

Análise numérica de blocos sobre doze estacas: estudo de caso

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), Brasil

* autor correspondente

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 incidentes atuantes e as fundações disponíveis na localidade na região. Blocos de coroamento ou blocos sobre estacas, têm a função de transmitir as ações do pilar para as estacas, e por serem um elemento que não permite inspeção visual, é importante conhecer seu comportamento em serviço e na iminência da ruptura, para poder dimensioná-lo de forma eficiente e obter o melhor desempenho. Este trabalho realizou um estudo de caso de blocos sobre doze estacas com pilares associados, comparando com 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, e pode-se avaliar qual a porcentagem da carga nos pilares, é transferida para o solo na região da 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 actions acting and the foundations available in the locality in the region. Pile caps have the function of transmitting the actions of the column to the piles, and because they are an element that does not allow visual inspection, it is important to know their behavior in service and in the imminence of rupture, to be able to dimension them efficiently and obtain the best performance. This paper conducted a case study of twelve pile caps with associated columns, comparing 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 presence or absence of soil and the characteristic compressive strength of the concrete. As results, the reactions in the piles, the vertical displacements in the column, in the inferior face of the pile cap and in the tip of the central piles and the compressive and tensile stresses were obtained, and it was possible to evaluate which percentage of the load in the columns was transferred to the soil in the region of the block/soil interface.

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

1. Introdução

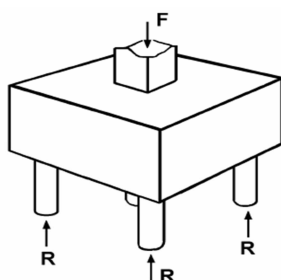
Nas edificações, existe um elemento que tem a função de transferir as ações atuantes para solo resistente, que é denominado de fundação. O tipo de fundação a ser utilizado deve ser escolhido considerando o tipo de solo, a topografia da região, condições econômicas, as ações incidentes, as fundações disponíveis 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. A primeira transmite as cargas por pressões distribuídas na sua base. Já na fundação profunda, as cargas são transmitidas por sua superfície lateral

ou pela base, ou por ambos. Um tipo de fundação profunda muito utilizado são as estacas. Elas são utilizadas 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 utilize 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 na iminência da 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

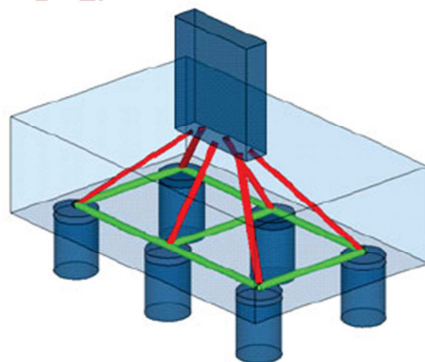


Fonte: Delalibera (2006)

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 representação dos campos de tensões de um elemento submetido ao Estado Limite Último (E.L.U.). 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, com a Figura 2 representando 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. Portanto, esse assunto se torna interessante para ser abordado em várias pesquisas futuras, visto que existem vários fatores possíveis a serem analisados.

O trabalho possuiu como objetivo realizar um estudo de caso de blocos sobre estacas com pilares associados, comparando com modelos com pilar equivalente, através da análise de modelagem computacional, considerando que os materiais com comportamento elástico e linear e verificar qual a porcentagem da carga do pilar é distribuída para o solo no contato na interface com o bloco, como

analisado por RASI *et al.* (2020). Optou-se inicialmente pela modelagem elástica e linear, para ter-se 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. Na seção 4 é apresentada a análise dos resultados e por fim, as considerações finais na seção 5.

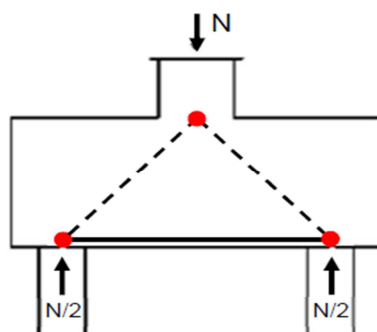
2. Referencial teórico

Nessa seção são expostas as principais definições sobre os blocos de coroamento e apresentadas as principais recomendações normativas sobre 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, que é composta pelas bielas (que representam os campos de compressão) pelos tirantes (que representam os campos de tração) e pelos nós, que tem 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 os modelos 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), a escolha do modelo mais adequado, para então dimensionar as bielas e tirantes, verificar as regiões nodais e detalhar 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, gera 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 acompanhar o desempenho da edificação através dos monitoramentos de recalque, que devem ser iniciados na fase construtiva e permanecer até a vida útil da edificação. A importância de iniciar na fase construtiva se dá devido ao maior entendimento global do comportamento da edificação e 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 (1996).

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

sendo K um parâmetro que varia de acordo com o tipo de solo, que pode ser determinado utilizando a Tabela 1. O coeficiente α é um parâmetro que relaciona a resistência de ponta da estaca com o N_{SPT} , 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 (1996), que sugere valores baseados no N_{SPT} , demonstrado na Tabela 3.

Tabela 1 – Valores propostos para o coeficiente K

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

Fonte: adaptado de Teixeira (1993) *apud* Sousa (2019)

Tabela 2 – Valores do parâmetro α

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

Fonte: adaptado de Trofiemenkov (1974) *apud* Sousa (2019)

Tabela 3 – Estimativa do módulo de deformabilidade do solo

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

Fonte: adaptado de Teixeira e Godoy (1996)

2.3 Recomendações normativas

Nessa 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 (2014) classifica os blocos como rígidos ou flexíveis. Para que o bloco seja considerado rígido, a Equação 2 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 flexível.

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

Na norma ABNT NBR 6118 (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. Se caracterizam também por forças transmitidas do pilar para as estacas por bielas de compressão e 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”.

Na norma NBR 6118 (ABNT, 2014) é permitido o cálculo dos blocos de concreto através 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 deve ser disposta 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 a verificação ao cisalhamento.

2.3.2 Norma ACI 318-19

A norma americana ACI 318-19 (2019) permite o cálculo e o dimensionamento de blocos sobre estacas por meio da teoria de vigas, em que a seção crítica é dimensionada à flexão e verificada ao cisalhamento, para blocos flexíveis, e modelo de bielas e tirantes para 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 (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 (2011), os blocos sobre estacas podem ser classificados em rígidos e flexíveis, com um critério que depende da altura e da distância $V_{máx}$, que é a distância horizontal entre a face do pilar e o eixo da estaca. O bloco é considerado rígido se o valor de $V_{máx}$ for menor que duas vezes sua altura, caso contrário é considerado flexível.

3. Método da pesquisa

Foram modelados blocos sobre doze estacas, inicialmente sem o solo e posteriormente considerando 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 de estacas com ponta em rocha e ao longo do fuste, ter a existência 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

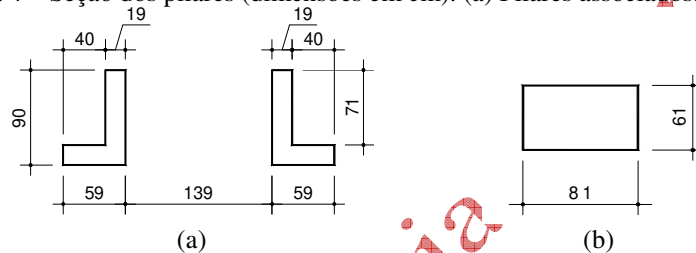
equivalente aos dois pilares associados, que possuem formato de “L”. Para realizar a análise e o estudo em questão, variaram-se parâmetros:

- presença ou não do solo, em que foi utilizado 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 em 54 cm, 110 cm e 165 cm.

A análise numérica foi realizada por meio da modelagem utilizando a ferramenta computacional ANSYS®, que é baseado 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, existente na biblioteca do Ansys. Não foi considerado atrito entre as estacas e solo, sendo os nós modelados com aderência perfeita. Para diferenciar o material do bloco e do solo, modificou-se o módulo de elasticidade longitudinal dos materiais.

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

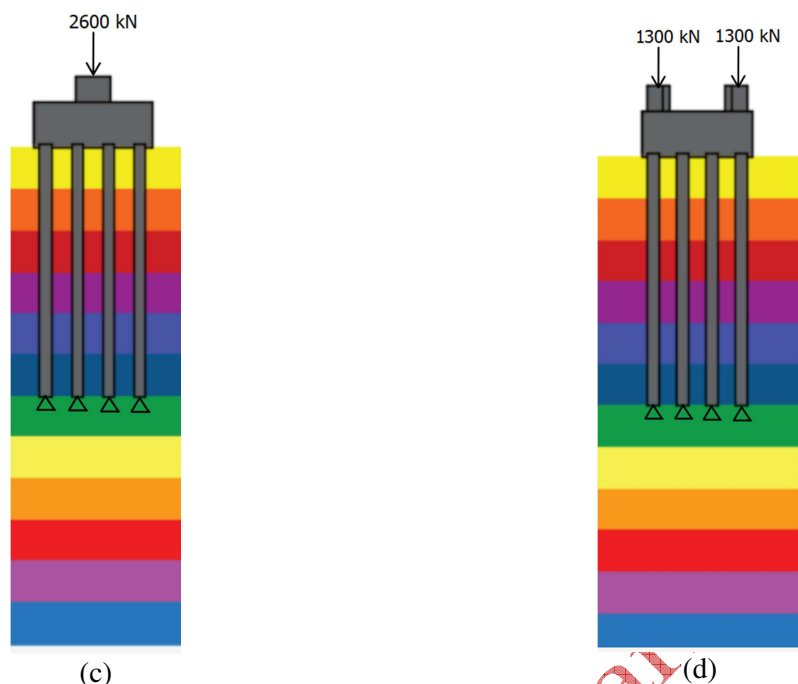
Figura 4 – Seção dos pilares (dimensões em cm). (a) Pilares associados. (b) Pilar retangular



Fonte: dados da pesquisa (2022)

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 (2022)

Tabela 4 – Parâmetros do solo utilizados na modelagem

Profundidade	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

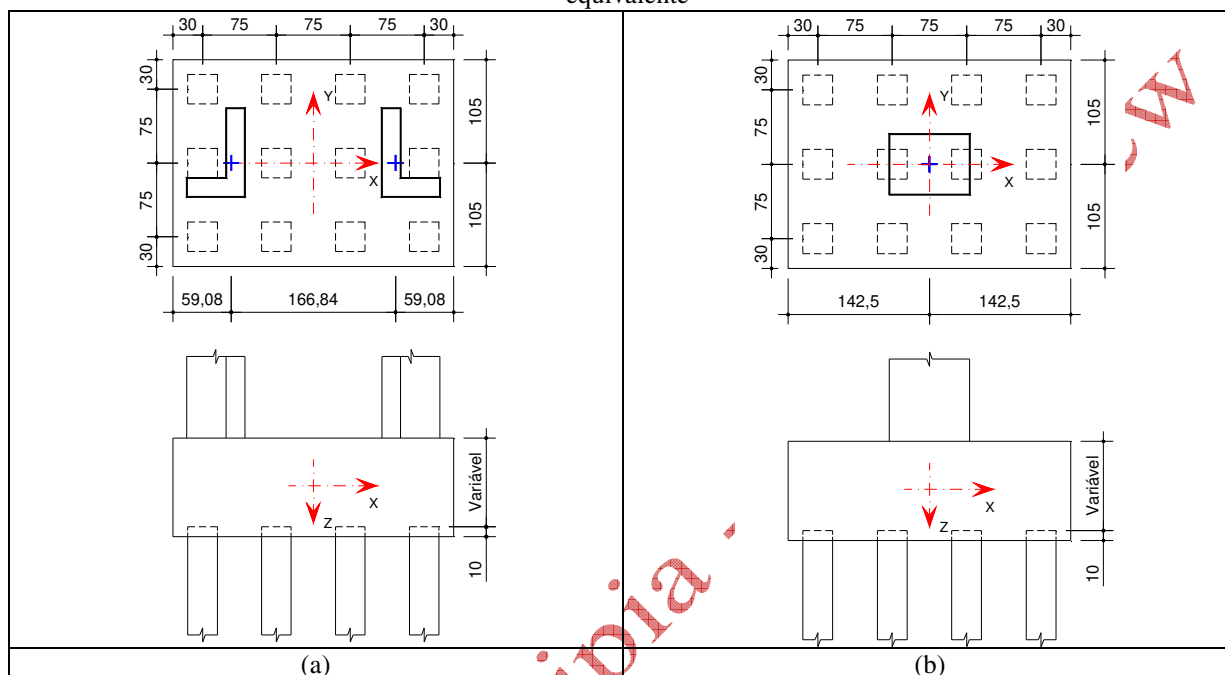
Fonte: dados da pesquisa (2022)

As características do solo foram definidas de acordo com uma sondagem na região do município de Uberlândia, estado de Minas Gerais (MG), em que 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 e possuem uma dimensão de 29,5 cm de lado; e 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 existente no bloco, ou seja, doze estacas. Portanto, adotou-se 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 a porcentagem da carga aplicada nos pilares, são distribuídas 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. 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 e dos que possuem pilar equivalente, respectivamente.

Figura 6 – Dimensões dos blocos (medidas em cm). (a) Blocos com pilares associados. (b) Blocos com pilar equivalente



Fonte: dados da pesquisa (2022)

Após todas as considerações apresentadas anteriormente sobre os modelos analisados, foram nomeados os blocos. Todos os blocos iniciaram com a letra B que é representativo 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 foram considerados 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

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

Fonte: dados da pesquisa (2022)

4. Análise de resultados

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

4.1 Reação das estacas

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.

Tabela 6 – Resultado das reações das estacas em kN

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	

BPrH3 C45	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	
BPrH1S C25	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
BPrH1S C35	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
BPrH1S C45	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
BPrH2S C25	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
BPrH2S C35	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
BPrH2S C45	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
BPrH3S C25	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
BPrH3S C35	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
BPrH3S C45	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
BPaH1 C25	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	
BPaH1 C35	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	
BPaH1 C45	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	
BPaH2 C25	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	
BPaH2 C35	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	
BPaH2 C45	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	
BPaH3 C25	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	
BPaH3 C35	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	
BPaH3 C45	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	
BPaH1 SC25	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
BPaH1 SC35	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
BPaH1 SC45	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
BPaH2 SC25	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
BPaH2 SC35	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
BPaH2 SC45	273,98	170,07	170,07	273,98	143,74	77,647	77,647	143,74	273,94	170,02	170,02	273,94	2218,79 4	381,206
BPaH3 SC25	252	223,16	223,16	252	123,92	160,33	160,33	123,92	251,96	223,13	223,13	251,96	2469	131
BPaH3 SC35	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
BPaH3 SC45	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

Est: Estaca

Fonte: dados da pesquisa (2022)

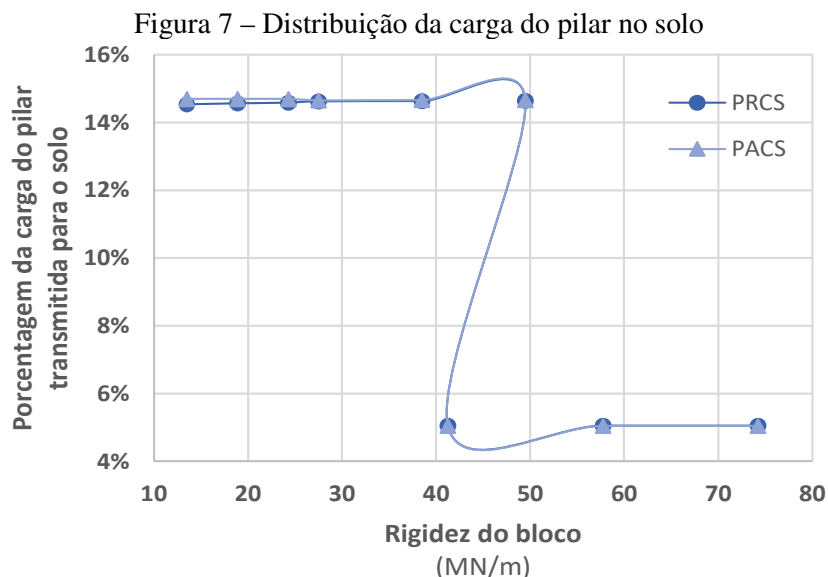
Na Tabela 7, apresentam-se as porcentagens de reações transmitidas para o solo em relação à força atuante total nos modelos com a presença do solo. Observa-se por meio da Figura 6, que os blocos com menor rigidez transmitem maior parcela do carregamento do pilar para o solo na interface bloco/solo. Também se observa que não há influência entre os modelos com pilares associados e o 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

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%

Fonte: dados da pesquisa (2022)



Fonte: dados da pesquisa (2022)

Observou-se que a alteração da rigidez do bloco, 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 e nas estacas centrais foram maiores nos modelos com f_{ck} de 25 MPa. Isso indica que os 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 alterando-se 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 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 os blocos com pilar retangular e associados. Portanto, a variação da geometria do pilar, não influenciou 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 uniforme 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)

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

Fonte: dados da pesquisa (2022)

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 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.

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 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.

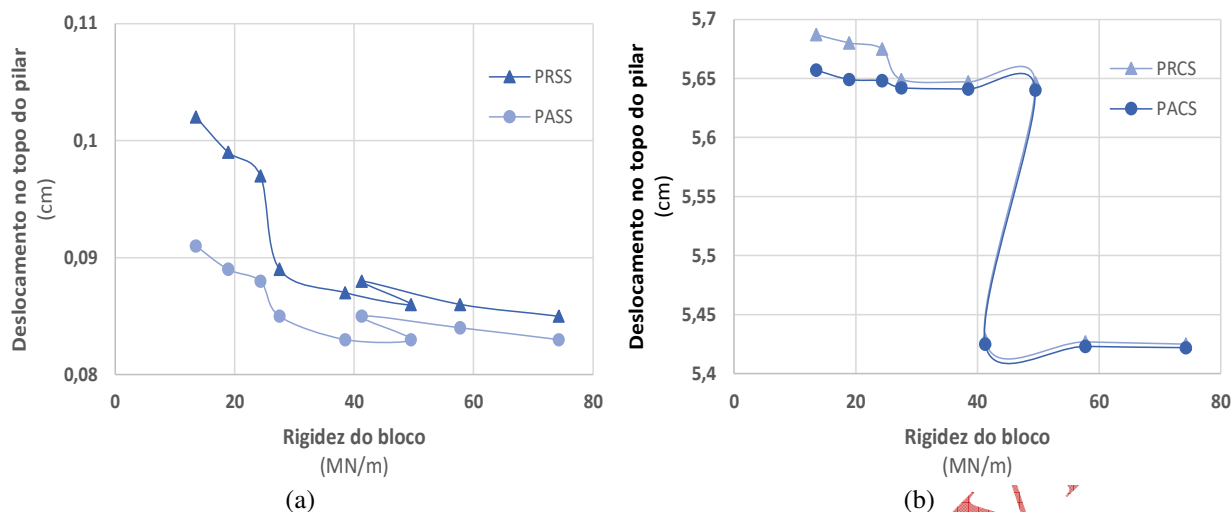
Tabela 9 – Deslocamentos verticais no topo pilar obtidos numericamente (em cm)

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

Desloc.: Deslocamento
Fonte: dados da pesquisa (2022)

A Figura 8 indica a relação dos deslocamentos no topo do pilar, em função das rigidezes dos blocos. Constatou-se que os blocos maiores rigidezes apresentam menor deslocamentos.

Figura 8 – Deslocamentos nos topos dos pilares. (a) Bloco sem solo. (b): Bloco com solo



PRSS: bloco com pilar retangular equivalente sem solo. PA: bloco com pilar associado sem solo. PRCS: bloco com pilar retangular equivalente com solo. PACS: bloco com pilar associado com solo
 Fonte: dados da pesquisa (2022)

Nos 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. Portanto, a variação do f_{ck} não influenciou nesses resultados. Ao se alterar 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.

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 afirmar que o solo é um parâmetro influente nesse resultado. Na Tabela 10, estão presentes os resultados de deslocamento na face inferior do bloco.

Tabela 10 – Deslocamento na face inferior do bloco (em cm)

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

Desloc.: Deslocamento
 Fonte: dados da pesquisa (2022)

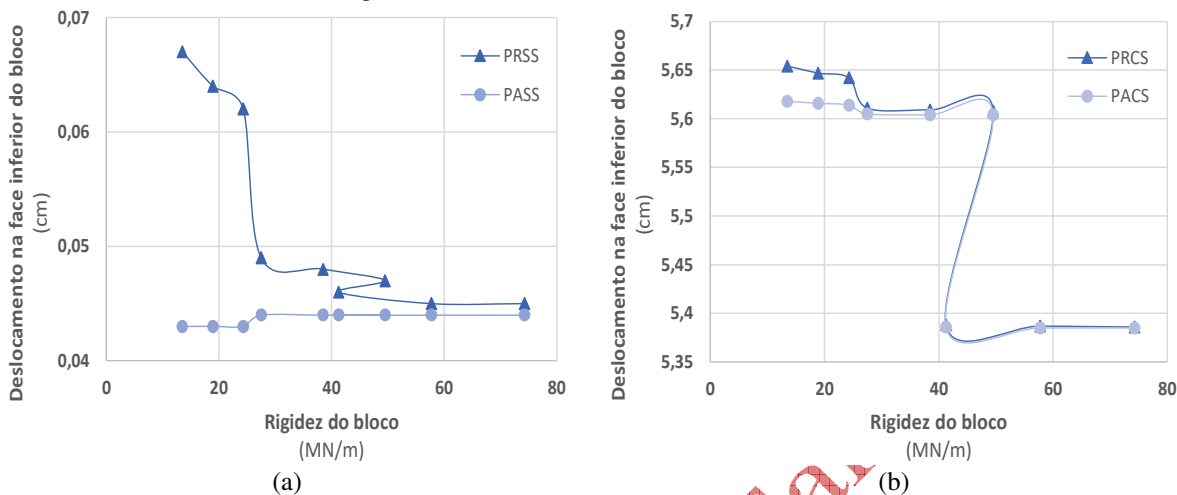
A variação do f_{ck} não interferiu significativamente nos valores de deslocamento da face inferior do bloco. Nos modelos sem a presença do solo não há uma diferença significativa nos valores ao se alterar a altura. Nos modelos com a presença do solo, os valores de deslocamento são menores nos modelos 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 dos 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 foi cerca de 85 a 125 vezes maior nos blocos com a presença de solo em relação aos modelos sem a presença do solo.

Na Figura 9 apresentam-se os deslocamentos na face inferior dos blocos, em função das rigidezes dos mesmos.

Figura 9 – Deslocamentos nas bases dos blocos



PR: bloco com pilar retangular equivalente; PA: bloco com pilar associado
 Fonte: dados da pesquisa (2022)

4.3 Compressão

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

Tabela 11 – Tensões de compressão nos modelos numéricos (em MPa)

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

Comp.: Compressão
 Fonte: dados da pesquisa (2022)

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

Pode-se observar que os valores de tensões de compressão diminuíram ao 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 utilizar os pilares associados. Pode-se perceber que as tensões foram maiores nos modelos com o solo, sendo que os valores diminuíram conforme se aumenta 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)

Blocos	Comp.	Blocos	Comp.	Blocos	Comp.	Blocos	Comp.
--------	-------	--------	-------	--------	-------	--------	-------

	Long.		Long.		Long.		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

Comp.: Compressão. Long.: Longitudinal
 Fonte: dados da pesquisa (2022)

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 compressão longitudinal. Pode-se perceber que nos modelos sem a presença do solo os valores de compressão longitudinal diminuíram conforme se aumenta 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 e os maiores valores de tensões foram encontrados nos modelos com menor altura. Nos blocos com pilares associados as tensões de compressão longitudinal foram menores 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 no modelo com pilares associados e altura média e máxima foram maiores quando há 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)

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

Comp.: Compressão. Transv.: Transversal
 Fonte: dados da pesquisa (2022)

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. Pode-se perceber que a influência maior da variação da altura se deu nos modelos com presença do solo. O valor de compressão cresceu ao aumentar a altura, portanto são grandezas diretamente proporcionais.

Ao modificar o tipo da geometria do pilar, pode-se perceber 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. Pode-se observar 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

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.

Tabela 14 – Tensões de tração na direção x (em MPa)

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

Fonte: dados da pesquisa (2022)

Tabela 15 – Tensões de tração longitudinal na direção x (em MPa)

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

Long.: Longitudinal

Fonte: dados da pesquisa (2022)

Tabela 16 – Tensões de tração transversal na direção x (MPa)

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

Transv: Transversal

Fonte: dados da pesquisa (2022)

Pode-se perceber que em todos os modelos, ao se alterar a geometria do pilar retangular para associado, os valores de tensões de tração na direção X diminuiram. 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, pode-se perceber que ao se considerar a presença do solo os valores de tensões de tração na direção X foram maiores. Principalmente os modelos com a maior altura. A Tabela 15 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. Pode-se observar que em todos os modelos ocorreu uma diminuição dos valores das tensões de tração conforme se altera a altura. Portanto, a tração na direção x e a altura são inversamente proporcionais, ao aumentar a altura os valores de tensões diminuíram.

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

Nos modelos com a menor altura dos blocos, ocorreu a maior redução nos valores de tensões. Observou-se através da análise desses resultados, que na maioria dos modelos 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 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 diminuem, portanto são inversamente proporcionais. Exceto nos modelos com pilares associados e presença do solo.

É possível observar que comparando os blocos com pilar retangular e os blocos com pilares associados, os valores das tensões de tração transversal na direção x são bem maiores nos modelos com pilar retangular. Pode-se perceber que os valores de tensões de tração transversal são maiores quando tem a presença do solo na maioria dos modelos. Exceto nos modelos com pilares associados e alturas mínima e média, em que os valores são maiores nos blocos sem a presença do solo.

4.4 Tração z

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

Tabela 17 – Tensões de tração na direção z (MPa)

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

Fonte: dados da pesquisa (2022)

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. É possível perceber que 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 altura mínima e média os valores de tensões de tração na direção z foram maiores quando se utiliza pilar retangular. Nos modelos sem presença de solo e altura máxima, os valores de tração foram maiores ao se considerar pilares associados. Já nos blocos que

tiveram a consideração do solo, com a altura mínima, os valores maiores se dão nos modelos de pilar retangular, e nas outras alturas os valores de tensão maiores foram para os modelos de pilares associados. Observando a influência da presença ou não do solo, pode-se perceber que em todos os modelos os maiores valores de tensão de tração na direção z se dão ao 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 (MPa)

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

Long.: longitudinal
Fonte: dados da pesquisa (2022)

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

Observou-se 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 diminui. Observando os resultados, pode-se perceber que ao considerar o solo nos modelos, os valores das tensões de tração longitudinal foram maiores do que quando não considera a presença do solo. A Tabela 19 apresenta os resultados de tensões de tração transversal na direção z.

Tabela 19 – Tensões de tração transversal na direção z (MPa)

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

Transv: Transversal
Fonte: dados da pesquisa (2022)

Pode-se perceber que ao se aumentar o f_{ck} , os valores das tensões de tração também aumentaram, sendo essas grandezas diretamente proporcionais, contudo pouco significativas.

Pode-se observar que ao 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 presença de solo, 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 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 tiveram valores maiores de reações nas estacas 6 e 7, e nos blocos com pilares associados e a 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.

Já ao considerar o solo, pode-se perceber que houve mudança na concentração das reações das estacas, sendo que nos modelos com pilares retangulares, quando não se considera o solo, as maiores reações se dão nas estacas 6 e 7 e ao se considerar o solo, nas estacas 1, 4, 9 e 12. E nos modelos com pilares associados, quando não se considera os solos, as tensões se concentram nas estacas 5 e 8 e ao se considerar o solo, nas estacas 1, 4, 9 e 12.

Nos modelos com a presença do solo, pode-se perceber que o parâmetro altura se torna influente ao 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 observou-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 aumentou-se a altura, os valores de deslocamento dos blocos diminuíram. Alterando a geometria do pilar, ocorreu uma maior influência nos resultados nos blocos de menor altura, 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, tendo 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, que as tensões máximas de compressão diminuíram 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 é 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 provocou uma grande influência nos valores das tensões de tração. Ao aumentar a altura, os valores dessas tensões diminuíram. Os blocos com

pilar retangular tiveram valores maiores 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 onde as 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 os 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

Esse trabalho foi financiado pela FAPEMIG, processo n. TEC-APQ-02184-17.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses. Os autores declaram que 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>.

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, 2014.

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. PAN AMERICAN CSMFEE, Buenos Aires, 1975.

COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. **EHE-08**: Instrucción de hormigón estructural. Madrid: CPH, 2011.

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

DELALIBERA, R. G. **Análise numérica e experimental de blocos de concreto armado sobre duas estacas submetidos à ação de força centrada e excêntrica**. Tese (Doutorado) -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**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/2962>. Acesso em: 12 nov. 2022.

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 de pilares, das rigidezes dos blocos e taxas de armadura dos pilares**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27103>. Acesso em: 12 nov. 2022.

SOUSA, G. F. **Análise numérica de blocos sobre duas estacas considerando o atrito lateral entre as estacas e solo**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27051>. Acesso em: 12 nov. 2022.

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

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** – Fundações: Teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Pini 1996.

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

Revista Principia - Early View