 1.

CPH – COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. **EHE-08**: Instrucción de hormigón estructural. Madrid: Ministerio de Fomento, 2011. (Serie Normativas).

DELALIBERA, R. G. **Análise numérica e experimental de blocos de concreto armado sobre duas estacas submetidos à ação de força centrada e excêntrica**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FRIAS, P. H. A.-A.; BAHIA, G. A. D.; MOTA, N. M. B.; PEREIRA, T. M. Modelagem de superfícies para análise de estabilização de recalques na perspectiva da interação solo estrutura. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 1613-1628, jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n1-111>.

FUSCO, P. B. **Técnicas de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1994.

MENDONÇA, F. C. **Dimensionamento de blocos de coroamento sobre estacas metálicas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/29623>. Acesso em: 7 ago. 2024.

OLIVEIRA, D. S.; BARROS, R.; GIONGO, J. S. Six pile caps reinforced concrete: numerical simulation and design by the strut and tie method. **Revista Ibracon de Estrutura e Materiais**, v. 7, n. 1, p. 1-23, feb. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952014000100002>.

RASI, J. R.; SERAFIM, J. A.; MAZER, W.; BROETTO, J. F. Análise das reações nas estacas em bloco de concreto considerando a interação solo-estrutura. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 6, p. 41410-41425, jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-616>.

RESENDE, J. C. **Análise numérica de blocos sobre duas estacas com variações das seções dos pilares, das rigidezes dos blocos e taxas de armadura dos pilares**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.68>.

SILVA, R. C.; GIONGO, J. S. **Modelos de bielas e tirantes aplicados a estruturas de concreto armado**. São Carlos: EESC/USP, 2000.

SOUSA, G. F. **Análise numérica de blocos sobre duas estacas considerando o atrito lateral entre as estacas e o solo**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.62>.

SOUZA, D. B. **Análise numérica de blocos sobre estacas considerando a influência do solo**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.504>.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: FALCONI, F.; CORRÊA, C. N.; ORLANDO, C.; SCHIMDT, C.; ANTUNES, W. R.; ALBUQUERQUE, P. J.; HACHICH, W.; NIYAMA, S. (org.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 211-226.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações profundas**. Volume 2. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.