



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**DANIELLE BRANDÃO DE SOUZA**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE BLOCOS SOBRE ESTACAS  
CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DO SOLO**

Uberlândia, 2022

**DANIELLE BRANDÃO DE SOUZA**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE BLOCOS SOBRE ESTACAS  
CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DO SOLO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas e Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera

Uberlândia, 2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S729 Souza, Danielle Brandão de, 1996-  
2022 Análise numérica de blocos sobre estacas considerando  
a influência do solo [recurso eletrônico] / Danielle  
Brandão de Souza. - 2022.

Orientador: Rodrigo Gustavo Delalibera .  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.504>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. , Rodrigo Gustavo Delalibera,  
1976-, (Orient.). II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. III.  
Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y - Bairro Santa Monica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: 34 3239-4137 - www.feciv.ufu.br/ppgec - posgradcivil@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 283, PPGEC				
Data:	29 de agosto de 2022	Hora de início:	09:00 h	Hora de encerramento:	11:15 h
Matrícula do Discente:	12012ECV002				
Nome do Discente:	Danielle Brandão de Souza				
Título do Trabalho:	Análise numérica de blocos sobre estacas considerando a influência do solo				
Área de concentração:	Construção Civil, Estruturas e Geotecnia				
Linha de pesquisa:	Estruturas e Geotecnia				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estacas metálicas: análise da ligação das estacas com o bloco				

Reuniu-se, em sessão pública pela plataforma *Google Meet* provida pela Universidade Federal de Uberlândia, na sala virtual <https://meet.google.com/jjg-cjm-nixm>, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Alexandre Rossi – UFU, José Neres da Silva Filho – UFRN e Rodrigo Gustavo Delalibera – UFU orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Rodrigo Gustavo Delalibera, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu a discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

#### Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Gustavo Delalibera, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/09/2022, às 11:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Rossi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/09/2022, às 11:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Neres da Silva Filho, Usuário Externo**, em 08/09/2022, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3891636** e o código CRC **7D212CEE**.

*Dedico este trabalho a meus pais, Creusa e Enézio.*

*Meus irmãos, Daniel e Isabelle.*

*Meu namorado, Thiago.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me abençoado e me guiado sempre, permitindo que eu concluísse mais essa etapa.

Agradeço também aos meus pais, Creusa e Enézio, por sempre me apoiarem a conquistar meus objetivos e meus sonhos. Aos meus irmãos, Isabelle e Daniel, pelo apoio de sempre. Ao meu namorado, Thiago, por sempre estar comigo em todos os momentos, me apoiando e incentivando sempre. Sem vocês nada disso seria possível.

Ao meu orientador, Rodrigo Gustavo Delalibera, pela orientação e pelo conhecimento transmitidos.

Aos meus colegas de mestrado, Mayuma e Silvio, pelo companheirismo e pela troca de conhecimentos durante esse período. E a todos os meus professores da Universidade Federal de Uberlândia que se dispuseram a compartilhar seus conhecimentos, de forma a contribuir para a minha formação.

## RESUMO

Os elementos de fundação possuem 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 e as fundações disponíveis na localidade. Blocos de coroamento ou blocos sobre estacas têm a função de transmitir as ações do pilar para as estacas. Por ser um elemento que não permite inspeção visual, é muito importante conhecer a fundo seu comportamento em serviço, para poder dimensioná-lo de forma mais eficiente e se obter o melhor desempenho do elemento. Neste contexto, este trabalho teve por objetivo realizar um estudo de caso de blocos sobre estacas com pilares associados, comparando com modelos com pilar equivalente, por meio de modelagem computacional, considerando que os materiais terão comportamento elástico e linear. Esperou-se analisar 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. Para isso, foram estudados 36 modelos de blocos sobre 12 estacas, variando alguns parâmetros, sendo eles, o tipo de pilar, a altura, a presença ou não de solo e a resistência característica à compressão do concreto. As principais conclusões foram que os blocos com as maiores alturas tiveram os menores valores de deslocamento e tensões de compressão e tração e os blocos com o pilar equivalente tiveram maiores valores de deslocamentos e tensões em comparação aos blocos com pilares associados.

**Palavras-chave:** blocos sobre estacas, fundação, estrutura.

## ABSTRACT

The foundation elements have the function of transferring the actions of the superstructure to the ground. To choose the ideal type of foundation, one must consider the type of soil, the topography of the region, economic conditions, the incidental actions and the foundations available in the locality. Crown blocks or blocks on piles have the function of transmitting the actions of the column to the piles. As it is an element that does not allow visual inspection, it is very important to know its behavior in service in depth, in order to be able to dimension it more efficiently and obtain the best performance from the element. This work aimed to carry out a case study of blocks on piles with associated columns, comparing them with models with equivalent column, through computational modeling, considering that the materials will have elastic and linear behavior. It was expected to analyze the reactions in the piles, the vertical displacements in the column, in the lower face of the block and in the tip of the central piles and the tensions of compression and tension. For this, 36 models of blocks on 12 piles were studied, varying some parameters, being them, the type of column, the height, the presence or not of soil and the characteristic compressive strength of the concrete. The main conclusions were that the blocks with the highest heights had the lowest values of displacement and compressive and tensile stresses and the blocks with the equivalent column had higher values of displacements and stresses compared to blocks with associated columns.

**Keywords:** blocks on piles, foundation, structure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Bloco sobre estacas.....	20
Figura 2 - Bloco sobre estacas.....	21
Figura 3 - Arranjos de armadura para bloco sobre 4 estacas.....	26
Figura 4 - Arranjos de armadura para bloco sobre 3 estacas.....	26
Figura 5 - Blocos ensaiados por Adebar, Kuchma e Collins (1990).....	27
Figura 6 - Dimensões dos blocos analisados.....	35
Figura 7- Posições da estaca sob o bloco.....	36
Figura 8 - Modelo estrutural de blocos analisados.....	44
Figura 9 - Malha de elementos de volume e da armadura.....	45
Figura 10- Dimensões do bloco (em cm).....	46
Figura 11 - Exemplo de modelo de bielas e tirantes para bloco sobre duas estacas.....	50
Figura 12 - Bloco com pilar retangular.....	53
Figura 13 - Bloco com pilares associados em “L”.....	53
Figura 14 - Bloco com pilar retangular e presença de solo.....	54
Figura 15 - Bloco com pilares associados em “L” e presença do solo.....	54
Figura 16 – Sondagem analisada.....	56
Figura 17 – Vista longitudinal dos blocos.....	57
Figura 18 – Seção dos pilares associados.....	58
Figura 19 – Seção do pilar equivalente.....	59
Figura 20 – Bloco em planta com pilares associados.....	60
Figura 21 – Dimensões do bloco com pilares associados (medidas em cm).....	60
Figura 22 – Dimensões do bloco com pilar equivalente (medidas em cm).....	61
Figura 23 - Elemento finito SURF154.....	62
Figura 24 - Elemento Finito TARGE170.....	63
Figura 25 - Elemento Finito CONTAC174.....	63
Figura 26 - Elemento Finito SOLID186.....	64
Figura 27 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular e altura de 54 cm (kN).....	67
Figura 28 - Reação das estacas - Blocos com pilar retangular e altura de 110 cm (kN).....	67
Figura 29 - Reação das estacas - Blocos com pilar retangular e altura de 165 cm (kN).....	67
Figura 30 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular, altura de 54 cm e presença do solo (kN).....	67
Figura 31 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular, altura de 110 cm e presença do solo (kN).....	68
Figura 32 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular, altura de 165 cm e presença do solo (kN).....	68
Figura 33 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e altura de 54 cm (kN).....	68
Figura 34 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e altura de 110 cm (kN).....	68
Figura 35 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e altura de 165 cm (kN).....	69
Figura 36 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados, altura de 54 cm e presença do solo (kN).....	69
Figura 37 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados, altura de 110 cm e presença do solo (kN).....	69
Figura 38 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados, altura de 165 cm e presença do solo (kN).....	69
Figura 39 – Porcentagem transferida para o solo - Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa.....	70

Figura 40 - Porcentagem transferida para o solo - Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa .....	70
Figura 41 – Porcentagem transferida para o solo – Blocos com $f_{ck}$ de 45 MPa.....	71
Figura 42 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular e $f_{ck}$ de 25 MPa (kN) .....	72
Figura 43 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular e $f_{ck}$ de 35 MPa (kN) .....	72
Figura 44 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular e $f_{ck}$ de 45 MPa (kN) .....	72
Figura 45 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular, $f_{ck}$ de 25 MPa e presença do solo (kN).....	72
Figura 46 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular, $f_{ck}$ de 35 MPa e presença do solo (kN).....	73
Figura 47 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular, $f_{ck}$ de 45 MPa e presença do solo (kN).....	73
Figura 48 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e $f_{ck}$ de 25 MPa (kN) .....	73
Figura 49 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e $f_{ck}$ de 35 MPa (kN).....	73
Figura 50 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e $f_{ck}$ de 45 MPa (kN) .....	74
Figura 51 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados, $f_{ck}$ de 25 MPa e presença do solo (kN).....	74
Figura 52 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados, $f_{ck}$ de 35 MPa e presença do solo (kN).....	74
Figura 53 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados, $f_{ck}$ de 45 MPa e presença do solo (kN).....	74
Figura 54 - Porcentagem transferida para o solo - Blocos com altura de 54 cm (kN) .....	75
Figura 55 - Porcentagem transferida para o solo - Blocos com altura de 110 cm (kN) .....	75
Figura 56 - Reação transferida para o solo - Blocos com altura de 165 cm.....	76
Figura 57 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular (kN) .....	76
Figura 58 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular e presença do solo (kN).....	77
Figura 59 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados (kN).....	77
Figura 60 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e presença do solo (kN).....	77
Figura 61 – Porcentagem transferida para o solo - Blocos com pilar retangular .....	78
Figura 62 – Reação transferida para o solo - Blocos com pilares associados .....	78
Figura 63 – Deslocamento nas estacas centrais – Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa (m).....	80
Figura 64 – Deslocamento nas estacas centrais – Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa (m).....	80
Figura 65 – Deslocamento nas estacas centrais – Blocos com $f_{ck}$ de 45 MPa (m).....	80
Figura 66 – Deslocamento nas estacas centrais – Blocos com altura de 54 cm (m) .....	81
Figura 67 - Deslocamento nas estacas centrais - Blocos com altura de 110 cm (m).....	81
Figura 68 – Deslocamento nas estacas centrais – Blocos com altura de 165 cm (m) .....	81
Figura 69 – Deslocamento nas estacas centrais – Blocos com pilar retangular (m) .....	82
Figura 70 - Deslocamento nas estacas centrais - Blocos com pilares associados (m).....	82
Figura 71 – Deslocamento no pilar – Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa (m).....	83
Figura 72 – Deslocamento no pilar – Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa e presença do solo (m) .....	83
Figura 73 – Deslocamento no pilar – Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa (m).....	84
Figura 74 - Deslocamento no pilar - Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa e presença do solo (m) .....	84
Figura 75 – Deslocamento no pilar – Blocos com $f_{ck}$ de 45 MPa (m).....	84
Figura 76 – Deslocamento no pilar – Blocos com $f_{ck}$ de 45 MPa e presença do solo (m) .....	84
Figura 77 – Deslocamento no pilar – Blocos com altura de 54 cm (m).....	85
Figura 78 - Deslocamento no pilar - Blocos com altura de 54 cm e presença do solo (m).....	85
Figura 79 – Deslocamento no pilar – Blocos com altura de 110 cm (m).....	85
Figura 80 - Deslocamento no pilar - Blocos com altura de 110 cm e presença do solo (m)....	85

Figura 81 – Deslocamento no pilar – Blocos com altura de 165 cm (m).....	86
Figura 82 - Deslocamento no pilar - Blocos com altura de 165 cm e presença do solo (m)....	86
Figura 83 – Deslocamento no pilar – Blocos com pilar retangular (m) .....	86
Figura 84 - Deslocamento no pilar - Blocos com pilar retangular e presença de solo (m) .....	86
Figura 85 – Deslocamento no pilar – Blocos com pilares associados (m).....	87
Figura 86 - Deslocamento no pilar - Blocos com pilares associados e presença do solo (m)..	87
Figura 87 – Deslocamento no pilar – Blocos sem presença do solo (m).....	87
Figura 88 – Deslocamento no pilar – Blocos com presença do solo (m) .....	88
Figura 89 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa (m).....	89
Figura 90 - Deslocamento na face inferior do bloco - Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa e presença de solo (m).....	89
Figura 91 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa (m).....	89
Figura 92 - Deslocamento na face inferior do bloco - Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa e presença de solo (m).....	89
Figura 93 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa (m).....	90
Figura 94 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa e presença de solo (m).....	90
Figura 95 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com altura de 54 cm (m).....	90
Figura 96 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com altura de 54 cm e presença do solo (m).....	90
Figura 97 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com altura de 110 cm (m).....	91
Figura 98 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com altura de 110 cm e presença de solo (m).....	91
Figura 99 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com altura de 165 cm (m).....	91
Figura 100 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com altura de 165 cm e presença de solo (m).....	91
Figura 101 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com pilar retangular (m) .....	92
Figura 102 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com pilar retangular e presença de solo (m).....	92
Figura 103 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com pilares associados (m)..	92
Figura 104 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com pilares associados e presença de solo (m).....	92
Figura 105 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos sem presença do solo (m)....	93
Figura 106 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com presença do solo (m) ....	93
Figura 107 – Tensões de Compressão – Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa (MPa).....	94
Figura 108 – Tensões de Compressão – Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa (MPa).....	94
Figura 109 – Tensões de Compressão – Blocos com $f_{ck}$ de 45 MPa (MPa).....	95
Figura 110 – Tensões de Compressão – Blocos com altura de 54 cm (MPa).....	95
Figura 111 – Tensões de Compressão – Blocos com altura de 110 cm (MPa).....	95
Figura 112 – Tensões de Compressão – Blocos com altura de 165 cm (MPa).....	96
Figura 113 – Tensões de Compressão – Blocos com pilar retangular (MPa) .....	96
Figura 114 – Tensões de Compressão – Blocos com pilares associados (MPa).....	97
Figura 115 – Tensões de Compressão – Blocos sem presença do solo (MPa).....	97
Figura 116 – Tensões de Compressão – Blocos com presença do solo (MPa).....	98
Figura 117 - Tensões de Compressão Longitudinal - Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa (MPa) .....	99
Figura 118 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa (MPa).....	99
Figura 119 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos $f_{ck}$ de MPa (MPa).....	99

Figura 120 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos com altura de 54 cm (MPa) ..	100
Figura 121 - Tensões de Compressão Longitudinal - Blocos com altura de 110 cm (MPa)..	100
Figura 122 - Tensões de Compressão Longitudinal - Blocos com altura de 165 cm (MPa)..	100
Figura 123 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos com pilar retangular (MPa)...	101
Figura 124 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos com pilares associados (MPa)	101
.....	101
Figura 125 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos sem presença do solo (MPa) .	102
Figura 126 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos com presença do solo (MPa).	102
Figura 127 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa (MPa).....	103
Figura 128 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa (MPa).....	103
Figura 129 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com $f_{ck}$ de 45 MPa (MPa).....	104
Figura 130 - Tensões de Compressão Transversal - Blocos com altura de 54 cm (Mpa).....	104
Figura 131 - Tensões de Compressão Transversal - Blocos com altura de 110 cm.....	104
Figura 132 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com altura de 165 cm (MPa) ..	105
Figura 133 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com pilar retangular (MPa).....	105
Figura 134 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com pilares associados (MPa)	106
Figura 135 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos sem presença do solo (MPa)...	106
Figura 136 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com presença do solo (MPa)...	107
Figura 137 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa (MPa).....	108
Figura 138 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa (MPa).....	108
Figura 139 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com $f_{ck}$ de 45 MPa (MPa).....	108
Figura 140 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com altura de 54 cm (MPa) .....	109
Figura 141 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com altura de 110 cm (MPa) .....	109
Figura 142 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com altura de 165 cm (MPa) .....	109
Figura 143 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com pilar retangular (MPa).....	110
Figura 144 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com pilares associados (MPa) .....	110
Figura 145 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos sem presença do solo (MPa).....	111
Figura 146 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com presença do solo (MPa).....	111
Figura 147 - Tensões de Tração Longitudinal na Direção X - Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa	112
(MPa).....	112
Figura 148 - Tensões de Tração Longitudinal na Direção X - Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa	112
(MPa).....	112
Figura 149 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com $f_{ck}$ de 45 MPa	113
(MPa).....	113
Figura 150 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com altura de 54 cm	113
(MPa).....	113
Figura 151 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com altura de 110 cm	113
(MPa).....	113
Figura 152 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com altura de 165 cm	114
(MPa).....	114
Figura 153 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com pilar retangular	114
(MPa).....	114
Figura 154 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com pilares associados	115
(MPa).....	115
Figura 155 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos sem presença do solo	115
(MPa).....	115

Figura 156 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com presença do solo (MPa).....	116
Figura 157 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa (MPa) .....	117
Figura 158 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa (MPa) .....	117
Figura 159 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com $f_{ck}$ de 45 MPa (MPa) .....	117
Figura 160 - Tensões de Tração Transversal na Direção X - Blocos com altura de 54 cm (MPa).....	118
Figura 161 - Tensões de Tração Transversal na Direção X - Blocos com altura de 110 cm (MPa).....	118
Figura 162 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com altura de 165 cm (MPa).....	118
Figura 163 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com pilar retangular (MPa).....	119
Figura 164 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com pilares associados (MPa).....	119
Figura 165 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos sem presença do solo (MPa).....	120
Figura 166 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com presença do solo (MPa).....	120
Figura 167 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa (MPa) .....	122
Figura 168 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa (MPa) .....	122
Figura 169 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com $f_{ck}$ de 45 MPa (MPa) .....	122
Figura 170 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com altura de 54 cm (MPa).....	123
Figura 171 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com altura de 110 cm (MPa).....	123
Figura 172 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com altura de 165 cm (MPa).....	123
Figura 173 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com pilar retangular (MPa) .....	124
Figura 174 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com pilares associados (MPa).....	124
Figura 175 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos sem presença do solo (MPa) .....	125
Figura 176 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com presença do solo (MPa).....	125
Figura 177 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa (MPa).....	126
Figura 178 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com $f_{ck}$ de 35 MPa (MPa).....	126
Figura 179 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com $f_{ck}$ de 45 MPa (MPa).....	127
Figura 180 - Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z - Blocos com altura de 54 cm (MPa).....	127
Figura 181 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com altura de 110 cm (MPa).....	127
Figura 182 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com altura de 165 cm (MPa).....	128
Figura 183 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com pilar retangular (MPa).....	128

Figura 184 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com pilares associados (MPa).....	129
Figura 185 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos sem presença do solo (MPa).....	129
Figura 186 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com presença do solo (MPa).....	130
Figura 187 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa (MPa) .....	131
Figura 188 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com $f_{ck}$ de 25 MPa (MPa) .....	131
Figura 189 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com $f_{ck}$ de 45 MPa (MPa) .....	131
Figura 190 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com altura de 54 cm (MPa).....	132
Figura 191 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com altura de 110 cm (MPa).....	132
Figura 192 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com altura de 165 cm (MPa).....	132
Figura 193 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com pilar retangular (MPa).....	133
Figura 194 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com pilares associados (MPa).....	133
Figura 195 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos sem presença do solo (MPa).....	134
Figura 196 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com presença do solo (MPa).....	134

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dimensões dos pilares, blocos e estacas e taxa de armadura longitudinal.....	31
Tabela 2 -Valores limites das tensões nodais recomendados pela ABNT NBR 6118 (2014) .	48
Tabela 3- Valores limites das tensões nodais recomendados pelo ACI 318-19 (2019) .....	48
Tabela 4 - Valores limites das tensões nodais recomendados pelo CEB-FIP Model Code 2010 (2012) .....	49
Tabela 5 - Valores limites das tensões nodais recomendados pelo EHE-08 (2011) .....	49
Tabela 6 - Valores propostos para o coeficiente K.....	52
Tabela 7 - Valores do parâmetro $\alpha$ .....	52
Tabela 8 - Estimativa do módulo de deformabilidade do solo .....	52
Tabela 9 - Representação dos blocos.....	55
Tabela 10 - Parâmetros do solo .....	58
Tabela 11 - Resultado das reações das estacas em kN .....	66
Tabela 12 – Porcentagem das reações transmitidas para o solo .....	66
Tabela 13 - Deslocamento na ponta das estacas centrais (m).....	79
Tabela 14 - Deslocamento no pilar (m).....	83
Tabela 15 - Deslocamento na face inferior do bloco (m).....	88
Tabela 16 – Tensões de Compressão (MPa) .....	94
Tabela 17 – Tensões de Compressão Longitudinal (MPa).....	98
Tabela 18 – Tensões de Compressão Transversal (MPa).....	103
Tabela 19 – Tensões de Tração na Direção X (MPa).....	107
Tabela 20 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X (MPa) .....	112
Tabela 21 – Tensões de Tração Transversal na Direção X (MPa) .....	116
Tabela 22 – Tensões de Tração na Direção Z (MPa) .....	121
Tabela 23 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z (MPa).....	126
Tabela 24 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z (MPa).....	130

## LISTA DE SÍMBOLOS

$d$	Altura útil do bloco
$f_{cd}$	Resistência à compressão axial de cálculo do concreto
$f_{ck}$	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{yk}$	Valor característico da resistência de escoamento do aço
$h$	Altura do bloco
$V_{máx}$	Distância horizontal entre a face do pilar e o eixo da estaca

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute (Instituto Americano de Concreto)
ANOVA	Análise de Variância
CEB-FIP	Comité européen du béton-Fédération Internationale de la Précontrainte (Federação Internacional de Concreto Estrutural)
EHE	Instrucción Española del Hormigón Estructural (Norma de Concreto Estrutural Espanhola)
NBR	Norma técnica brasileira

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>20</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	22
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	22
1.3	JUSTIFICATIVA	22
1.4	METODOLOGIA	22
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>25</b>
2.1	PESQUISAS COM ÊNFASE EXPERIMENTAL	25
2.1.1	<i>Blévot &amp; Frémy (1967)</i>	25
2.1.2	<i>Adebar, Kuchma e Collins (1990)</i>	27
2.1.3	<i>Miguel (2000)</i>	28
2.1.4	<i>Delalibera (2006)</i>	29
2.1.5	<i>Delalibera e Giongo (2008)</i>	30
2.1.6	<i>Munhoz e Giongo (2017)</i>	30
2.1.7	<i>Gonçalves, Delalibera, Filho (2022)</i>	32
2.2	PESQUISAS COM ÊNFASE NUMÉRICA	33
2.2.1	<i>Miguel (2000)</i>	33
2.2.2	<i>Munhoz (2004)</i>	34
2.2.3	<i>Delalibera (2006)</i>	35
2.2.4	<i>Sakai (2010)</i>	36
2.2.5	<i>Delalibera e Giongo (2013)</i>	37
2.2.6	<i>Oliveira (2013)</i>	38
2.2.7	<i>Bavaresco (2016)</i>	39
2.2.8	<i>Mendonça (2017)</i>	40
2.2.9	<i>Resende (2019)</i>	41
2.2.10	<i>Sousa (2019)</i>	42
2.2.11	<i>Gonçalves e Delalibera (2020)</i>	44
2.2.12	<i>Rasi et al. (2020)</i>	46
2.3	RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS	47
2.3.1	<i>ABNT NBR 6118 (2014)</i>	47
2.3.2	<i>ACI 318-19 (2019)</i>	48
2.3.3	<i>CEB-FIP Model Code 2010 (2012)</i>	49

2.3.4	<i>EHE-08 (2011)</i> .....	49
2.4	MODELOS DE BIELAS E TIRANTES .....	50
2.5	PARÂMETROS DO SOLO .....	51
<b>3</b>	<b>MODELOS ANALISADOS</b> .....	<b>53</b>
3.1	APRESENTAÇÃO DOS MODELOS.....	53
3.2	CARACTERÍSTICAS DO SOLO .....	55
3.3	DIMENSIONAMENTO DOS MODELOS.....	58
3.3.1	<i>Seções dos pilares</i> .....	58
3.3.2	<i>Alturas dos blocos</i> .....	59
3.3.3	<i>Dimensões em planta dos blocos</i> .....	59
3.3.4	<i>Materiais</i> .....	61
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO NUMÉRICA</b> .....	<b>62</b>
4.1	ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS.....	62
4.1.1	<i>Surf154</i> .....	62
4.1.2	<i>Targe170</i> .....	62
4.1.3	<i>Contac174</i> .....	63
4.1.4	<i>Solid186</i> .....	64
4.2	MODELAGEM NUMERICA .....	64
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>65</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	65
5.2	REAÇÕES NAS ESTACAS .....	65
5.2.1	<i>Influência do <math>f_{ck}</math></i> .....	67
5.2.2	<i>Influência da altura</i> .....	71
5.2.3	<i>Influência da geometria do pilar</i> .....	76
5.2.4	<i>Influência da presença ou não do solo</i> .....	79
5.3	DESLOCAMENTO NA PONTA DAS ESTACAS CENTRAIS .....	79
5.3.1	<i>Influência do <math>f_{ck}</math></i> .....	79
5.3.2	<i>Influência da altura</i> .....	81
5.3.3	<i>Influência da geometria do pilar</i> .....	82
5.4	DESLOCAMENTO NO PILAR .....	83
5.4.1	<i>Influência do <math>f_{ck}</math></i> .....	83
5.4.2	<i>Influência da altura</i> .....	85
5.4.3	<i>Influência da geometria do pilar</i> .....	86
5.4.4	<i>Influência da presença ou não do solo</i> .....	87
5.5	DESLOCAMENTO NA FACE INFERIOR DO BLOCO .....	88

5.5.1	<i>Influência do <math>f_{ck}</math></i> .....	89
5.5.2	<i>Influência da altura</i> .....	90
5.5.3	<i>Influência da geometria do pilar</i> .....	92
5.5.4	<i>Influência da presença ou não do solo</i> .....	93
5.6	TENSÕES DE COMPRESSÃO .....	94
5.6.1	<i>Influência do <math>f_{ck}</math></i> .....	94
5.6.2	<i>Influência da altura</i> .....	95
5.6.3	<i>Influência da geometria do pilar</i> .....	96
5.6.4	<i>Influência da presença ou não do solo</i> .....	97
5.7	TENSÕES DE COMPRESSÃO LONGITUDINAL .....	98
5.7.1	<i>Influência do <math>f_{ck}</math></i> .....	99
5.7.2	<i>Influência da altura</i> .....	100
5.7.3	<i>Influência da geometria do pilar</i> .....	101
5.7.4	<i>Influência da presença ou não do solo</i> .....	102
5.8	TENSÕES DE COMPRESSÃO TRANSVERSAL .....	103
5.8.1	<i>Influência do <math>f_{ck}</math></i> .....	103
5.8.2	<i>Influência da altura</i> .....	104
5.8.3	<i>Influência da geometria do pilar</i> .....	105
5.8.4	<i>Influência da presença ou não do solo</i> .....	106
5.9	TENSÕES DE TRAÇÃO NA DIREÇÃO X .....	107
5.9.1	<i>Influência do <math>f_{ck}</math></i> .....	107
5.9.2	<i>Influência da altura</i> .....	109
5.9.3	<i>Influência da geometria do pilar</i> .....	110
5.9.4	<i>Influência da presença ou não do solo</i> .....	111
5.10	TENSÕES DE TRAÇÃO LONGITUDINAL NA DIREÇÃO X .....	112
5.10.1	<i>Influência do <math>f_{ck}</math></i> .....	112
5.10.2	<i>Influência da altura</i> .....	113
5.10.3	<i>Influência da geometria do pilar</i> .....	114
5.10.4	<i>Influência da presença ou não do solo</i> .....	115
5.11	TENSÕES DE TRAÇÃO TRANSVERSAL NA DIREÇÃO X .....	116
5.11.1	<i>Influência do <math>f_{ck}</math></i> .....	117
5.11.2	<i>Influência da altura</i> .....	118
5.11.3	<i>Influência da geometria do pilar</i> .....	119
5.11.4	<i>Influência da presença ou não do solo</i> .....	120
5.12	TENSÕES DE TRAÇÃO NA DIREÇÃO Z .....	121

5.12.1	<i>Influência do <math>f_{ck}</math></i> .....	121
5.12.2	<i>Influência da altura</i> .....	123
5.12.3	<i>Influência da geometria do pilar</i> .....	124
5.12.4	<i>Influência da presença ou não do solo</i> .....	125
5.13	TENSÕES DE TRAÇÃO LONGITUDINAL NA DIREÇÃO Z .....	126
5.13.1	<i>Influência do <math>f_{ck}</math></i> .....	126
5.13.2	<i>Influência da altura</i> .....	127
5.13.3	<i>Influência da geometria do pilar</i> .....	128
5.13.4	<i>Influência da presença ou não do solo</i> .....	129
5.14	TENSÕES DE TRAÇÃO TRANSVERSAL NA DIREÇÃO Z .....	130
5.14.1	<i>Influência do <math>f_{ck}</math></i> .....	131
5.14.2	<i>Influência da altura</i> .....	132
5.14.3	<i>Influência da geometria do pilar</i> .....	133
5.14.4	<i>Influência da presença ou não do solo</i> .....	134
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>135</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	135
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	137
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>138</b>

# 1 INTRODUÇÃO

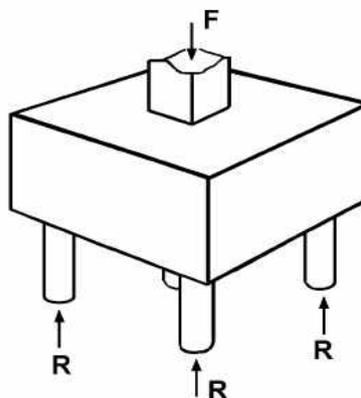
## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas edificações, existe um elemento que tem a função de absorver as ações atuantes e de transferi-las para o solo. Esse elemento é chamado de elemento 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 localidade e os aspectos dos edifícios limítrofes como a sua proximidade, seu tipo de fundação e seu estado de conservação.

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 mais superficiais do solo não são capazes de resistir às ações provenientes da superestrutura. As estacas podem ser de concreto armado, protendido, madeira ou aço.

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. Por ser um elemento que não permite inspeção visual, é muito importante conhecer a fundo seu comportamento em serviço, para poder dimensioná-lo de forma mais eficiente e se obter o melhor desempenho do elemento. A Figura 1 está ilustrando um bloco sobre estacas.

Figura 1- Bloco sobre estacas

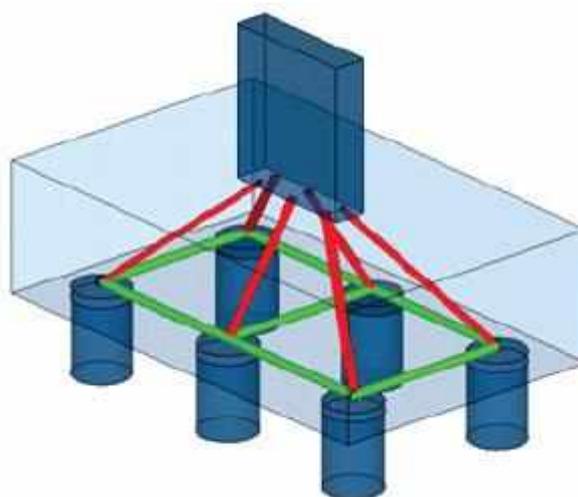


Fonte: Delalibera (2006)

O principal método para dimensionar 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. Nesse método a armadura principal de tração nos blocos é chamada de tirante e fica situada na sua parte inferior.

Já a área de compressão é denominada biela e está situada de forma inclinada nos blocos. E os nós são os elementos de ligação que unem a biela ao tirante. A Figura 2 a seguir representa um bloco em perspectiva em que as barras vermelhas ilustram as bielas e as barras verdes, os tirantes.

Figura 2 - Bloco sobre estacas



Fonte: Oliveira, Barros e Giongo (2014)

Há uma grande dificuldade de padronização desse método devido à grande variação de seus componentes, pois o bloco pode receber força de um pilar de seções diversas, tipos diferentes de carregamentos, momentos fletores e forças horizontais em pilares. Esses fatores podem alterar o esquema a ser adotado e a região nodal que deve ser verificada ou o modelo de treliça a ser adotado. Esse fato representa uma grande importância de se estudar esse assunto e definir modelos diferentes para cada situação.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 *Objetivo Geral*

O trabalho teve 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 materiais com comportamento elástico e linear.

### 1.2.2 *Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos do trabalho são:

- i. Encontrar as reações das estacas, os deslocamentos e as tensões de compressão e tração;
- ii. Comparar os resultados obtidos em cada um dos modelos;
- iii. Analisar os resultados e a influência dos parâmetros analisados.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

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 bastante relevante na estrutura da edificação. Ainda existem dúvidas a respeito do seu dimensionamento, já que há uma incerteza sobre o funcionamento das bielas de compressão, sobre as tensões no bloco e sobre o seu comportamento, principalmente em blocos com muitas estacas. Portanto, esse assunto se torna interessante para ser abordado em várias pesquisas futuras, visto que existem vários fatores possíveis a serem analisados.

## 1.4 METODOLOGIA

Para analisar os blocos sobre doze estacas, foi realizada uma pesquisa sobre o tema, e sobre as pesquisas já realizadas sobre o tema, tanto pesquisas com ênfase numérica quanto com ênfase experimental, e também as instruções normativas nacionais e internacionais.

A análise numérica foi realizada através da modelagem utilizando a ferramenta computacional ANSYS, que é baseado no método dos elementos finitos. Foi utilizada a versão 2021 R1 e a plataforma Workbench. Inicialmente foi definida a geometria do modelo e

determinados os parâmetros e suas variações. Foram definidas três alturas, sendo uma altura mínima (54 cm), uma intermediária (110 cm) e uma máxima (165 cm). A resistência do concreto do bloco foi variável, sendo adotados os valores de 25 MPa, 35 MPa e 45MPa.

Além desses parâmetros de altura e resistência do concreto, também houve variação na geometria do pilar, sendo dois pilares associados em “L” em alguns modelos, e pilar retangular com uma área equivalente. Também houve variação de presença ou não de solo nos modelos analisados.

Foram necessários alguns processos para a realização da análise numérica:

- i. Definição nos modelos a serem analisados, sua geometria e suas particularidades;
- ii. Escolha da sondagem a ser utilizada, e definição das propriedades do solo por meio de métodos semi-empíricos;
- iii. Modelagem de todos os modelos utilizando o programa computacional ANSYS;
- iv. Captação dos resultados a serem analisados, que são as reações das estacas, deslocamento no pilar, deslocamento na face inferior do bloco, deslocamento na ponta das estacas, tensões de compressão e tensões de tração.
- v. Análise dos resultados, observando a influência de cada parâmetro analisado.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é constituído de seis capítulos, que foram organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1 – Introdução: na introdução são apresentados o tema, a justificativa e a metodologia utilizada na pesquisa.
- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: apresenta os principais assuntos sobre o tema da pesquisa, com a presença de estudos experimentais e numéricos já realizados, além das recomendações normativas.
- Capítulo 3 – Modelos Analisados: apresenta toda a descrição sobre os modelos que serão estudados e os parâmetros a serem analisados.
- Capítulo 4 – Simulação Numérica: Definição dos elementos finitos utilizados e das considerações a respeito da modelagem.
- Capítulo 5 – Resultados e discussões: apresenta os resultados obtidos e a avaliação dos parâmetros relevantes.

– Capítulo 6 – Considerações finais: apresenta as conclusões obtidas no estudo realizado e as possíveis linhas que o estudo pode seguir.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo traz a revisão bibliográfica em que serão abordados: trabalhos anteriores relacionados a blocos sobre estacas, com ênfase experimental e com ênfase numérica, as recomendações normativas nacionais e internacionais, as definições sobre o modelo de bielas e tirantes e os parâmetros do solo.

### 2.1 PESQUISAS COM ÊNFASE EXPERIMENTAL

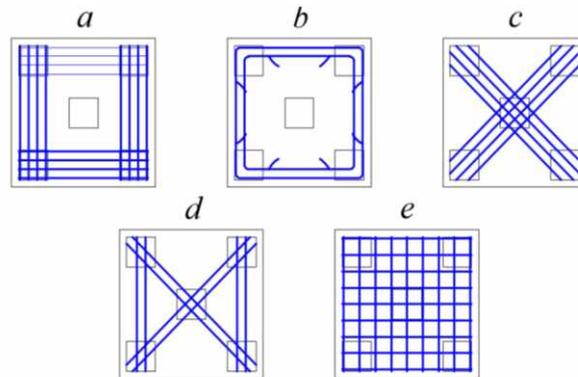
#### 2.1.1 *Blévoit & Frémy (1967)*

Blévoit & Frémy (1967) dividiram sua pesquisa em duas etapas. Na primeira, que foi realizada de 1955 a 1958, foram ensaiados 51 blocos sobre quatro estacas, 37 blocos sobre três estacas e 6 blocos sobre duas estacas. Na segunda etapa, de 1958 a 1961, foram ensaiados 8 blocos sobre quatro estacas, 8 blocos sobre três estacas e 6 blocos sobre duas estacas. A primeira parte do estudo compreendeu modelos com escala reduzida de 1:2 a 1:3, já a segunda teve como foco blocos com tamanho real.

A primeira parte teve como objetivos a determinação do coeficiente de segurança para a aplicação do método das bielas, verificar o desempenho das diferentes configurações de armadura quanto à fissuração, determinar quais condições podem causar rupturas por efeito de funcionamento. Já o objetivo da segunda parte foi confirmar o que foi observado na primeira etapa, porém dessa vez com os modelos em tamanho real.

Para chegar nos objetivos determinados, foram variados a altura dos blocos, a forma de disposição das armaduras, o tipo de aço das armaduras e a seção delas. Para os blocos sobre três ou sobre quatro estacas, foram definidos cinco tipos de arranjos de armaduras. A Figura 3 representa os tipos de arranjos para os blocos com quatro estacas.

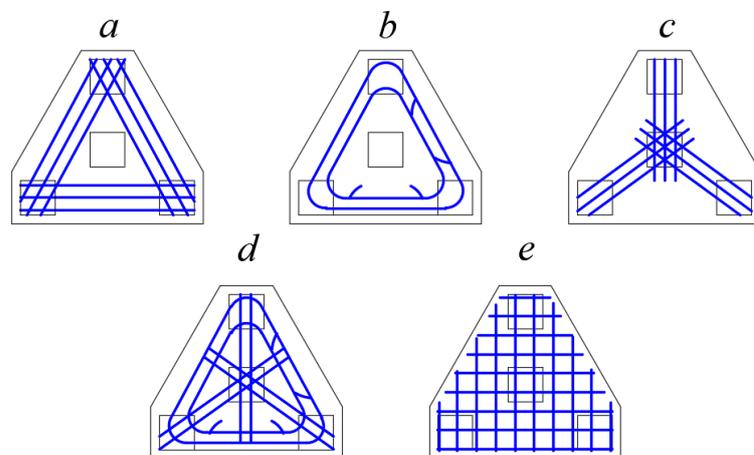
Figura 3 - Arranjos de armadura para bloco sobre 4 estacas



Fonte: Adaptado de Blévoit e Frémy (1967)

Foi possível observar ao analisar a segurança à ruptura, que os modelos a, b, c e d obtiveram desempenhos semelhantes, enquanto o modelo e, com armadura em malha, apresentou uma carga de ruptura 20% inferior se comparado aos outros modelos. Para os modelos sobre três estacas, os tipos de arranjos utilizados estão representados na Figura 4.

Figura 4 - Arranjos de armadura para bloco sobre 3 estacas



Fonte: Adaptado de Blévoit e Frémy (1967)

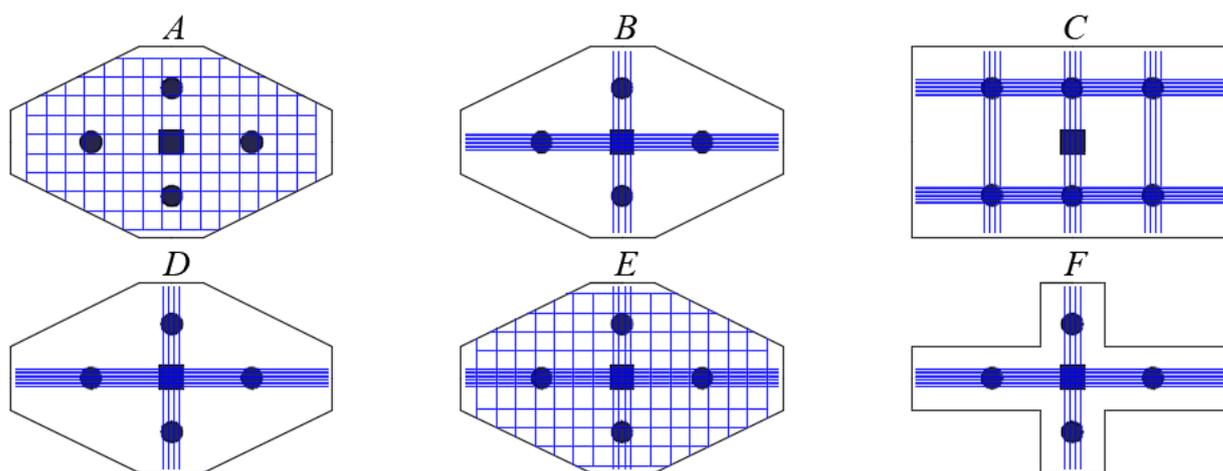
Os modelos a, b, c e d resultaram em desempenho semelhante, uma vez que a armadura segundo os lados foi mais preponderante. Já o modelo e, que possui armadura em malha, colapsou com uma força 50% inferior que os outros blocos. Para os blocos sobre duas estacas, foram estudados dois tipos de arranjos, barras lisas com gancho e barras com nervuras e sem gancho. Para os modelos com barras lisas, houve escorregamento das barras.

Blévoit & Frémy (1967) constataram em sua pesquisa que o ângulo entre a biela e a horizontal deve estar entre  $45^\circ$  e  $55^\circ$ , para que se garanta a segurança do bloco. Nos modelos com inclinação das bielas entre  $40^\circ$  e  $55^\circ$  os valores de força última obtidos numericamente foram maiores que os valores obtidos nos ensaios, e com as outras inclinações aconteceu o contrário, porém ficou contra a segurança. Verificou-se que a ruptura aconteceu por ruína do concreto pelo surgimento de fissuras iniciadas na região das estacas (fendilhamento) na maioria dos modelos e não foram observadas ruínas por punção.

### 2.1.2 Adebar, Kuchma e Collins (1990)

Adebar, Kuchma e Collins (1990) realizaram um ensaio com 6 blocos, sendo 5 sobre quatro estacas e 1 sobre seis estacas, com o objetivo de verificar a viabilidade do método de bielas e tirantes. A figura 5 apresenta os blocos ensaiados, os quais possuíam somente armadura longitudinal. Nos ensaios foram medidos a força aplicada ao bloco, as reações em cada estaca, o deslocamento do bloco no meio do vão e as deformações na armadura e no concreto em diferentes pontos.

Figura 5 - Blocos ensaiados por Adebar, Kuchma e Collins (1990)



Fonte: Adaptado de Adebar, Kuchma e Collins (1990)

Adebar, Kuchma & Collins (1990) puderam observar que o bloco que foi dimensionado de acordo com as recomendações do ACI 318-83 (1983) teve uma capacidade de carga menor que os blocos dimensionados com o modelo de bielas e tirantes. Isso porque o código americano

não leva em consideração a altura útil do bloco e nem a influência da quantidade e distribuição das barras da armadura longitudinal.

Pode-se concluir que os blocos com alturas maiores sofreram grandes deformações pouco antes de acontecer a ruína, isso porque eles não tiveram uma flexibilidade suficiente para que fosse possível distribuir uniformemente as forças nas estacas. A ruína do concreto aconteceu nas bielas de compressão devido ao fendilhamento, que foi provocado pela expansão das tensões de compressão. Os autores propuseram um modelo de bielas e tirantes refinado, com um tirante que foi colocado na transversal da biela de compressão, ou seja, entre a cabeça da estaca e o pilar, para poder resistir às tensões de tração solicitadas.

### 2.1.3 *Miguel (2000)*

O objetivo do trabalho foi estudar o comportamento de blocos rígidos sobre três estacas, submetidos à ação de força centrada, variando os parâmetros armaduras secundárias e o diâmetro das estacas. Na parte experimental do trabalho, foram estudados o desenvolvimento das fissuras e o modo de ruína por meio de ensaios experimentais em escala real. Foram analisadas as deformações nas barras das armaduras principais e secundárias, nas bielas de compressão, nas zonas nodais inferiores e superiores e nas faces laterais do bloco.

Os blocos sobre três estacas foram divididos em dois grupos com dois blocos cada. O parâmetro que diferenciou os grupos foi o diâmetro das estacas, sendo 30 cm no grupo 1, e 20 cm no grupo 2. Na primeira etapa do ensaio experimental, que foi denominada série A1, foram ensaiados três blocos sobre três estacas, com a mesma dimensão e distribuição igual da armadura principal, e com diâmetro de estacas diferentes. Nessa etapa, os blocos eram providos somente com a armadura principal escolhida de modo a unir as estacas.

A segunda fase compreendeu três séries de ensaios, séries A2, A3 e A4, sendo que cada série possuía dois modelos de blocos, um de cada grupo, com igual distribuição da armadura principal e variação nas armaduras secundárias. Na série A2 a armadura secundária consiste de barras passando pela projeção do pilar. Na série A3, a armadura consistiu de barras distribuídas na base, e na série A4, em forma de estribos verticais e horizontais.

Os ensaios foram feitos com níveis crescentes de carregamento até a ruína com o objetivo de analisar o modo de ruína, as deformações e tensões nas fases de serviço e, verificar a viabilidade do sistema de aplicação de força utilizado. Os blocos foram dimensionados segundo o Método das Bielas (BLÉVOT, 1967). O dimensionamento foi realizado para os

blocos com estacas de 30 cm de diâmetro e foi considerado igualmente para o com estacas de 20 cm. Não foram considerados os fatores de segurança no cálculo.

A redução do diâmetro influenciou no valor da força última nos modelos das séries A1 e A2. Os modelos da série A1 e A2 apresentaram maior influência, independente da redução do diâmetro. A armadura secundária constituída por estribos verticais e horizontais gerou uma redução das aberturas de fissuras nas faces dos blocos, independentemente do diâmetro das estacas. A armadura secundária com barras distribuídas na base não contribuiu para a redução da fissuração nas faces dos blocos, mas diminuiu as aberturas das fissuras na base.

Os blocos com estacas de dimensão de 30 cm apresentaram maior deformação na zona nodal superior. Todos os modelos romperam por fendilhamento das bielas de compressão, devido à rápida expansão do fluxo de tensões, acompanhado do escoamento das barras das armaduras principal ou secundária.

#### *2.1.4 Delalibera (2006)*

Delalibera (2006) desenvolveu um trabalho com o objetivo de analisar a formação das bielas de compressão, analisar a contribuição dos ganchos e propor um modelo refinado de bielas e tirantes para blocos sobre duas estacas. O estudo foi dividido entre a parte experimental e numérica.

Na parte experimental, Delalibera (2006) ensaiou quatorze blocos sobre duas estacas variando os arranjos das armaduras, o ângulo de inclinação das bielas de compressão (altura do bloco), as seções transversais dos pilares e a excentricidade. Todos os blocos ensaiados foram modelados computacionalmente e os resultados obtidos foram semelhantes.

Na parte experimental do trabalho, foram realizados os ensaios de determinação das propriedades mecânicas das barras e fios de aço utilizados, ensaios para a dosagem do concreto. Também foram realizados os ensaios de corpo-de-prova cilíndricos de concreto e o ensaio das quatro séries de blocos, em que foram variados a altura do bloco e a seção transversal do pilar.

Com essa pesquisa, Delalibera (2006) concluiu que todos os blocos ensaiados apresentaram ruptura da biela comprimida junto ao pilar ou junto à estaca. A utilização da armadura de fendilhamento aumentou significativamente a capacidade portante dos blocos, absorvendo as tensões de tração na direção perpendicular às bielas e limitando a abertura de fissuras. Modelos com pilares de seção transversal quadrada suportaram força última menor que os modelos com pilares retangulares.

Verificou-se que os modelos com maior inclinação da biela de compressão, que também possuem maior rigidez, apresentaram maior capacidade portante em comparação aos de menor rigidez e que as deformações não são constantes nas barras de aço da armadura principal de tração, sendo que nas seções em que atravessam as bielas comprimidas observou-se uma redução na deformação. Essa redução nas tensões é decorrente do efeito da força de compressão da biela. Pode-se perceber, também, que os ganchos, que foram exigidos pela norma brasileira, não tiveram nenhuma influência no comportamento estrutural dos blocos na ruptura e em serviço.

#### *2.1.5 Delalibera e Giongo (2008)*

Delalibera e Giongo (2008) experimentou quatorze blocos sobre duas estacas, sendo que quatro deles tinham pilares com seção transversal igual a 25 cm por 50 cm, enquanto que os outros dez possuíam seção quadrada com lado de 25 cm. O objetivo da pesquisa foi analisar as deformações nas faces dos blocos junto às zonas nodais inferior e superior e identificar experimentalmente as regiões mais solicitadas na interface estaca-bloco.

Os parâmetros variáveis dos blocos foram os arranjos das armaduras, o ângulo de inclinação das bielas de compressão, as seções transversais dos pilares e a excentricidade.

Foi possível observar que algumas seções dos blocos apresentaram ruptura do concreto na zona nodal superior e inferior. Delalibera e Giongo (2008) observaram que a presença de momento nos blocos diminui a capacidade portante e que o aumento da seção transversal do pilar, sem variar as outras propriedades do modelo, aumenta a sua capacidade portante.

Com os resultados obtidos nos ensaios, Delalibera e Giongo (2008) concluíram que apenas parte da estaca é solicitada de maneira intensa. Em relação a zona nodal superior, há uma concentração de tensões abaixo da seção do pilar, portanto, deve-se considerar que metade da força aplicada ao pilar é resistida pela metade da área do pilar.

#### *2.1.6 Munhoz e Giongo (2017)*

Foi desenvolvido um trabalho com objetivo de analisar a influência da seção geométrica de pilares com taxas diferentes de armadura longitudinal nas armaduras dos tirantes de blocos sobre duas estacas.

A necessidade desse estudo surgiu quando perceberam que o projeto de blocos sobre estacas com pilares retangulares não pode ser igual ao considerado para os blocos com pilares

quadrados. Portanto, foi realizada uma análise experimental de modelos com diferentes seções e diferentes taxas de armadura.

Os resultados experimentais procuraram avaliar a forma de ruína dos blocos e a influência das variações dos lados maiores e das taxas de armaduras longitudinais dos pilares nas deformações das barras da armadura principal de tração dos blocos. A Tabela 1 a seguir mostra as dimensões dos modelos que foram ensaiados.

Tabela 1- Dimensões dos pilares, blocos e estacas e taxa de armadura longitudinal

Série	Modelo	Pilares		Blocos
		Medidas da seção (cm)	Taxa de armadura (%)	Seção (cm)
B110	B110P125R1	12,5x12,5	1,0	15,0x110,0
	B110P125R25		2,5	
	B110P125R4		4,0	
B115	B115P250R1	12,5x25,0	1,0	15,0x115,0
	B115P250R25		2,5	
	B115P250R4			
B120	B120P375R1	12,5x37,5	1,0	15,0x120,0
	B120P375R25		2,5	
	B120P375R4		4,0	
B127	B127P500R1	12,5x50,0	1,0	15,0x127,0
	B127P500R25		2,5	
	B127P500R4		4,0	

Fonte: Munhoz, Giongo (2017)

Através da revisão bibliográfica foi possível verificar que não haviam estudos experimentais que relacionassem a taxa de armadura do pilar com a transmissão das forças no bloco e a influência desses fatores nas armaduras principais dos blocos. Portanto, as dimensões dos pilares e suas taxas de armaduras foram adotados conforme apresentados na tabela anterior, o que totalizou 12 diferentes tipos de pilares.

Foram adotados a mesma altura e o mesmo ângulo de inclinação das bielas comprimidas. No dimensionamento dos modelos reduzidos foi considerada a escala geométrica de 1:2. Os modelos foram divididos em quatro séries diferentes, de acordo com a variação da distância entre os eixos das estacas, da seção do pilar na direção do eixo que contém as estacas, e nas taxas adotadas de armadura do pilar.

Os pilares possuem 35 cm de altura, os blocos 40 cm de altura e as estacas 40 cm de altura. Foi adotada uma seção transversal quadrada de 12,5 cm x 12,5 cm. Como resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ) foi adotado o valor de 25 MPa para os blocos e pilares, de 50 MPa para as estacas e a resistência característica ao escoamento do aço ( $f_{yk}$ ) das

barras de aço foi adotada sendo 500 MPa. Como são modelos experimentais, não foram adotados coeficientes de segurança nos projetos dos pilares e blocos, sendo considerados apenas no projeto das estacas.

Os resultados experimentais que foram obtidos procuraram avaliar a forma de ruína dos blocos analisados e a influência das variações das medidas dos lados maiores e das taxas de armaduras longitudinais dos pilares nas deformações das barras da armadura principal de tração dos blocos.

As deformações médias últimas dos tirantes nas seções centrais foram maiores nos modelos com a menor taxa de armadura geométrica no pilar, com exceção dos modelos da série B110 e B120. Nos modelos da série B120 um dos extensômetros foi danificado, o que prejudicou a análise.

As deformações medidas na armadura longitudinal de tração do bloco parecem haver uma grande influência da seção do pilar porque nos modelos da série B127 a redução da deformação na barra de armadura foi menor nos modelos com maior taxa de armadura no pilar. Considerando as análises feitas pelos autores é sugerido que as barras da armadura principal sejam sempre ancoradas com ganchos nas extremidades nos blocos que recebem pilares de seção retangular alongada.

Foi possível analisar a influência das seções dos pilares e de diferentes taxas de armadura longitudinal de pilares nas armaduras de tração de blocos sobre duas estacas. Pode-se concluir que as forças última experimentais nas barras da armadura principal dos blocos ocorreram nas regiões centrais, e forças menores foram encontradas nas seções transversais coincidentes com os planos que contém os eixos das estacas.

Isso tem a ver com a influência dos campos de tensão de compressão na distribuição de tensões de tração nessas regiões. As deformações nas barras de armaduras do tirante são reduzidas da seção central para as seções que contém o eixo da estaca, sendo que essa redução é menor nos modelos com pilares de seção retangular alongada e com grandes taxas de armadura. Nas análises também foi comprovada a influência das seções de pilares e das taxas de armadura nas tensões que limitam as zonas nodais do modelo, por isso é possível adotar critérios que levam isso em conta.

#### *2.1.7 Gonçalves, Delalibera, Filho (2022)*

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento mecânico de blocos sobre duas estacas metálicas e avaliar a influência de diferentes tipos de arranjos relativos à ligação

entre estaca e o bloco. A justificativa desse trabalho se dá pelo fato de ainda se ter incertezas sobre o comportamento de blocos sobre estacas metálicas, principalmente em relação ao melhor arranjo da ligação estaca-bloco e o comportamento da região nodal inferior nos vários métodos de projeto.

O programa experimental pretendia verificar a eficiência da ligação pilar-bloco por meio de barras soldadas com estribos ao longo delas, ou apenas por meio de barras soldadas. Três blocos sobre duas estacas em escala real foram construídos, e como variável foi adotado apenas o tipo de arranjo da ligação da estaca metálica com o bloco.

Para dimensionar os blocos, as recomendações da ABNT NBR 6118 (2014) foram seguidas e foi empregado o método de Blévoit & Frémy. Foram considerados concreto com resistência à compressão de 25 MPa, barras de aço CA-50, largura do bloco de 20 cm e ângulo entre o plano de compressão e o plano horizontal de 45°. Para o espaçamento entre as estacas, foi utilizado 45 cm e a distância entre eixos das estacas foi de 60 cm. O embutimento da estaca utilizado foi de 10 cm. Para o dimensionamento dos pilares, foram considerados concreto com resistência de 40 MPa e estribos com espaçamento reduzido.

Todos os blocos ensaiados apresentaram um comportamento semelhante na etapa de carregamento. As primeiras fissuras visíveis nas faces dos blocos apareciam junto às estacas e possuía um aspecto vertical. Essas rachaduras verticais também apareceram no meio em estágios de carregamento mais altos. Portanto, a falha de todos os modelos foi caracterizada por fendilhamento da biela e esmagamento do concreto na região nodal superior.

## 2.2 PESQUISAS COM ÊNFASE NUMÉRICA

### 2.2.1 *Miguel (2000)*

A parte numérica deste trabalho consistiu na modelagem de blocos sobre três estacas, em três dimensões, por meio do programa de análise LUSAS que é baseado nos elementos finitos. Esse estudo teve como objetivo obter dados iniciais do comportamento destes elementos estruturais para poder embasar a execução dos ensaios experimentais.

A modelagem procurou simular as condições em que os modelos seriam submetidos em laboratório, para depois poder comparar os resultados numéricos e experimentais. Como os blocos tem comportamento tridimensional, foram considerados dois blocos sobre três estacas, cada um definido por uma malha formada por elementos tridimensionais hexagonais.

As condições de contorno foram definidas de acordo com os limites impostos pelos ensaios. Todos os pontos dos elementos da malha, que constituem o volume das estacas, tiveram restrição aos deslocamentos e rotações em todas as direções, para simular um material rígido.

Os contornos dos blocos foram considerados restritos em todas as direções, com relação às rotações, e com relação aos deslocamentos, foram considerados restritos nas direções x e y. Para a simulação de carregamento de compressão foram consideradas sete forças concentradas de 50 kN cada, que foram distribuídas no centro geométrico do bloco.

Embora os modelos fossem desprovidos de qualquer armadura, o fluxo de tensões, de deformações totais e plásticas e deslocamentos obtidos auxiliaram na etapa dos ensaios experimentais em laboratório. Pode-se perceber que na região entre as estacas, há um fluxo de tensões que não encontra equilíbrio, no que sugere o aparecimento de fissuras prematuras.

### 2.2.2 *Munhoz (2004)*

Munhoz (2004) realizou uma análise numérica com blocos sobre uma, duas, três, quatro ou cinco estacas utilizando o programa ANSYS®, baseado no Método dos Elementos Finitos. Foram variados os diâmetros das estacas e dimensões dos pilares com a mesma geometria e carregamento. O comportamento do material foi adotado como elástico linear.

O objetivo do trabalho de Munhoz (2004) foi estudar o comportamento de blocos rígidos de concreto armado sobre estacas, para sugerir um modelo de Bielas e Tirantes mais refinado; verificar a influência da variação dos diâmetros das estacas e das seções de pilares; comparar os processos de dimensionamento adotados.

Foram seguidas algumas etapas na análise: a definição das propriedades dos materiais, da malha, do elemento finito, das ações e condições de contorno. As análises foram divididas em duas etapas, sendo a primeira uma verificação por meio dos métodos de Blévo (1967), CEB-FIP (1970) e a norma espanhola EHE (2011). Já na segunda etapa, foi realizada uma análise gráfica dos campos de tensão de compressão e foi comparado com o modelo analítico.

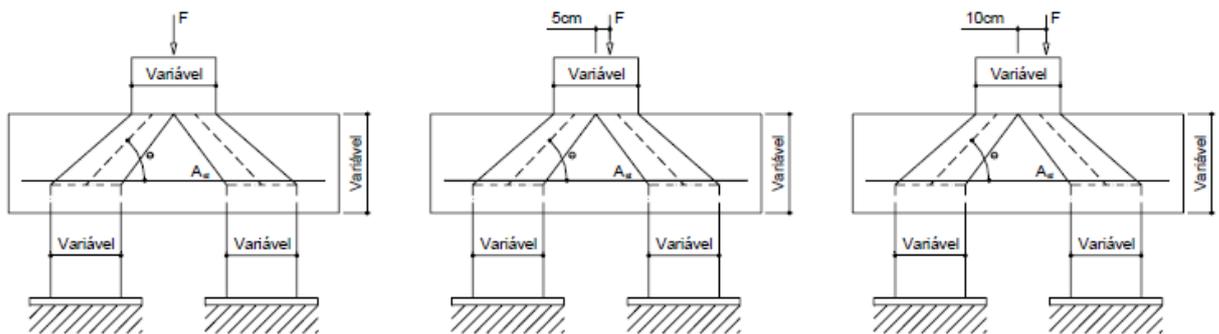
Munhoz (2004) observou que os modelos numéricos apresentaram resultados esperados, o que demonstra a importância de adotar um modelo analítico mais refinado de forma que leve em consideração parâmetros como o diâmetro das estacas e seções dos pilares. Além disso, é necessário adotar uma verificação de compressão nas regiões nodais, próximo ao pilar e próximo as estacas.

### 2.2.3 Delalibera (2006)

A análise numérica teve como objetivo analisar o fluxo de tensões principais de compressão e comparar com os resultados dos ensaios. Com esse estudo, foi possível desenvolver um modelo de bielas e tirantes aplicado aos blocos sobre duas estacas. Para essa análise numérica foi utilizado o programa computacional ANSYS®, e as não linearidades do material e da estrutura foram levadas em consideração.

Para a análise foram escolhidas as variáveis seção transversal das estacas e dos pilares, a altura dos blocos e a excentricidade da força aplicada. Os blocos analisados foram divididos em três grupos, nos quais foram alterados a excentricidade, sendo igual a zero no grupo A, no grupo B foi adotada igual a cinco centímetros da força de compressão e no grupo C igual a dez centímetros. A figura 6 ilustra as dimensões dos blocos analisados.

Figura 6 - Dimensões dos blocos analisados



Fonte: Delalibera (2006)

Para validar os modelos da análise numérica, Delalibera (2006) comparou os resultados com alguns ensaios experimentais, entre eles o de Mautoni (1972). Pode-se concluir que em blocos em que a aplicação de força é centrada, a área da seção do pilar possui uma grande relevância na capacidade portante dos blocos, ou seja, quando a seção transversal for maior, maior será a força última.

Já quando a força é aplicada de maneira excêntrica, o parâmetro mais influente na capacidade do bloco é a altura do bloco. Delalibera (2006) observou que houve uma grande concentração das tensões nas zonas nodais inferior e superior, o que validou uma das condições do método das bielas e tirantes que é limitar o valor de tensões nessas regiões.

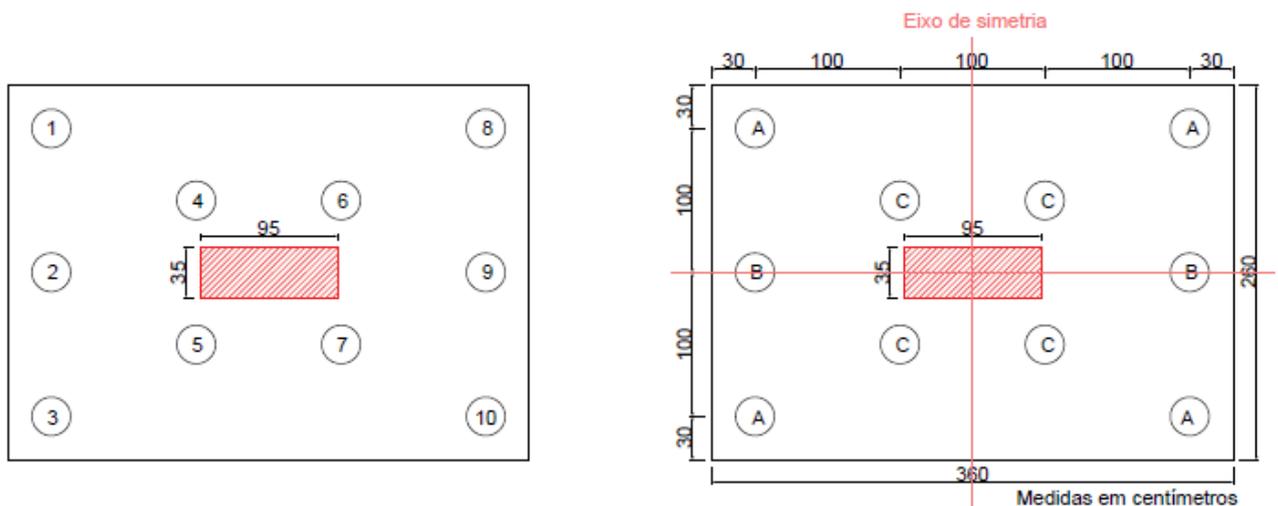
### 2.2.4 Sakai (2010)

O trabalho de Sakai (2010) tinha como objetivo mostrar a importância de considerar a interação solo-estrutura na análise dos blocos sobre estacas e efetuar comparação entre o uso de molas para simular o comportamento conjunto estaca-solo e com a modelagem das estacas e do solo.

Foi realizada a análise do dimensionamento de um bloco sobre dez estacas e foram determinadas as reações nas estacas. Os parâmetros diâmetro, comprimento das estacas, seção transversal do pilar, resistência característica do concreto, taxa de armadura e espaçamento entre as estacas foram definidos como fixos.

Os blocos sobre 10 estacas foram analisados de diversas formas, para avaliar a influência da presença ou não de solo entre as estacas e suas formas de apoio. Ainda foram analisados os efeitos do tipo de aplicação da carga, os efeitos da altura do bloco, a linearidade elástica dos materiais e o efeito da não linearidade no concreto do bloco, do aço e da mola. Na figura 7, observa-se as dimensões dos blocos e as posições das estacas no bloco. O bloco foi modelado em simetria e as estacas foram representadas pelas letras A, B e C de acordo com a posição em relação ao eixo de simetria.

Figura 7- Posições da estaca sob o bloco



Fonte: Sakai (2010)

No trabalho, foram apresentadas três formas de considerar a interação solo-estrutura, sendo elas:

- i. molas para simular o comportamento estaca-solo;

- ii. modelagem das estacas e do solo;
- iii. estacas sobre apoios indeslocáveis, sem nenhuma presença de solo ao seu redor.

Os resultados dessas simulações foram comparados com os de simulações de blocos apoiados e soluções analíticas propostas por Poulos e Davis (1980). Para nomear os blocos, foram utilizados 5 campos.

O primeiro é o carácter “B”, que significa bloco. O segundo campo simboliza a altura do bloco, o terceiro é representado pelas “A”, se for apoio indeslocável, “M”, se for apoio deslocável e “S” se houver presença de solo entre as estacas. O quarto carácter é preenchido de acordo com a carga aplicada, se for aplicada ao pilar é utilizada a letra “P” e se dor aplicada na superfície do bloco, “D” e o quinto é de acordo com o tipo de análise, “L” se for linear e “nL” se for não linear.

Para realizar a análise desse trabalho a taxa de armadura foi constante para que se pudesse analisar a influência a altura dos blocos com os diferentes tipos de apoios: mola, maciço ou simplesmente apoiados. As alturas dos blocos utilizadas na pesquisa foram 40, 80, 115 e 200 cm e as cargas foram aplicadas no pilar central e distribuídas sobre o bloco.

Com as análises efetuadas, foi possível concluir que quando o solo é levado em consideração nas análises de blocos rígidos, as maiores reações estão concentradas nas estacas periféricas do bloco, qualquer que seja o tipo de aplicação de carga, diferentemente do que os métodos simplificados propõem. Isso representa uma análise mais próxima da realidade e mais precisa.

#### *2.2.5 Delalibera e Giongo (2013)*

Delalibera e Giongo (2013) desenvolveram um trabalho com o objetivo de analisar o comportamento estrutural de blocos sobre duas estacas com cálice embutido, com interfaces lisas e rugosa das paredes dos pilares e do cálice, submetidos à ação de força normal de compressão excêntrica. Além disso, buscaram verificar por meio de análise de variância qual variável apresenta maior relevância no seu comportamento.

Foram modelados 18 blocos, sendo 9 com interface pilar/cálice rugosa e 9 com interface pilar/cálice lisa. Para realizar a análise foram fixados os parâmetros taxas de armadura e a distância entre os eixos das estacas e foram avaliados o comprimento de embutimento do pilar e a espessura da laje de fundo do bloco. Os modelos foram dimensionados de acordo com os critérios de Blévoit e Frémy (1967).

A análise numérica teve como objetivo apresentar tendências do comportamento dos modelos analisados. A geometria dos modelos foi criada no programa de computador AutoCad e exportada para o Ansys.

Como os modelos eram simétricos, foi utilizado o recurso de simetria. Foram restringidas as translações nas direções x, y e z dos nós dos elementos posicionados nas pontas das estacas. Verificou-se que a capacidade de resistência do bloco pode ser determinada pelo efeito de punção da “laje” de fundo, e não em função da ruptura da diagonal comprimida.

As simulações numéricas mostraram uma tendência do comportamento estrutural de blocos sobre duas estacas com cálice embutido. Nos blocos com interface lisa, os fatores comprimento de embutimento e espessura de laje de fundo demonstraram grande importância na capacidade portante dos blocos. Os modelos com maiores comprimentos de embutimento do pilar e lajes de fundo com maiores espessuras apresentam maior capacidade portante. Já nos modelos com interface rugosa, os parâmetros analisados não foram relevantes na capacidade portante dos blocos.

Foi possível observar que a rigidez do bloco influencia na sua capacidade portante. Isso porque os modelos com maiores alturas apresentaram maior resistência. Além disso, os modelos com interface lisa apresentaram uma menor capacidade portante em relação aos com interface rugosa.

#### *2.2.6 Oliveira (2013)*

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar o comportamento estrutural de blocos sobre cinco estacas, dispostas em linhas de duas e três estacas e de blocos de seis estacas, em duas linhas de três estacas.

Dessa forma, foram analisados e comparados os processos analíticos de dimensionamento de blocos sobre várias estacas. Para tanto foram verificados os parâmetros que influenciam no comportamento dos blocos sobre cinco e seis estacas e foram indicados métodos para o dimensionamento, que são compatíveis com o comportamento estrutural dos blocos analisados.

Para a análise dos blocos foram adotados blocos base, nos quais seus parâmetros foram fixados. A partir do bloco base foram alterados os parâmetros, para poder avaliar sua influência. Com a variação dos parâmetros desejados, foram obtidos 10 blocos sobre cinco estacas e 10 blocos sobre 6 estacas.

Com o objetivo de determinar as tendências dos comportamentos dos blocos foi realizada análise por meio dos elementos finitos, utilizando o programa computacional DIANA. É bastante importante saber a condição de refinamento da malha do modelo numérico, visto que os elementos finitos são utilizados para representar a estrutura real com a maior fidelidade possível, porém sempre vão existir limitações.

Com o processamento dos blocos em elementos finitos, foi possível montar gráficos de força versus deslocamento, e ter informações sobre a resistência dos blocos sobre estacas estudados. Na maioria das situações os blocos atingiram a ruína com forças maiores que o próprio pilar sustentaria por causa da distribuição não uniforme de tensões de compressão na área de contato entre o pilar e o bloco. Isso pode levar à ruína prematura do pilar.

Observou-se que ao variar a altura dos blocos analisados, nos blocos com alturas intermediárias a ruína se deu pela ruptura das bielas nas estacas situadas mais próximas ao pilar. Já nos blocos com menores alturas a ruína está associada ao alongamento máximo permitido para as barras. Nos blocos mais altos foi considerada a ruptura do concreto junto ao pilar em um estado de carregamento em que as barras de aço dos tirantes ainda não estavam solicitadas por tensões de tração consideráveis.

A variação da resistência do concreto refletiu na variação da resistência do bloco. O aumento da resistência provocou um aumento na resistência do bloco em proporções semelhantes, porém não foi possível estabelecer a exata proporção de variação. Não foi observada influência significativa na resistência dos blocos ao se variar o formato da seção transversal do pilar, exceto no bloco sobre seis estacas com pilar muito alongado, em que houve um pequeno acréscimo de resistência.

### *2.2.7 Bavaresco (2016)*

Foram analisados três formatos de pilares, um em “C”, um em “L” e o outro em seção quadrada, que servirá como base para a comparação. Foram testadas duas configurações de estacas para cada tipo de pilar, sendo uma com 5 estacas e outra com 9 estacas. As estruturas foram submetidas por uma análise linear de elementos finitos por meio do programa SAP2000.

A estrutura do pilar central com cinco estacas foi modelada em dois níveis de dimensão de malha. Após as estruturas serem processadas, foram estudados os campos de tensão resultante do carregamento, e foi possível obter o fluxo de esforços no interior do bloco. Assim foi efetuado o cálculo dos esforços das bielas e tirantes e foi dimensionado o bloco de fundação.

Depois de dimensionadas as seis estruturas, foram analisadas as variações dos resultados com as dimensões diferentes dos pilares e das configurações das estacas. No final, foram analisadas estratégias de como se deve considerar a aplicação da carga do pilar com geometria complexa, fazendo o dimensionamento utilizando o Método das Bielas.

Foram estudados modelos com três geometrias diferentes de pilares, sendo um em “C”, um em “L” e um com área quadrada equivalente aos outros dois, e dois tipos de blocos, um com cinco estacas e outro com nove. Foi possível observar diferentes fluxos de tensões, identificar os elementos de tração e compressão em cada caso, dimensionar as armaduras e comparar os resultados entre as estruturas.

Pode-se perceber que sobre as reações das estacas centrais a consideração de distribuição igualitária entre as estacas leva a um dimensionamento adequado das escoras e tirantes, mas isso gera um subdimensionamento dos valores das tensões de compressão que atuam no nó da estaca central.

Uma conclusão que se pode obter sobre a geometria é que o cálculo com a utilização da geometria real pode reduzir o consumo de armadura. Portanto, cabe ao profissional determinar se realiza um cálculo simplificado ou se envolve em um projeto mais otimizado, que demandará mais trabalho.

#### 2.2.8 *Mendonça (2017)*

Mendonça (2017) desenvolveu um trabalho com o objetivo de construir um modelo de cálculo que propiciasse o dimensionamento de blocos de coroamento, utilizando o método de bielas e tirantes para os casos em que se utiliza estacas metálicas.

Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre blocos de coroamento e elaborada uma rotina de verificação dos métodos escolhidos e resultados experimentais de blocos sobre estacas de concreto. Em complemento foi estudada a aplicação do método de bielas e tirantes para blocos em que se utiliza estacas metálicas. Com isso, foi possível desenvolver uma rotina para o dimensionamento desses blocos e indicar recomendações construtivas e de projeto.

Para realizar a primeira análise, uma rotina de cálculo foi desenvolvida no software Mathcad, na versão 14. Através disso, foi realizada a verificação do bloco de coroamento, calculando a carga máxima suportada e analisando a biela inclinada. Foram analisados os limites de resistência das bielas e tirantes da treliça idealizada pelo modelo de bielas e tirantes, através do conhecimento das características do bloco.

Os principais trabalhos que foram utilizados como comparação foram o de Sabnis e Gogate (1984) e o relatório do AISI (1982). Sabnis e Gogate (1984) ensaiaram nove blocos sobre estacas de concreto executados em escala reduzida. Todos os blocos eram sobre quatro estacas e as estacas e pilar central foram simulados utilizando cilindros metálicos de mesmo diâmetro.

No relatório do AISI (1982) foram ensaiados quatro modelos de blocos sobre estacas metálicas, sendo os blocos 1 e 2 sobre seis estacas e os blocos 3 e 4 sobre quatro estacas. No processo de ensaio dos blocos 3 e 4, houve mudança no ponto de aplicação de carga, de forma que não seria adequado realizar a verificação desses blocos pelo método de bielas e tirantes. Os dois primeiros blocos possuem seis estacas e as mesmas dimensões, porém se diferem em relação à resistência à compressão do concreto, às armaduras adotadas, à altura do bloco, às dimensões do pilar e pelo fato do bloco possuir chapas soldadas ao topo de um par de estacas.

O programa de verificação obteve resultados coerentes com os ensaios de Sabnis e Gogate (1984) em blocos sobre estacas circulares e com a pesquisa de Chantelot e Mathern (2010). Mendonça (2017) concluiu que o método de bielas e tirantes é adequado para o dimensionamento dos blocos. As adaptações feitas para adequar o método de bielas e tirantes ao uso com estacas metálicas promoveram ganhos significativos no que diz respeito a previsão de carga suportada pelo bloco. Os resultados do ensaio do relatório do AISI (1982) chegaram a valores bastante compatíveis com as exigências das normas estabelecidas.

Ao analisar o programa de dimensionamento elaborado por Mendonça (2017) com base nos resultados das comparações e das verificações com as recomendações construtivas, verifica-se que é possível realizar o dimensionamento dos blocos sobre estacas com perfis metálicas que estão submetidos a cargas centradas, o que produz resultados confiáveis e seguros.

### *2.2.9 Resende (2019)*

Resende (2019) realizou uma pesquisa com o objetivo de analisar a influência da geometria dos blocos e pilares e da área de aço dos pilares no comportamento estrutural dos blocos sobre estacas. Foram analisados numericamente 27 modelos, que foram dimensionados utilizando o método de Blévoit e Frémy (1967) e as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Os resultados foram validados utilizando a pesquisa experimental de Munhoz (2014). A análise numérica foi desenvolvida por meio do software de simulação numérica ANSYS®.

Foram realizadas comparações de força e deslocamento, para que se possa apontar quais os fatores que influenciam mais no comportamento dos blocos sobre estacas.

O propósito desse estudo se dá devido à diferença no comportamento estrutural de blocos interferir na inclinação das bielas. As variações ocorrem nas seções dos pilares, que podem ser retangulares ou quadradas, na taxa de armadura dos pilares e na altura dos blocos. Por exemplo, taxas diferentes de armaduras nos pilares geram treliças com alturas diferentes, pois a força é transmitida para o bloco em alturas diferentes.

A ferramenta computacional utilizada permitiu analisar diversos resultados e foi realizada uma análise de variância para verificar a importância dos parâmetros que estão sendo considerados. Pelo teste de normalidade foi constatado que os dados apresentaram distribuição normal, o que tornou coerente a aplicação da análise estatística Anova.

Através dos gráficos de força e deslocamento, pode-se concluir que o aumento da seção transversal dos pilares e da altura dos blocos provoca resultados de forças e deslocamentos superiores, havendo um acréscimo na capacidade portante dos blocos. Os valores numéricos foram menores que os calculados de forma analítica.

Na análise das tensões atuantes na armadura longitudinal dos pilares, pode-se perceber uma redução das tensões ao longo da barra e da altura do bloco. As barras próximas às bielas de compressão, que ficam na extremidade, apresentaram valores maiores de tensões que nas armaduras internas.

A ruptura dos blocos ocorreu devido ao esmagamento do concreto nas regiões nodais, e pode-se concluir que o método de bielas e tirantes representou o comportamento estrutural dos blocos de maneira coerente. As zonas nodais são as regiões que apresentam as maiores tensões nos blocos. Foram calculadas as tensões nessas regiões e foram obtidos os resultados teóricos e numéricos para realizar a comparação.

Resende (2019) verificou uma maior concentração de tensões nas bielas nos blocos com menores alturas, pois são elementos com menor rigidez. A inclinação das bielas se deu de acordo com a variação da seção transversal do pilar ou com a variação da altura dos blocos.

#### *2.2.10 Sousa (2019)*

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento de blocos de fundação sobre duas estacas de concreto armado por meio de modelagem numérica, considerando o atrito entre a estaca e o solo e o contato entre o bloco e o solo por solicitação centrada. Essa pesquisa visou

contribuir no estudo do comportamento estrutural dos elementos de fundação considerando sua interação com o solo.

As simulações foram realizadas utilizando a ferramenta computacional ANSYS®. Primeiro foram definidas as propriedades geométricas e físicas dos blocos a serem analisados, para o dimensionamento das armaduras e a definição da resistência última dos modelos.

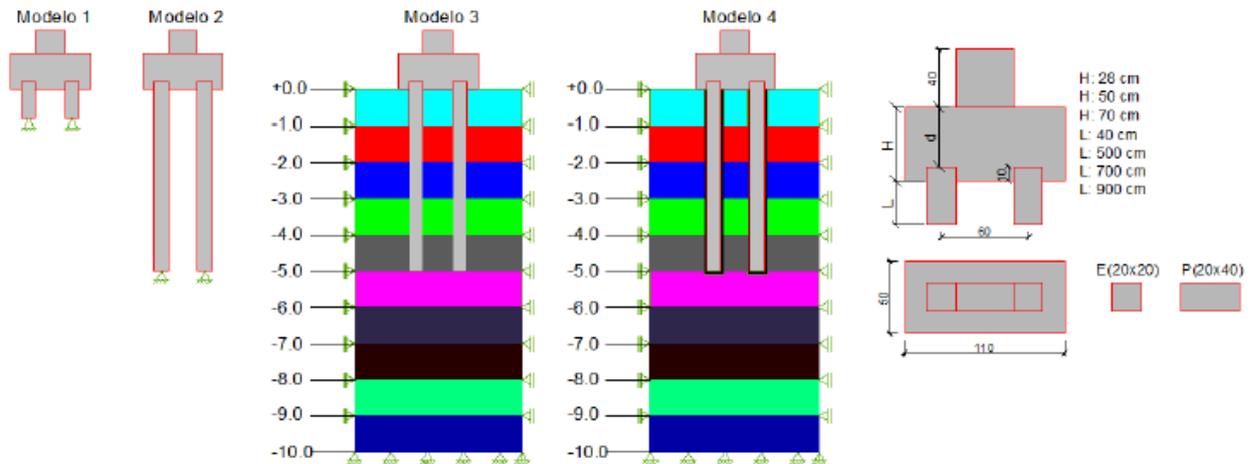
A geometria foi escolhida de modo a se ter um bloco flexível (com altura de 28 cm), um intermediário (altura de 50 cm) e um rígido (sendo a altura 70 cm). A resistência do concreto foi adotada para se obter uma ruptura no bloco, de modo que foi adotada resistência à compressão de 25 MPa para os blocos e 50 MPa para os pilares e estacas.

As etapas da análise incluíram a realização do refinamento da malha e a calibração do modelo numérico baseado em resultados experimentais. Foram escolhidos dois perfis de sondagem sendo um solo arenoso e outro argiloso, e foram definidas propriedades do solo como o módulo de elasticidade, coesão, coeficiente de Poisson e o ângulo de atrito. Foram definidos o coeficiente de atrito entre concreto e solo e modelada a interação entre estaca e solo por elemento de contato e acoplamento de nós, e após isso foi analisada a relevância dos parâmetros solo, altura do bloco e comprimento das estacas.

Os blocos sobre duas estacas foram modelados sem o solo e depois considerando o atrito entre as estacas e o solo. O modelo 1 possui uma estaca com comprimento de 50 cm, o modelo 2 possui uma estaca com um tamanho real, sendo que em ambas não foi considerado o solo ao redor das estacas.

Já nos modelos 3 e 4, o solo está ao redor das estacas, portanto as condições de movimento de translação se dão no solo, o que possibilita seu deslocamento vertical de acordo com a deformação do solo. No modelo 3 o atrito lateral entre as estacas e o solo foi considerado por meio de acoplamento de nós e no modelo 4 foi modelado elemento de contato entre estaca e solo. Na Figura 8 estão apresentados os modelos analisados.

Figura 8 - Modelo estrutural de blocos analisados



Fonte: Sousa (2019)

Forma modelados 48 blocos e os parâmetros alterados foram a altura útil do bloco, o comprimento das estacas, o tipo de solo e a vinculação estaca-solo. Todos foram submetidos à força de compressão não excêntrica e foi analisada de que maneira os parâmetros influenciam no comportamento dos blocos, portanto, foi verificada a força última teórica, de acordo com o modelo de Blevót e Frémy (1967).

Na região nodal superior, pode-se concluir que a biela tende a se formar além da seção do pilar. Nos modelos de blocos com altura de 28 cm e sem a consideração do solo, na região nodal inferior, verificou-se uma expansão do campo de tensões além da região externa das estacas.

Observou-se uma flexão ocorrendo na cabeça das estacas, por isso pode-se concluir que considerar que as estacas estão sujeitas apenas à força normal de compressão pode levar a resultados não condizentes com o comportamento real da estrutura.

A cota de apoio da estaca influencia diretamente na rigidez, pois ao se aumentar a profundidade do solo aumenta-se a rigidez e se reduz a deformidade do solo. Os modelos com ausência de solo tiveram uma maior rigidez e apresentaram uma variação na deslocabilidade devido a variação do comprimento das estacas.

### 2.2.11 Gonçalves e Delalibera (2020)

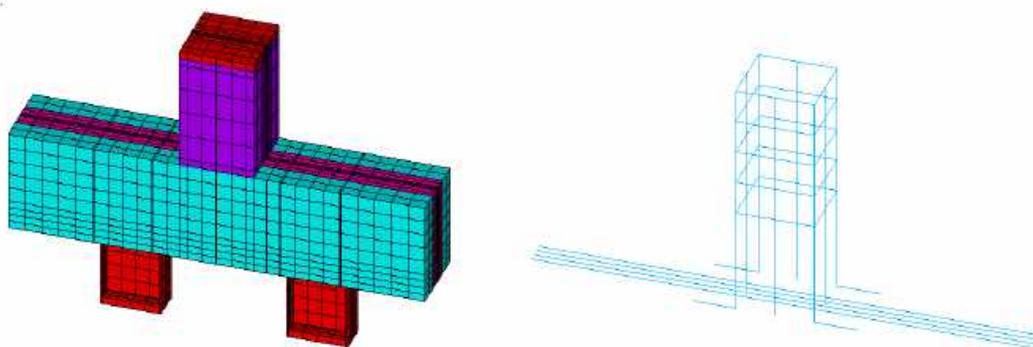
Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise não linear tridimensional de um bloco sobre suas estacas ensaiado por Tomaz (2018), tendo como intuito aproximar os

resultados numéricos ao comportamento experimental e verificar tendências da distribuição de tensões do elemento.

Foi utilizado o programa computacional ANSYS, para fazer a modelagem e análise numérica do trabalho. Para tanto, foram utilizadas as propriedades geométricas e física dos materiais do ensaio realizado por Tomaz (2018) a fim de se fazer uma comparação entre os resultados.

Foram desenvolvidos cinco modelos numéricos com mesma geometria e malha, e variou-se apenas o módulo de elasticidade empregado no concreto do bloco e o método utilizado para a modelagem da armadura principal do bloco. A geometria e malha dos modelos foram criadas no programa computacional AutoCad e exportadas para o ANSYS, através de extensão do tipo IGES. A Figura 9 mostra a rede de elementos finitos utilizada para definir os elementos de volume e os elementos de barra, representando a discretização das armaduras dos modelos.

Figura 9 - Malha de elementos de volume e da armadura



Fonte: Gonçalves, Delalibera (2020)

O trabalho apresentou uma simulação numérica, utilizando o método dos elementos finitos, de um bloco sobre duas estacas metálicas com perfil W. A utilização de perfis metálicos como estacas ainda gera bastante incertezas a respeito da distribuição interna de tensões e ao modelo de bielas e tirantes mais adequado para blocos sobre estacas metálicas.

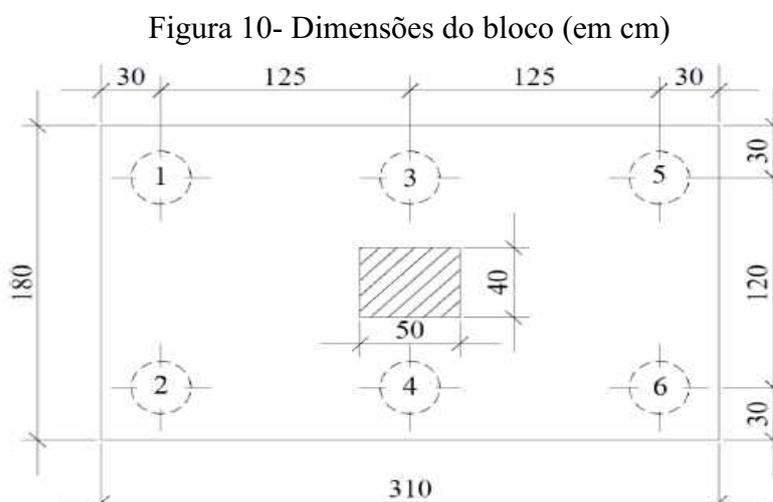
A análise realizada teve uma boa correspondência com os resultados experimentais de Tomaz (2018), e indicou que as tensões de compressão tendem a apresentarem maior intensidade nas abas do perfil metálico mais afastadas das extremidades do bloco. Portanto, pode-se concluir que as estacas metálicas são uma boa alternativa pois apresentam vantagens

em relação às de concreto, mas são necessários mais estudos aprofundados para que se conheça a geometria das bielas de compressão em blocos sobre estacas metálicas.

### 2.2.12 Rasi et al. (2020)

Rasi et al. (2020) desenvolveu o estudo de um bloco de seis estacas que suporta um pilar de concreto armado, no qual foi analisado a influência das características do solo sob ele. A análise numérica foi feita pelo Método dos Elementos Finitos, através do software SAP 2000 e foram analisados blocos sobre seis estacas com três tipos de solo: solo indeformável, solo deformável areno-argiloso e solo deformável argilo-siltoso e com três alturas diferentes.

O bloco analisado possui seis estacas, com duas linhas paralelas de duas estacas, sendo escolhido pelo fato de duas delas estarem situadas próximas ao pilar e a influência de estacas nessa configuração era um dos interesses dos autores. Os blocos possuíam todos a mesma configuração geométrica em planta, a qual está ilustrada na Figura 10, e foram variadas apenas as alturas.



Fonte: Rasi et al. (2020)

Os blocos foram simulados alterando sua rigidez provocada pela variação de sua altura. As alturas adotadas foram 80 cm, 120 cm e 160 cm. Foi possível observar uma grande mudança no comportamento estrutural do bloco quando foi modificado o tipo de solo considerado.

Foi possível observar que as reações ficaram bem maiores nas estacas centrais no solo indeformável e nos solos deformáveis as reações nas estacas foram mais uniformes, sendo que as estacas junto ao pilar também foram mais solicitadas. Os resultados mostraram que alguns

parâmetros como altura do bloco e o tipo do solo em que as estacas estão apoiadas, interferem no comportamento estrutural do bloco.

## 2.3 RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

### 2.3.1 ABNT NBR 6118 (2014)

A ABNT NBR 6118 (2014) classifica os blocos como rígidos ou flexíveis. Para que o bloco seja considerado rígido, a Equação 2.1 deve ser verificada nas duas direções, na qual  $h$  é a altura do bloco em cm,  $a$  é a dimensão do bloco em alguma direção em cm e  $a_p$  é a dimensão do pilar na mesma direção. Caso contrário, o bloco é classificado flexível.

$$h \geq \frac{a-a_p}{3} \quad 2.1$$

A ABNT NBR 6118 (2014) explica 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 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”.

A ABNT NBR 6118 (2014) permite 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.

Para o modelo de bielas e tirantes, é necessário limitar as tensões nodais de acordo com sua classificação. De acordo com ABNT NBR 6118 (2014), os nós são classificados em 3 categorias:

- iv. bielas prismáticas ou nós CCC;
- v. bielas atravessadas por mais de um tirante, ou nós CTT ou TTT;
- vi. bielas atravessadas por tirante único ou nós CCT.

Na tabela 2, estão apresentados os limites para as tensões nodais para os casos de blocos sobre duas estacas de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), em que  $\alpha_{v2}$  é igual a  $(1 - f_{ck}/250)$  e  $f_{cd}$  é a resistência à compressão axial de cálculo do concreto em  $\text{kN/cm}^2$ .

Tabela 2 -Valores limites das tensões nodais recomendados pela ABNT NBR 6118 (2014)

Tipo de Nós	Valor limite
CCC	$0,85 \times \alpha_{v2} \times f_{cd}$
CTT ou TTT	$0,60 \times \alpha_{v2} \times f_{cd}$
CCT	$0,72 \times \alpha_{v2} \times f_{cd}$

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)

### 2.3.2 ACI 318-19 (2019)

O código americano 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.

Em relação à limitação das tensões nodais, o ACI 318-19 (2019) determina que os valores devem ser os que estão representados na Tabela 3, sendo que  $\beta_c$  é igual a 1,  $\beta_n$  é igual a 1 nos nós tipo CCC, igual a 0,8 nos nós tipo CCT e nos nós CTT e TTT é igual a 0,60 e  $f_{cd}$  é a resistência à compressão axial de cálculo do concreto em  $\text{kN/cm}^2$ .

Tabela 3- Valores limites das tensões nodais recomendados pelo ACI 318-19 (2019)

Tipo de Nós	Valor limite
CCC	$0,85 \times \beta_c \times \beta_n \times f_{cd} = 0,85 \times f_{cd}$
CTT ou TTT	$0,85 \times \beta_c \times \beta_n \times f_{cd} = 0,51 \times f_{cd}$
CCT	$0,85 \times \beta_c \times \beta_n \times f_{cd} = 0,68 \times f_{cd}$

Fonte: ACI 318-19 (2019)

### 2.3.3 CEB-FIP Model Code 2010 (2012)

Já o código 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 traz recomendações sobre o modelo de bielas e tirantes a ser utilizado no cálculo e ilustra os tipos de nós existentes.

Na tabela 4, estão apresentados os limites das tensões nodais recomendados pelo código CEB-FIP Model Code 2010, sendo que  $k_c$  é igual a  $1,1 \times \eta_{fc}$  para nós CCC ou igual a  $0,75 \times \eta_{fc}$  nos outros tipos de nós, e  $\eta_{fc}$  é igual a  $(30/f_{ck})^{1/3}$ .

Tabela 4 - Valores limites das tensões nodais recomendados pelo CEB-FIP Model Code 2010 (2012)

Tipo de Nós	Valor limite
CCC	$k_c \times f_{cd} = 1,10 \times f_{cd}$
CTT ou TTT	$k_c \times f_{cd} = 0,75 \times f_{cd}$
CCT	$k_c \times f_{cd} = 0,75 \times f_{cd}$

Fonte: CEB-FIP Model Code 2010 (2012)

### 2.3.4 EHE-08 (2011)

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  $V_{\text{máx}}$ , 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 2 vezes sua altura, caso contrário é considerado flexível.

Na Tabela 5, estão apresentados os limites para as tensões nodais que a EHE-08 (2011) recomenda para o caso de blocos sobre duas estacas.

Tabela 5 - Valores limites das tensões nodais recomendados pelo EHE-08 (2011)

Tipo de Nós	Valor limite
CCC	$3,30 \times f_{cd}$
CTT ou TTT	$0,70 \times f_{cd}$
CCT	$0,70 \times f_{cd}$

Fonte: EHE-08 (2011)

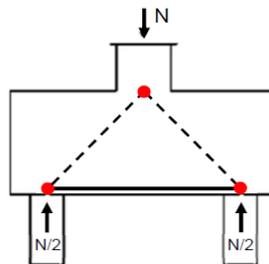
## 2.4 MODELOS DE BIELAS E TIRANTES

Segundo Tomaz et al. (2018), 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.

Essa analogia foi introduzida por Ritter & Morsch no século passado, que sugeriam a inclinação da treliça com valor igual a  $45^\circ$ . Após muitos estudos, pesquisadores sugeriram modificações no modelo, principalmente na definição da inclinação, mas mantiveram a ideia básica do modelo original (DELALIBERA, 2006).

“O dimensionamento por este modelo consiste na verificação das tensões que surgem na região de contato entre pilar/bloco (zona nodal superior) e bloco/estaca (zona nodal inferior)” (TOMAZ et al., 2018, p. 1234). A Figura 11 ilustra um bloco sobre estacas submetido a um carregamento concentrado  $N$  em que as linhas tracejadas são as bielas, a linha contínua é o tirante e os nós são os pontos vermelhos.

Figura 11 - Exemplo de modelo de bielas e tirantes para bloco sobre duas estacas



Fonte: Mendonça (2017)

O modelo de bielas e tirantes é utilizado na região D. Uma estrutura pode ser dividida em regiões B e D. A primeira se refere a regiões onde a hipótese de Bernoulli é válida, e a seção transversal permanece plana após a flexão; já na região D existe um estado complexo de tensões e deformações, representado por descontinuidades que não permitem a aplicação da hipótese de Bernoulli.

Miguel (2000) explica que a armadura, que é representada pelos tirantes, deve estar ancorada de forma correta nas zonas nodais para que sua função seja garantida. A armadura adicional distribuída na base é utilizada com o objetivo da estrutura ter ductibilidade suficiente para se adaptar ao sistema de forças internas.

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.

O método de bielas e tirantes baseado no trabalho de Blévoit e Frémy (1967) possui falha quanto à definição e a delimitação das regiões nodais e também não define as dimensões das bielas e tirantes. Apesar de existir várias adaptações do método de Blévoit e Frémy (1967), este ainda é o principal modelo utilizado (RESENDE, 2019).

## 2.5 PARÂMETROS DO SOLO

O solo é uma estrutura natural que é formada por estratificações que apresentam diferentes comportamentos. Sendo um sistema bastante complexo, ele necessita de estudo e amostragem para determinar melhor seu comportamento.

O recalque pode ser definido como 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 a danos bastante severos que podem colocar em risco a estrutura.

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) cita 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.

É necessário que se determine alguns parâmetros do solo que são obtidos através de correlações empíricas comumente utilizadas. Para a análise, foi preciso encontrar o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

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 determinar o valor do módulo de elasticidade, pode-se utilizar a Equação 2.2 a seguir, que foi proposta por Teixeira e Godoy (1996).

$$E = \alpha \times K \times \text{NSPT}$$

2.2

sendo K um parâmetro que varia de acordo com o tipo de solo, que pode ser determinado utilizando a Tabela 6. O coeficiente  $\alpha$  é um parâmetro que relaciona a resistência de ponta da estaca com o NSPT e pode ser encontrado na Tabela 7.

Tabela 6 - 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 7 - Valores do parâmetro  $\alpha$ 

Descrição do tipo de solo	$\alpha$
Areia	3
Silte	5
Argila	7

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

Sobre o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), foi utilizada uma tabela proposta por Teixeira e Godoy (1996), que sugere alguns valores baseados no NSPT, como pode-se encontrar na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 - Estimativa do módulo de deformabilidade do solo

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

Fonte: Adaptado de Teixeira e Godoy (1996) *apud* Sousa (2019)

### 3 MODELOS ANALISADOS

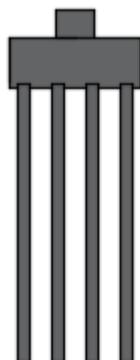
#### 3.1 APRESENTAÇÃO DOS MODELOS

Foram modelados blocos sobre doze estacas, inicialmente sem o solo e posteriormente considerando a presença do solo. Alguns modelos possuem um pilar retangular, de área equivalente aos dois pilares associados dos outros modelos, que possuem formato de “L”. Para realizar a análise e o estudo em questão, foram variados quatro parâmetros:

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

Nas Figuras 12 e 13 estão ilustrados os blocos com pilar retangular e os blocos com os pilares associados, respectivamente. Já nas Figuras 14 e 15 estão representados os blocos com pilar retangular e presença de solo e os blocos com pilares associados e presença de solo. Cada camada de solo, de acordo com a sondagem, está representada de uma cor.

Figura 12 - Bloco com pilar retangular



Fonte: Autor (2022)

Figura 13 - Bloco com pilares associados em “L”



Fonte: Autor (2022)

Figura 14 - Bloco com pilar retangular e presença de solo

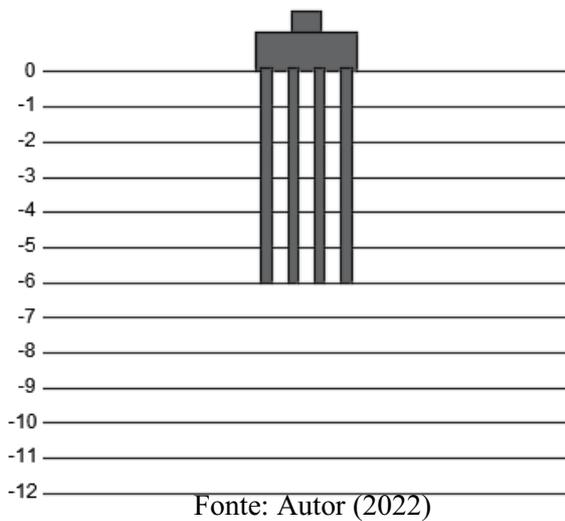
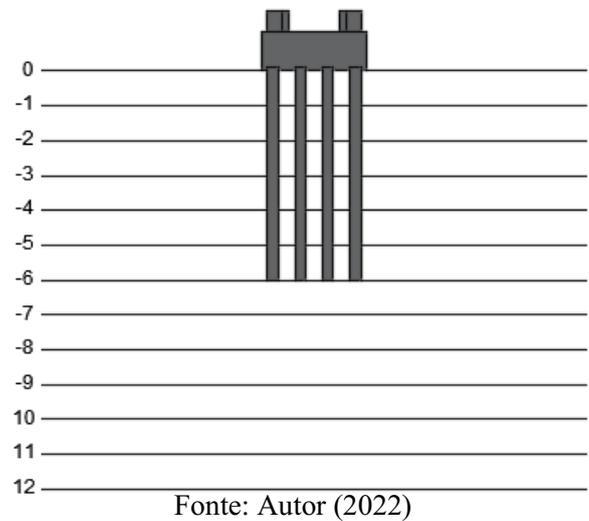


Figura 15 - Bloco com pilares associados em “L” e presença do solo



Após todas as considerações apresentadas anteriormente sobre os modelos a serem analisados, foram nomeados os blocos para facilitar o estudo. Todos os blocos iniciaram com a letra B que é representativo da palavra bloco. Logo após, veio 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 9 estão representados os nomes dos blocos, com as considerações de cada um.

Tabela 9 - 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

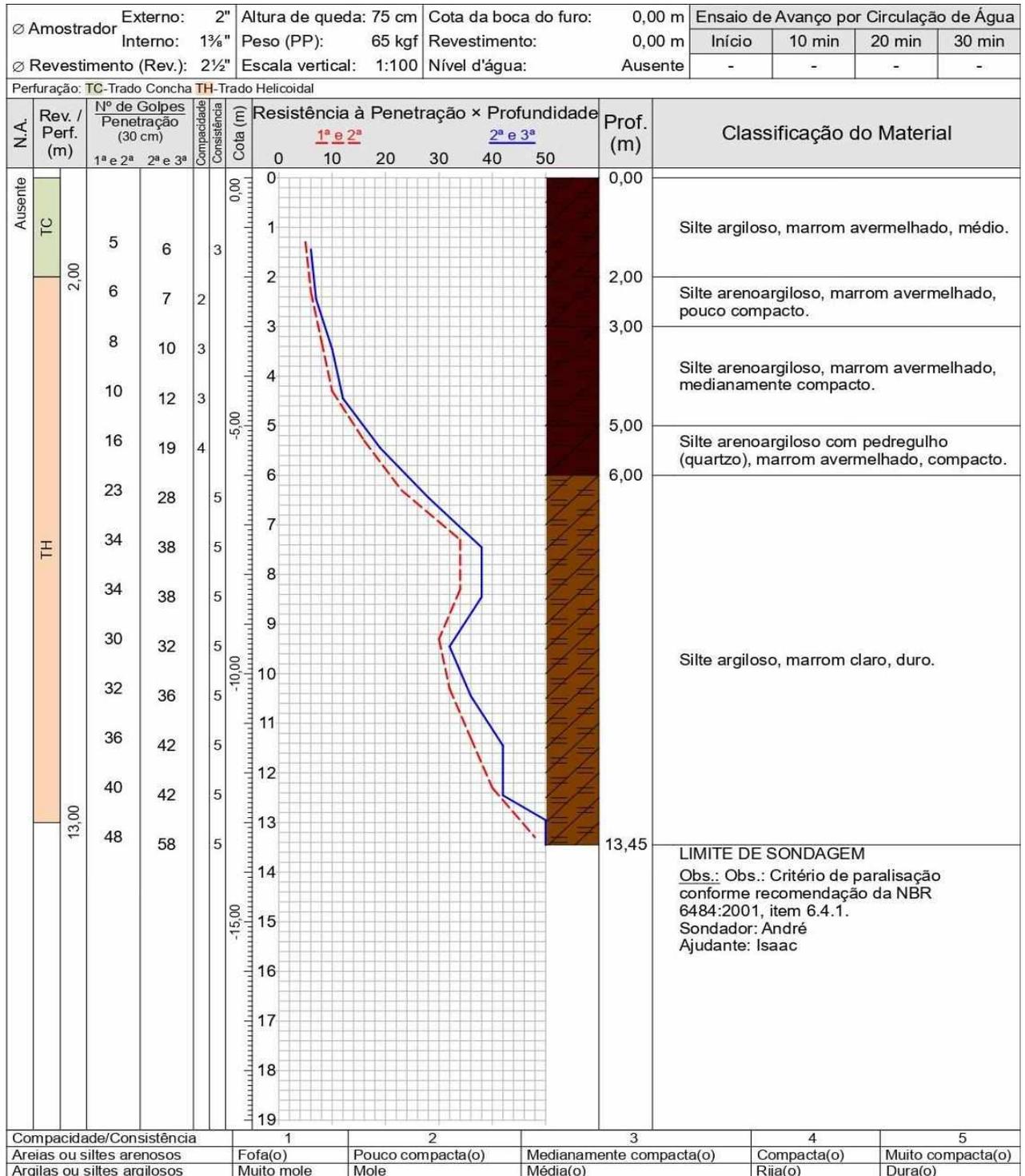
Fonte: Autor (2022)

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DO SOLO

Para determinar a influência que o solo possui no comportamento dos blocos, foram considerados dois tipos de blocos. Em alguns não foi considerada a presença do solo, e em outros foi considerada a presença de solo. Nos blocos em que foi considerado o solo, foi

utilizada uma sondagem para se determinar os parâmetros do solo. A sondagem utilizada está representada na Figura 16.

Figura 16 – Sondagem analisada

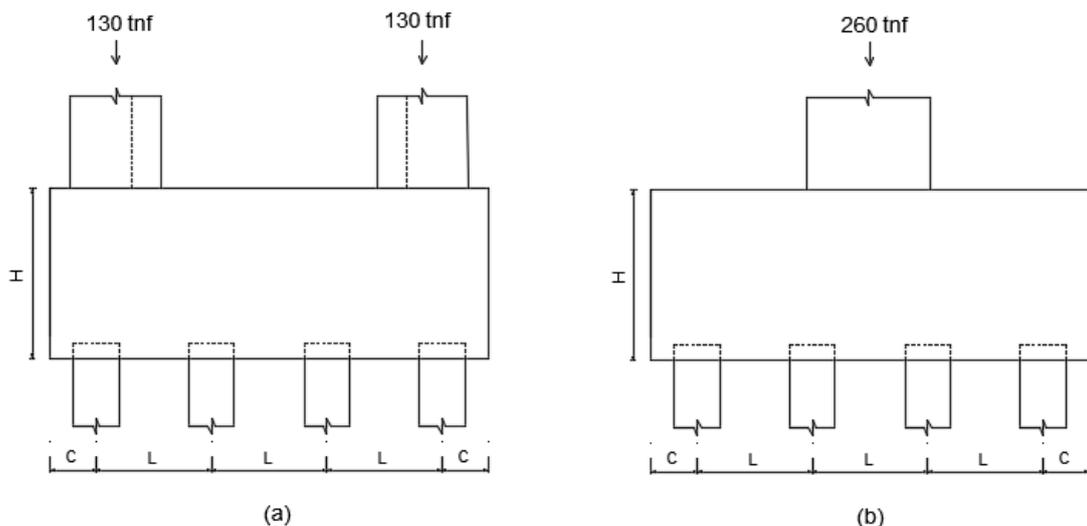


Fonte: Autor (2022)

Os blocos analisados possuem 12 estacas de concreto. São estacas quadradas, com dimensão de 29,5 cm x 29,5 cm. O comprimento das estacas foi definido de acordo com o método de Aoki Velloso (1975) utilizando os dados apresentados na sondagem no item anterior. De acordo com o tipo de estaca utilizado, foi definido o seu comprimento como 6 metros, pois na altura inferior ultrapassa o limite de golpes para a sua execução sem utilizar recursos especiais.

Com isso, definindo o comprimento, foi calculado pelo método a capacidade de carga das estacas, sendo de 21,85 tnf em cada. Como os blocos possuem 12 estacas, foi calculado a carga total e com isso foi definida a carga atuante nos pilares. Nos blocos com pilares associados, em cada pilar a carga atuante considerada foi de 130 tnf e de 260 tnf nos blocos com pilar equivalente. Na figura 17 a seguir, estão representados os carregamentos nos blocos com pilar associado (a) e nos blocos com pilar equivalente (b).

Figura 17 – Vista longitudinal dos blocos



Fonte: Autor (2022)

Com base na descrição do solo e dos dados da sondagem, pode-se obter, através de métodos semi-empíricos o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Na Tabela 10 estão apresentados os parâmetros referentes ao solo.

Tabela 10 - Parâmetros do solo

Profundidade	NSPT	Característica	Tipo de solo	E (kN/cm <sup>2</sup> )	$\nu$
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	3,325	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

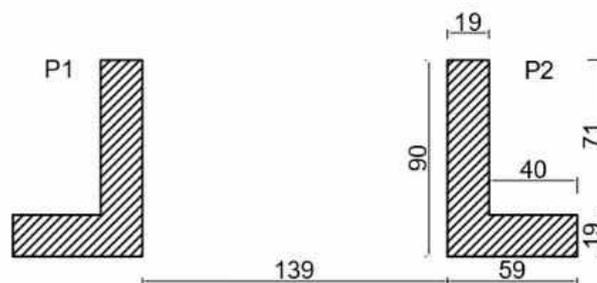
Fonte: Autor (2022)

### 3.3 DIMENSIONAMENTO DOS MODELOS

#### 3.3.1 Seções dos pilares

Nos blocos analisados, foram definidos dois tipos de geometria de pilar. Em alguns modelos, a seção do pilar foi em “L”, sendo dois pilares associados, com a distância entre eles sendo de 139 cm. A Figura 18 ilustra a dimensão desses pilares e o espaçamento entre eles. As medidas estão em centímetros.

Figura 18 – Seção dos pilares associados

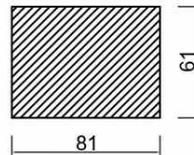


Fonte: Autor (2022)

Nos outros modelos, foi adotado um pilar com área equivalente à área dos pilares associados. Inicialmente, foi calculada a área total dos pilares, que é de 4940 cm<sup>2</sup>. Mantendo a

mesma proporção do bloco, foi determinado um pilar retangular, que possui suas medidas representadas na Figura 19. Medidas em centímetros.

Figura 19 – Seção do pilar equivalente



Fonte: Autor (2022)

### 3.3.2 Alturas dos blocos

Para poder dimensionar a altura dos blocos, inicialmente foi calculada a distância entre o centro de uma estaca da extremidade até o centro de gravidade do pilar mais próximo. Essa distância foi de 77,12 cm. A ABNT NBR 6118 (2014) determina que as bielas inclinadas devem ter um ângulo de inclinação cuja tangente esteja entre 0,57 e 2 em relação ao eixo da armadura longitudinal do elemento.

Portanto, para determinar as alturas que serão analisadas, foram considerados os valores de tangente mínima como 0,57, média como 1,285, e máxima como 2, de acordo com a norma. Para calcular a altura útil foi utilizada a Equação 3.1.

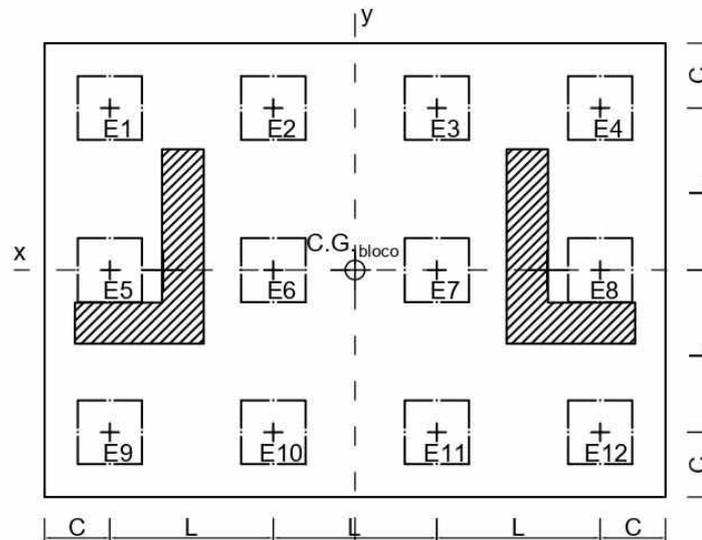
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{\text{dist L}} \quad 3.1$$

Substituindo os valores de tangente mínima, máxima e média, foram encontrados os valores das alturas úteis, que foram nomeadas como d1, d2 e d3, que resultaram respectivamente, 44 cm, 100 cm e 155 cm. Considerando o comprimento de embutimento das estacas como 10 cm, foi possível encontrar as alturas dos blocos, que foram de respectivamente, 54 cm, 110 cm e 165 cm.

### 3.3.3 Dimensões em planta dos blocos

Para facilitar a análise, a maioria dos valores em planta foram fixados. Em alguns blocos, foram definidos pilares associados com formato em “L”. Na Figura 20 a seguir, está representada a geometria desse bloco e a locação dos pilares e estacas. As medidas estão em centímetros.

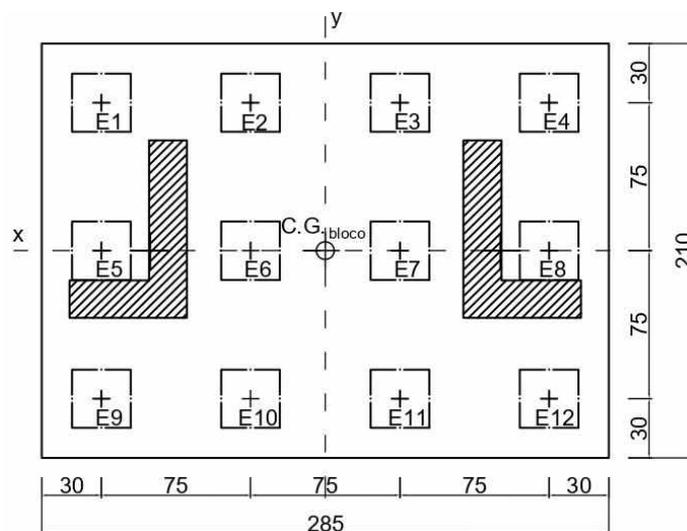
Figura 20 – Bloco em planta com pilares associados



Fonte: Autor (2022)

Para definir as dimensões do bloco foram calculados os valores de L, que é a distância entre as estacas, e de C, que é a distância entre a face externa do bloco até o centro de gravidade da estaca da extremidade. O valor L foi considerado como o diâmetro das estacas multiplicado por 2,5, portanto foi encontrado o valor de 75 cm. Já o valor de C, é metade do diâmetro das estacas somado a 15 cm, o que totalizou 30 cm. Na Figura 21 estão as dimensões do bloco analisado.

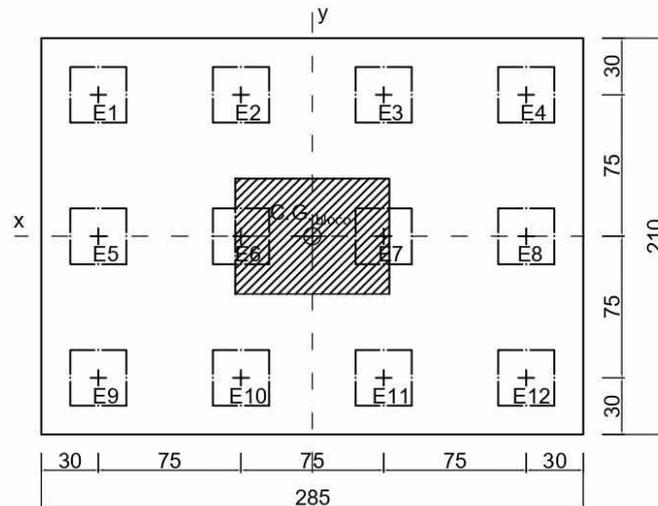
Figura 21 – Dimensões do bloco com pilares associados (medidas em cm)



Fonte: Autor (2022)

Em alguns blocos, o pilar adotado foi equivalente, com geometria retangular. Na figura 22 a seguir pode-se ver esse bloco em planta.

Figura 22 – Dimensões do bloco com pilar equivalente (medidas em cm)



Fonte: Autor (2022)

### 3.3.4 Materiais

Serão analisados blocos com três resistências características à compressão para o concreto: 25, 35 e 45 MPa. No pilar o  $f_{ck}$  adotado foi de 25 MPa e nas estacas foi de 40 MPa. O coeficiente de Poisson do concreto adotado será de 0,2.

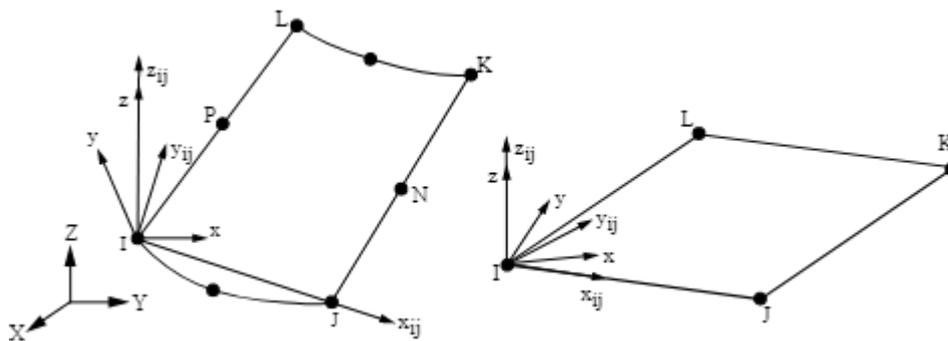
## 4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

### 4.1 ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS

#### 4.1.1 *Surf154*

O elemento SURF154 é usado para várias aplicações de carga e efeito de superfície em análises estruturais 3D. Ele pode ser sobreposto em uma face de área de qualquer elemento 3D. Várias cargas e efeitos de superfície podem existir simultaneamente. Além disso, é um elemento definido por quatro a oito nós (ANSYS, 2022). A geometria, as localizações dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento são mostrados na Figura 23 a seguir.

Figura 23 - Elemento finito SURF154

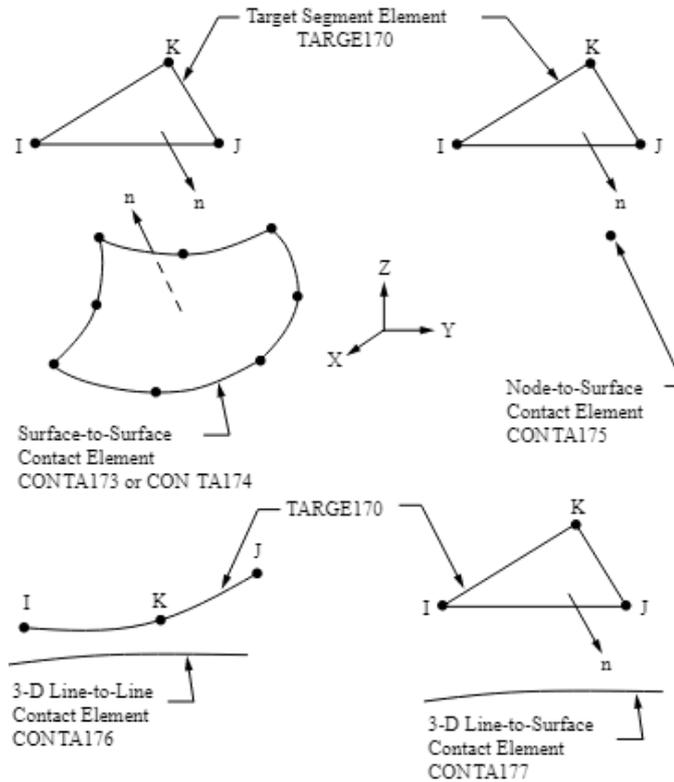


Fonte: ANSYS (2018)

#### 4.1.2 *Targe170*

O elemento finito TARGE170 é usado para representar várias superfícies de "alvo" 3D para os elementos de contato associados. Os próprios elementos de contato se sobrepõem aos elementos sólidos, de casca ou de linha que descrevem o limite de um corpo deformável e estão potencialmente em contato com a superfície alvo. É possível impor deslocamentos translacional ou rotacional, temperatura, voltagem, potencial magnético, pressão de poros e concentração no elemento do segmento alvo. Também é possível impor forças e momentos (ANSYS, 2022). Na Figura 24 estão representados os tipos de segmento disponíveis desse elemento finito.

Figura 24 - Elemento Finito TARGE170

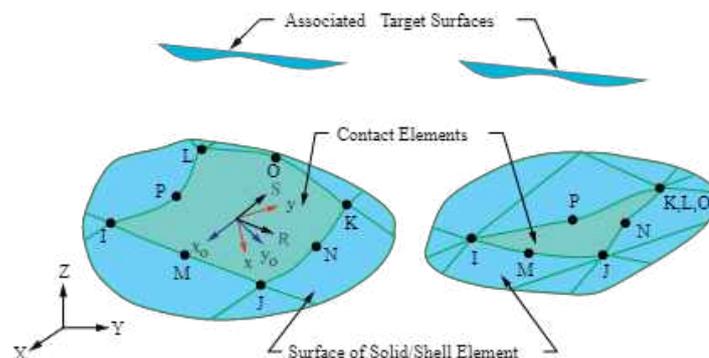


Fonte: ANSYS (2018)

#### 4.1.3 *Contact174*

Segundo ANSYS (2022), CONTA174 é um elemento usado para representar o contato e deslizamento entre superfícies alvo 3D e uma superfície deformável definida por este elemento. O elemento é aplicável a análises de contato estrutural 3D e campo acoplado. Ele pode ser usado tanto para contato baseado em par quanto para contato geral. A Figura 25 representa a geometria desse elemento finito.

Figura 25 - Elemento Finito CONTACT174

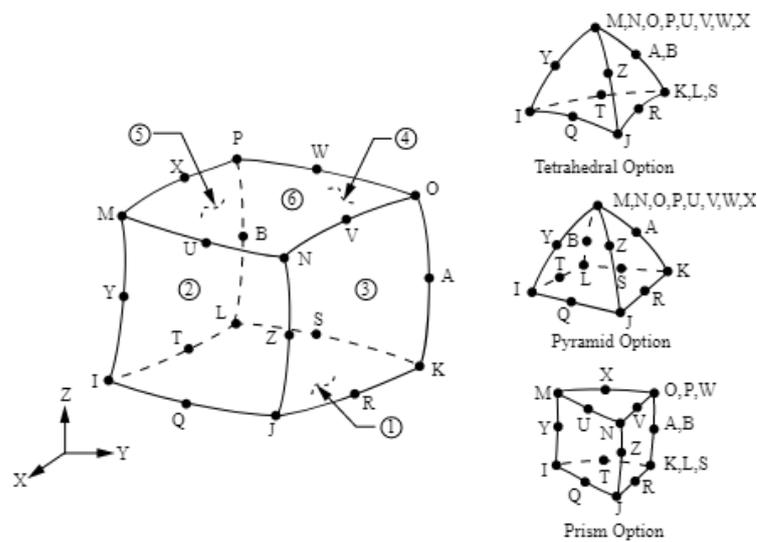


Fonte: ANSYS (2018)

#### 4.1.4 Solid186

O SOLID186 é um elemento sólido 3-D de 20 nós de ordem superior que exibe um comportamento de deslocamento quadrático. O elemento é definido por 20 nós com três graus de liberdade por nó: translações nas direções nodais x, y e z. O elemento suporta plasticidade, hiperelasticidade, fluência, enrijecimento por tensão, grande deflexão e grande capacidade de deformação. A Figura 26 apresenta a geometria do elemento finito.

Figura 26 - Elemento Finito SOLID186



Fonte: ANSYS (2018)

## 4.2 MODELAGEM NUMERICA

Todos os modelos apresentados foram simulados numericamente por meio do programa computacional ANSYS (Versão 2021 R1), plataforma Workbench. Foram necessárias algumas etapas: determinação das propriedades dos materiais e modelos construtivos, modelagem geométrica no programa, escolha do tipo de elemento finito (que foi utilizado os recomendados pelo próprio programa), definição da malha, definição dos carregamentos e condições de contorno e definição das soluções necessárias para realizar a análise em questão.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As modelagens foram realizadas segundo as considerações apresentadas nos dois capítulos anteriores. Foram simulados trinta e seis modelos, com variação na altura do bloco, variação no  $f_{ck}$  do bloco, variação na presença ou não do solo e no tipo de geometria do pilar. Foi realizada uma análise linear elástica dos modelos, e com isso buscou-se analisar a forma que cada parâmetro influenciou no comportamento dos blocos.

Os resultados analisados foram as reações em cada estaca, os deslocamentos verticais na ponta das estacas centrais, no pilar e na face inferior do bloco, as tensões de compressão e tensões de tração. Com os resultados obtidos, através da análise dos valores encontrados, serão expostas as considerações a respeito da influência de cada um dos quatro parâmetros que foram alterados nos modelos analisados.

### 5.2 REAÇÕES NAS ESTACAS

Foram calculadas as reações nas doze estacas em todos os modelos. Os resultados estão expostos na Tabela 11, com o valor de reação de cada estaca e nos modelos com a presença do solo, o valor da força atuante que é transferido para o solo. Foram analisados os resultados obtidos de reação em cada uma das 12 estacas do bloco e em todos os 36 modelos. Com isso, foram verificadas as influências dos parâmetros analisados. Na Tabela 12, pode-se verificar as porcentagens de reações transmitidas para o solo em relação à força atuante total nos modelos com a presença do solo.

Tabela 11 - Resultado das reações das estacas em kN

Blocos	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3	Estaca 4	Estaca 5	Estaca 6	Estaca 7	Estaca 8	Estaca 9	Estaca 10	Estaca 11	Estaca 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	2221,528	378,472
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	2219,894	380,106
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	2219,504	380,496
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	2219,256	380,744
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	2600,02	
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	2600,02	
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	2600,02	
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	2599,98	
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	2218,042	381,958
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	77,8	77,8	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	2218,974	381,026
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

Fonte: Autor (2022)

Tabela 12 – Porcentagem das reações transmitidas para o solo

Blocos	Reação transmitida para o solo	Blocos	Reação transmitida para o solo
BPrH1SC25	14,534%	BPaH1SC25	14,687%
BPrH1SC35	14,557%	BPaH1SC35	14,691%
BPrH1SC45	14,575%	BPaH1SC45	14,693%
BPrH2SC25	14,619%	BPaH2SC25	14,645%
BPrH2SC35	14,634%	BPaH2SC35	14,655%
BPrH2SC45	14,644%	BPaH2SC45	14,662%
BPrH3SC25	5,052%	BPaH3SC25	5,038%
BPrH3SC35	5,050%	BPaH3SC35	5,041%
BPrH3SC45	5,049%	BPaH3SC45	5,041%

Fonte: Autor (2022)

### 5.2.1 Influência do $f_{ck}$

Foram analisados os resultados de reações nas 12 estacas do modelo e foi observada a influência do parâmetro  $f_{ck}$  na reação das estacas. Os valores de  $f_{ck}$  utilizados foram de 25 MPa, 35 MPa e 45 MPa. As figuras 27 a 38 representam os resultados nos modelos analisados.

Figura 27 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular e altura de 54 cm (kN)

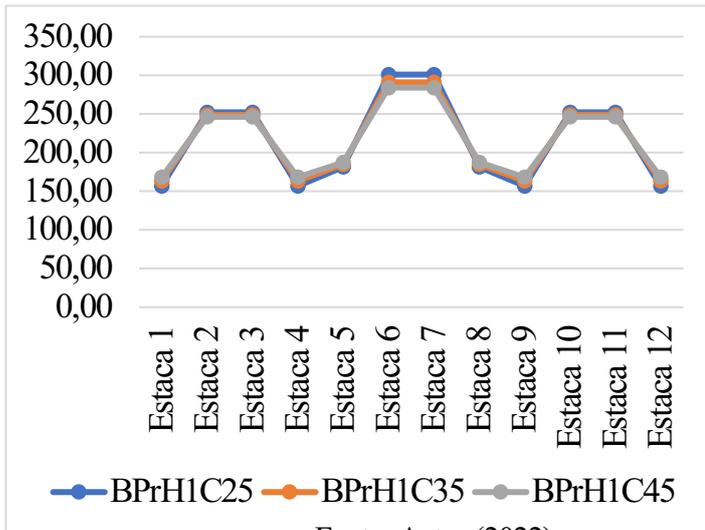


Figura 28 - Reação das estacas - Blocos com pilar retangular e altura de 110 cm (kN)

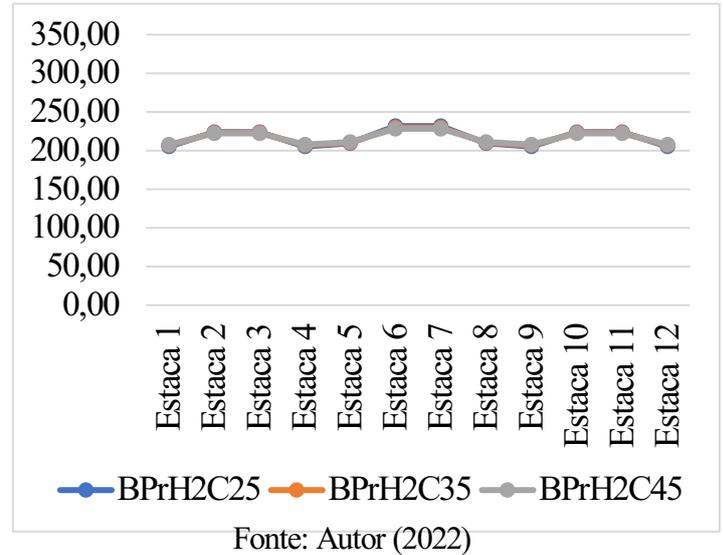


Figura 29 - Reação das estacas - Blocos com pilar retangular e altura de 165 cm (kN)

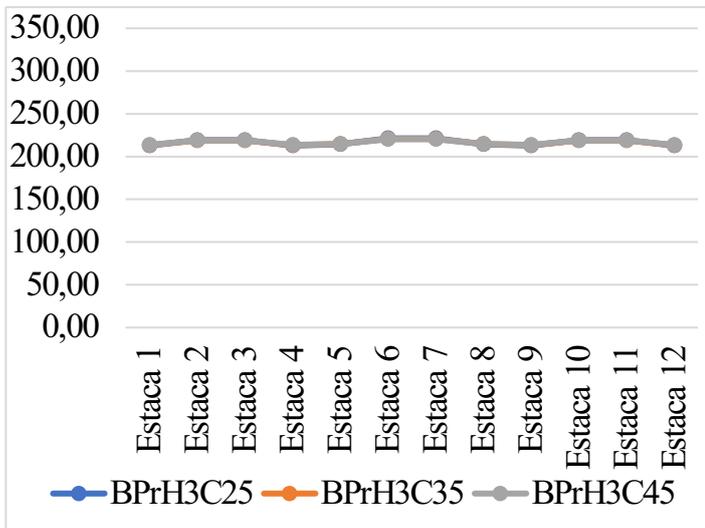


Figura 30 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular, altura de 54 cm e presença do solo (kN)

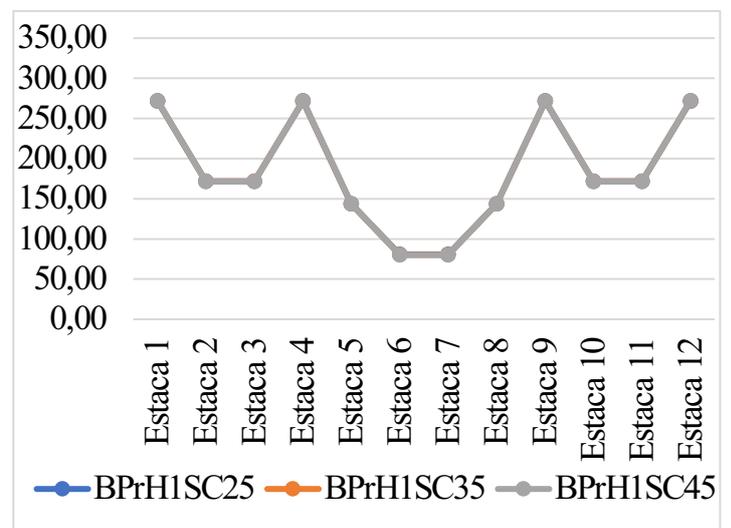
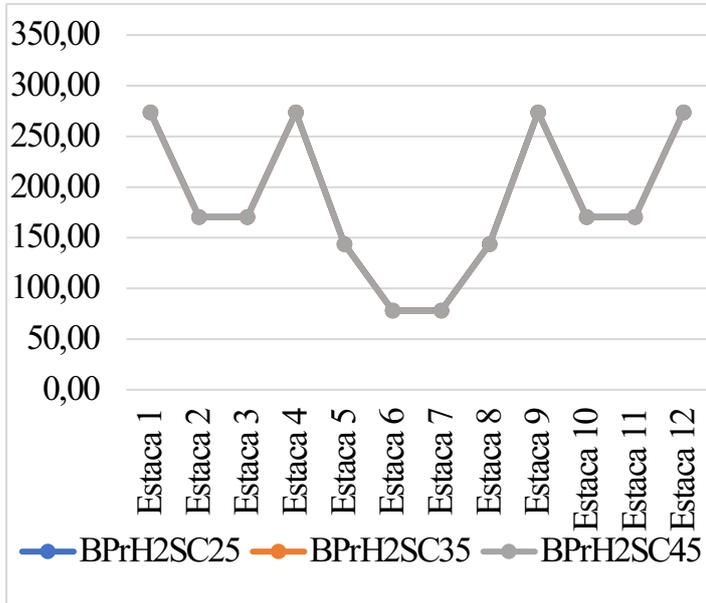
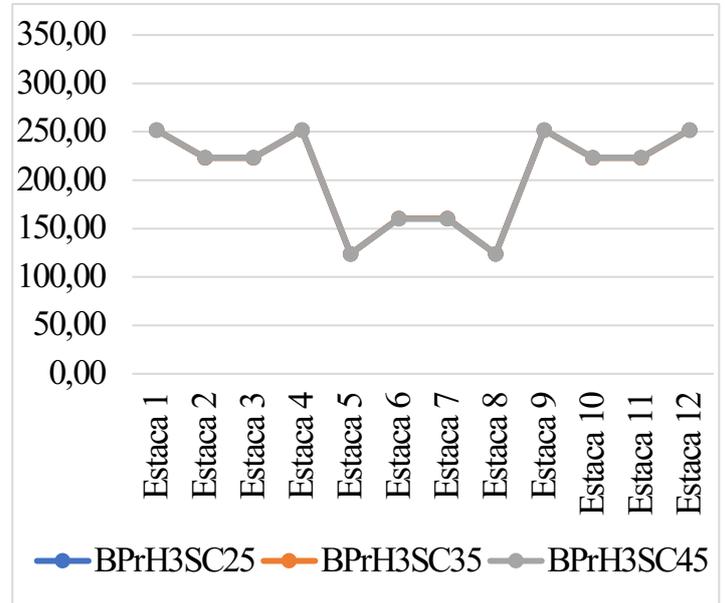


Figura 31 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular, altura de 110 cm e presença do solo (kN)



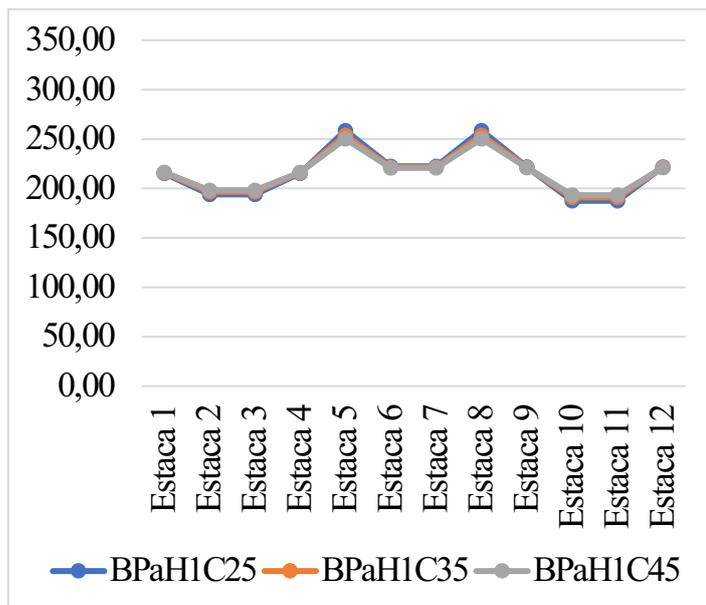
Fonte: Autor (2022)

Figura 32 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular, altura de 165 cm e presença do solo (kN)



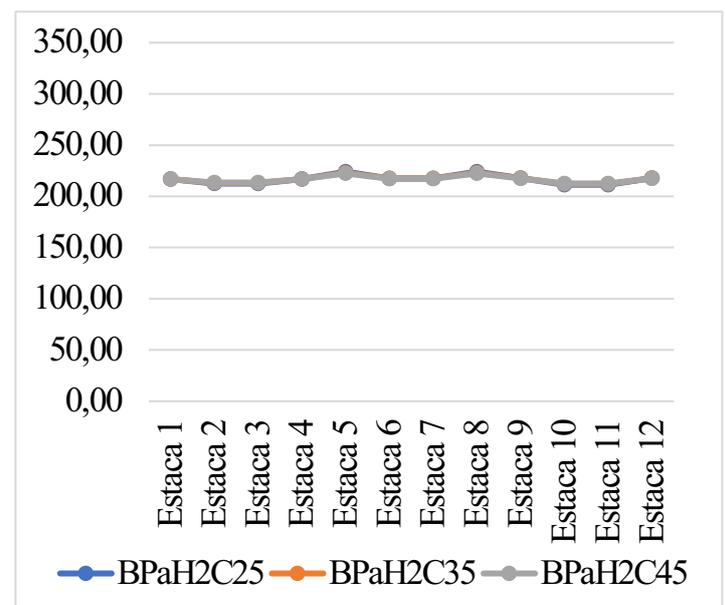
Fonte: Autor (2022)

Figura 33 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e altura de 54 cm (kN)



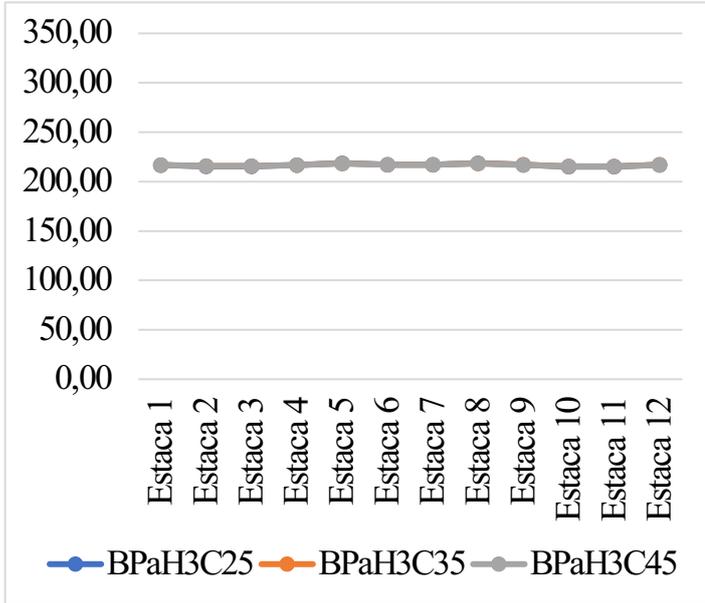
Fonte: Autor (2022)

Figura 34 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e altura de 110 cm (kN)



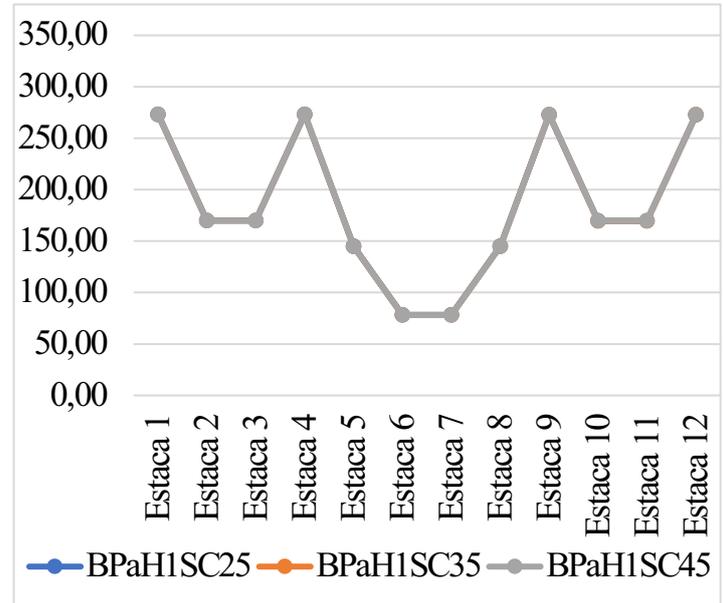
Fonte: Autor (2022)

Figura 35 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e altura de 165 cm (kN)



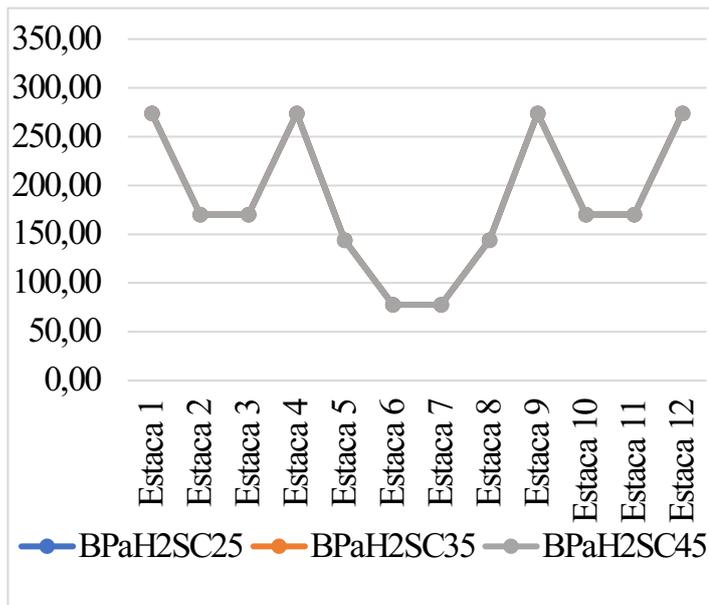
Fonte: Autor (2022)

Figura 36 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados, altura de 54 cm e presença do solo (kN)



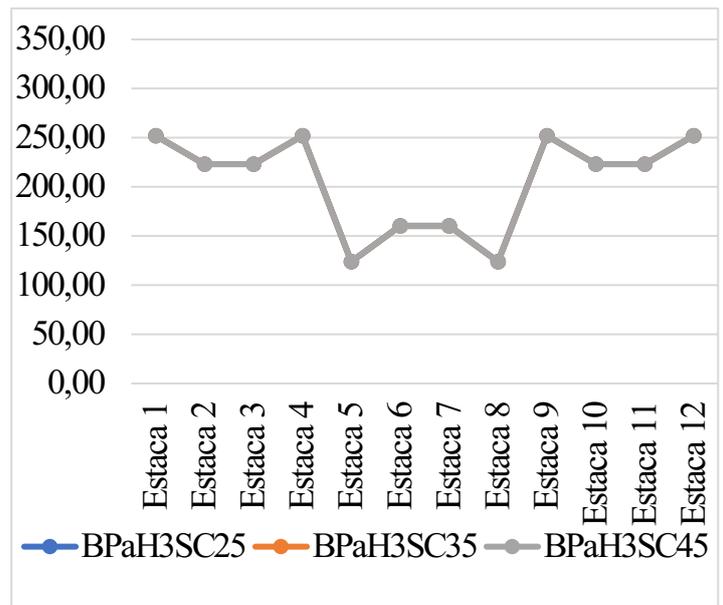
Fonte: Autor (2022)

Figura 37 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados, altura de 110 cm e presença do solo (kN)



Fonte: Autor (2022)

Figura 38 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados, altura de 165 cm e presença do solo (kN)

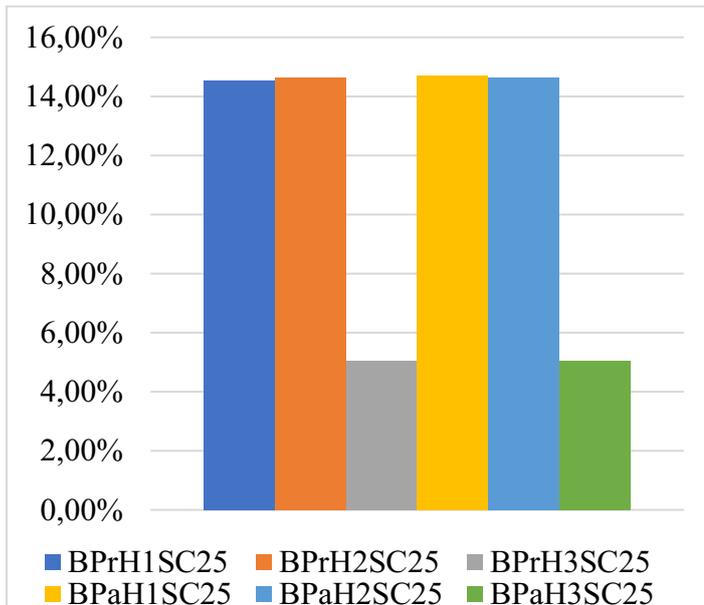


Fonte: Autor (2022)

Conforme pode-se observar nas Figuras 27 a 38, quando ocorre a alteração do  $f_{ck}$  nos modelos, ocorre uma pequena diferença nos valores das reações das estacas. Apenas nos modelos com pilar retangular e altura de 54 cm, que estão representados na Figura 28, pode-se perceber uma diferença maior nos resultados das reações conforme se altera o valor do  $f_{ck}$ . Sendo que a diferença é maior nas estacas centrais (estacas 6 e 7) e nessas estacas o valor maior é encontrado no modelo com  $f_{ck}$  igual a 25 MPa e o menor, com  $f_{ck}$  igual a 45 MPa.

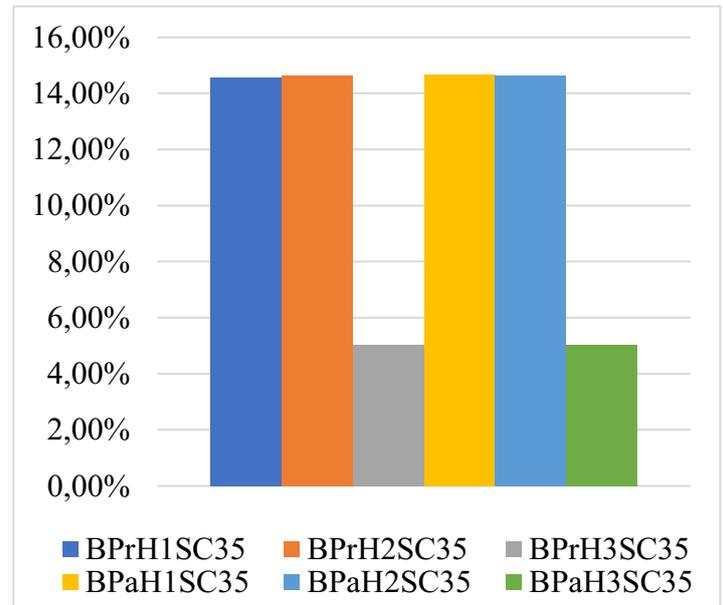
Nos blocos com a presença do solo, uma parte do valor das forças atuantes é passado como forças de reações para o solo. As Figuras 39 a 41 mostram a variação das reações transferidas para o solo nos modelos, ao alterar os valores de  $f_{ck}$ .

Figura 39 – Porcentagem transferida para o solo - Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa



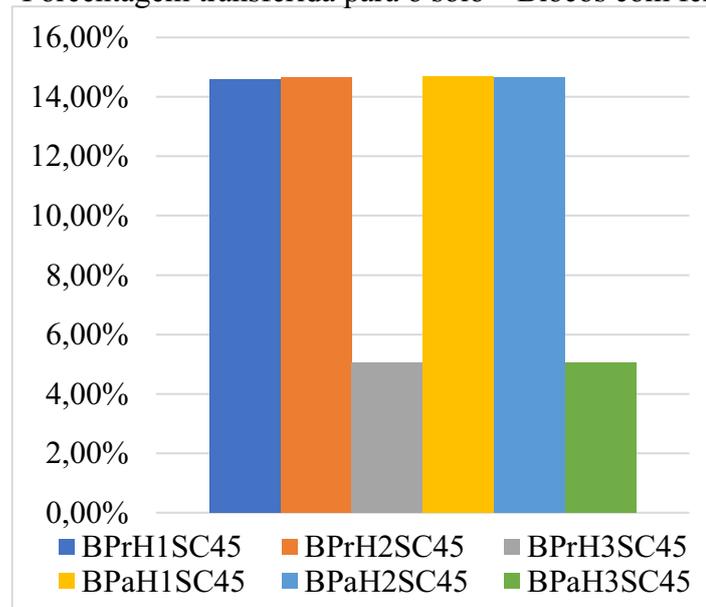
Fonte: Autor (2022)

Figura 40 - Porcentagem transferida para o solo - Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa



Fonte: Autor (2022)

Figura 41 – Porcentagem transferida para o solo – Blocos com  $f_{ck}$  de 45 MPa



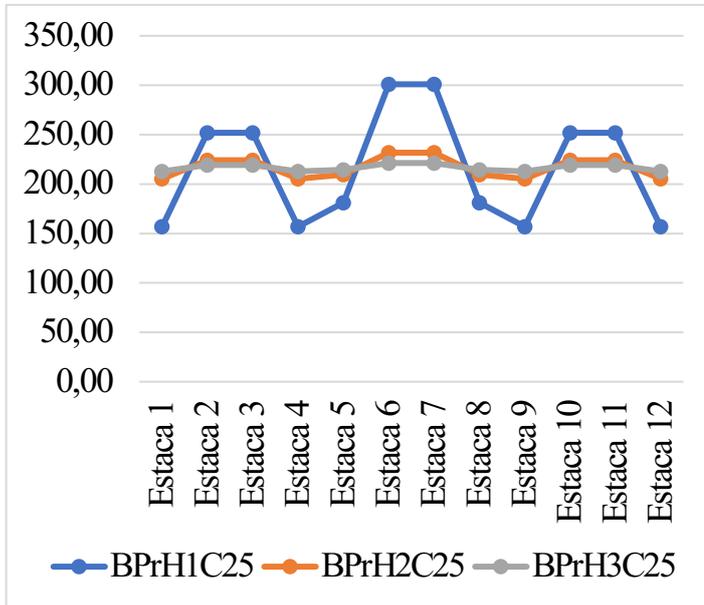
Fonte: Autor (2022)

Conforme podemos observar, quando ocorre a variação do  $f_{ck}$ , ocorre uma pequena alteração nos valores de reação que são transferidas para o solo. Porém, essa alteração não é considerável, visto que as alterações são bem mínimas. Portanto, o parâmetro  $f_{ck}$  não é influente dos valores de reações passados para o solo.

### 5.2.2 Influência da altura

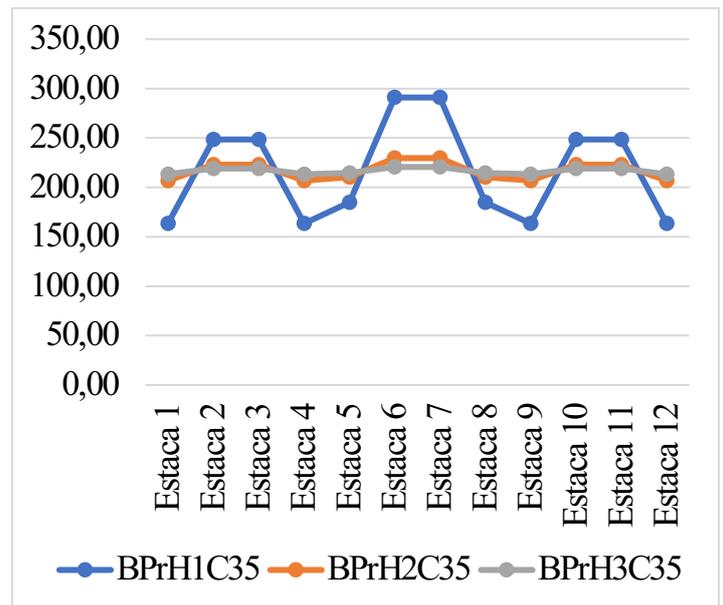
As Figuras 42 a 53 ilustram os valores obtidos de reações das estacas, em relação à alteração da altura. As alturas utilizadas foram de 54 cm, 110 cm e 165 cm, sendo representadas no nome do modelo por H1, H2 e H3, respectivamente.

Figura 42 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular e  $f_{ck}$  de 25 MPa (kN)



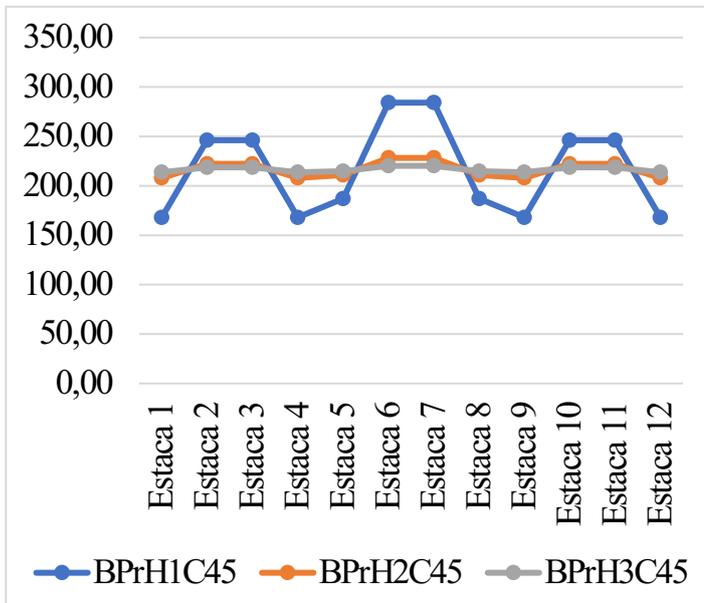
Fonte: Autor (2022)

Figura 43 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular e  $f_{ck}$  de 35 MPa (kN)



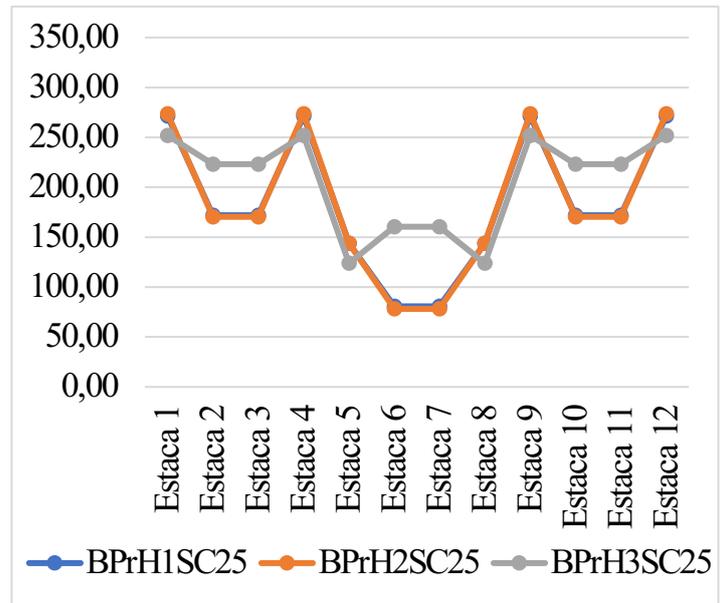
Fonte: Autor (2022)

Figura 44 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular e  $f_{ck}$  de 45 MPa (kN)



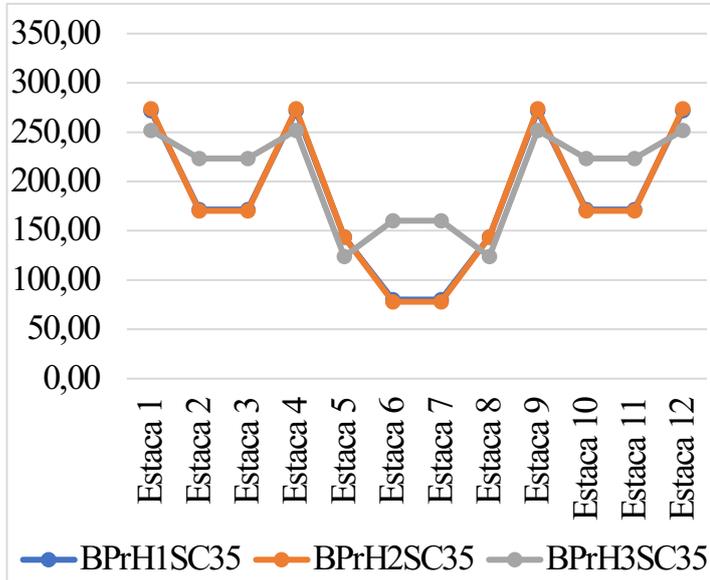
Fonte: Autor (2022)

Figura 45 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular,  $f_{ck}$  de 25 MPa e presença do solo (kN)



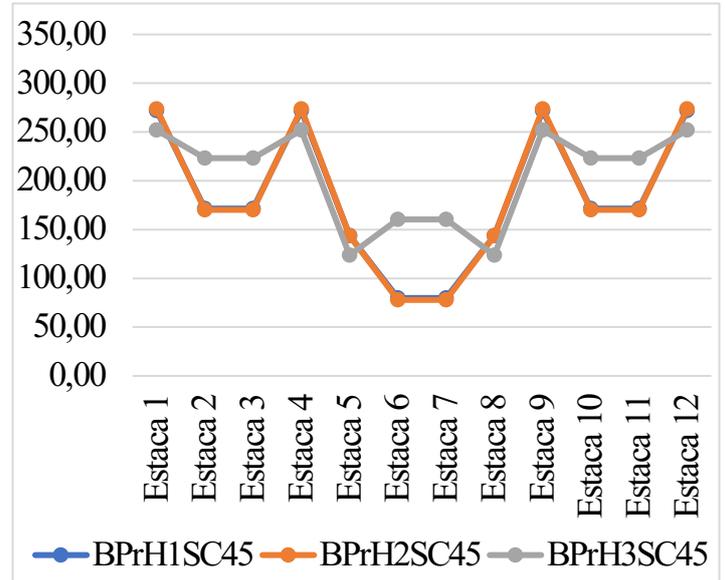
Fonte: Autor (2022)

Figura 46 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular,  $f_{ck}$  de 35 MPa e presença do solo (kN)



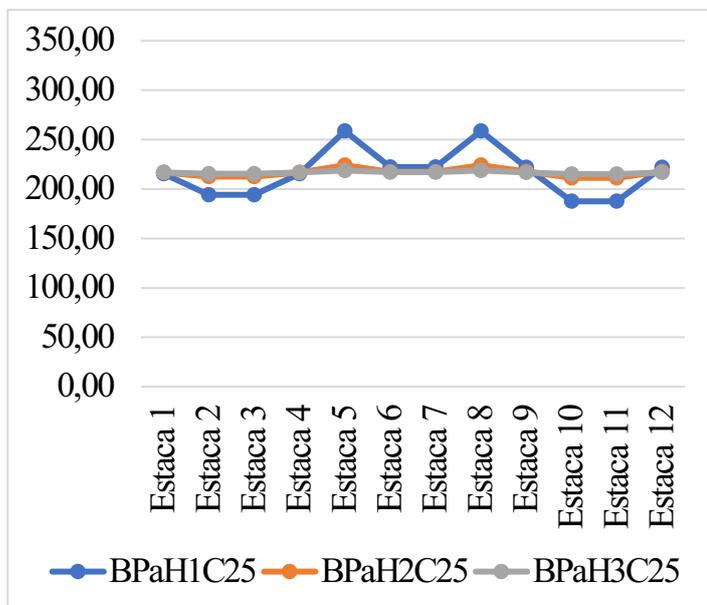
Fonte: Autor (2022)

Figura 47 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular,  $f_{ck}$  de 45 MPa e presença do solo (kN)



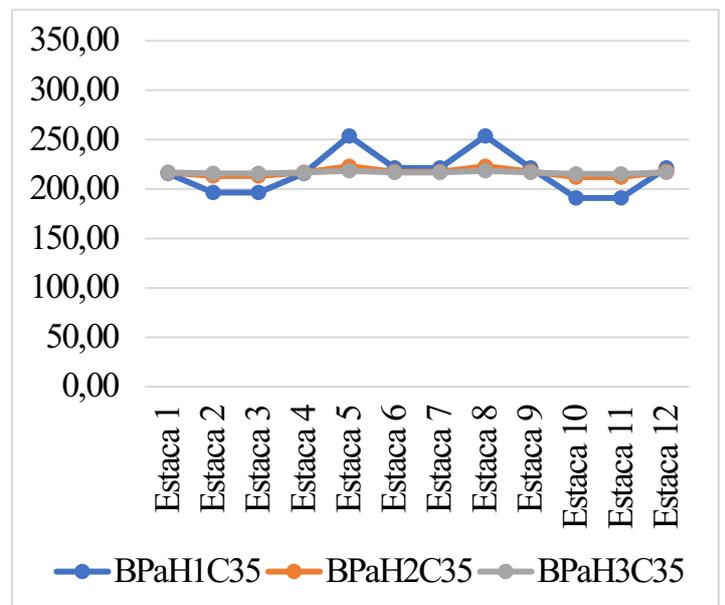
Fonte: Autor (2022)

Figura 48 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e  $f_{ck}$  de 25 MPa (kN)



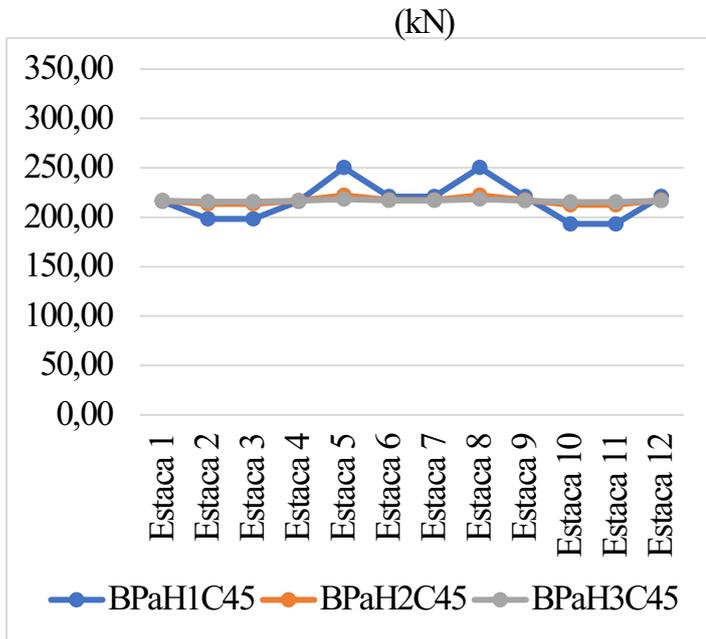
Fonte: Autor (2022)

Figura 49 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e  $f_{ck}$  de 35 MPa (kN)



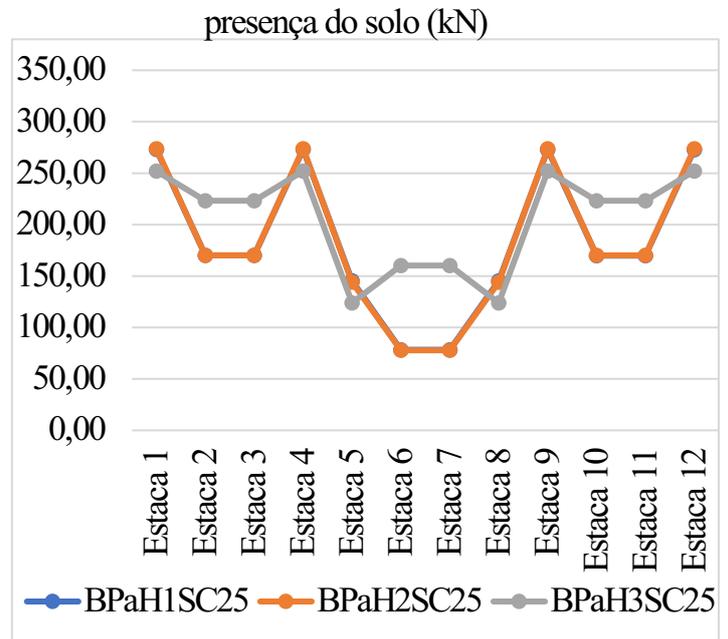
Fonte: Autor (2022)

Figura 50 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e  $f_{ck}$  de 45 MPa



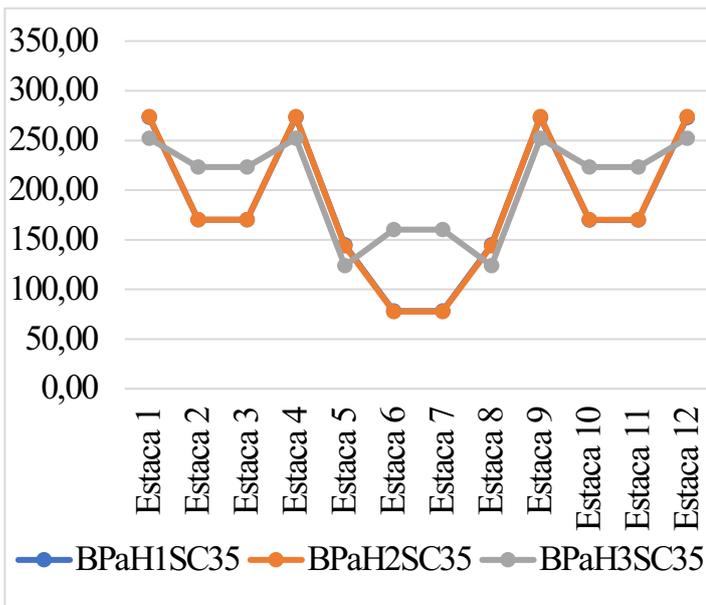
Fonte: Autor (2022)

Figura 51 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados,  $f_{ck}$  de 25 MPa e presença do solo (kN)



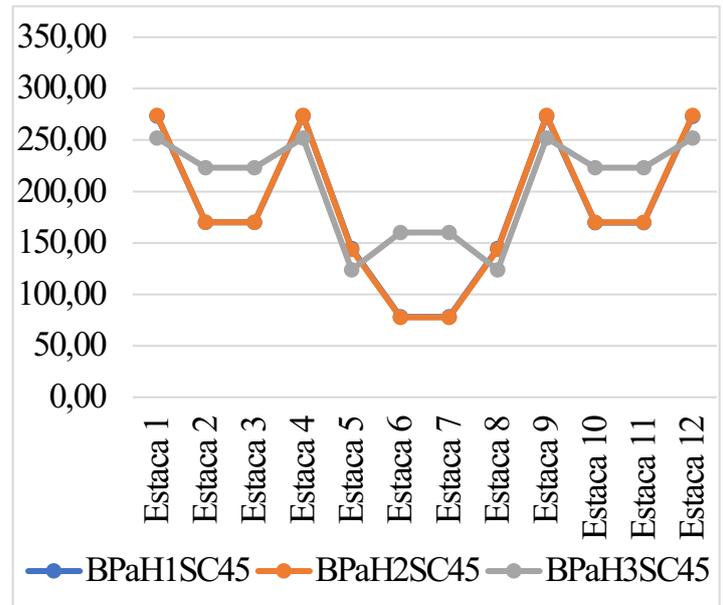
Fonte: Autor (2022)

Figura 52 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados,  $f_{ck}$  de 35 MPa e presença do solo (kN)



Fonte: Autor (2022)

Figura 53 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados,  $f_{ck}$  de 45 MPa e presença do solo (kN)



Fonte: Autor (2022)

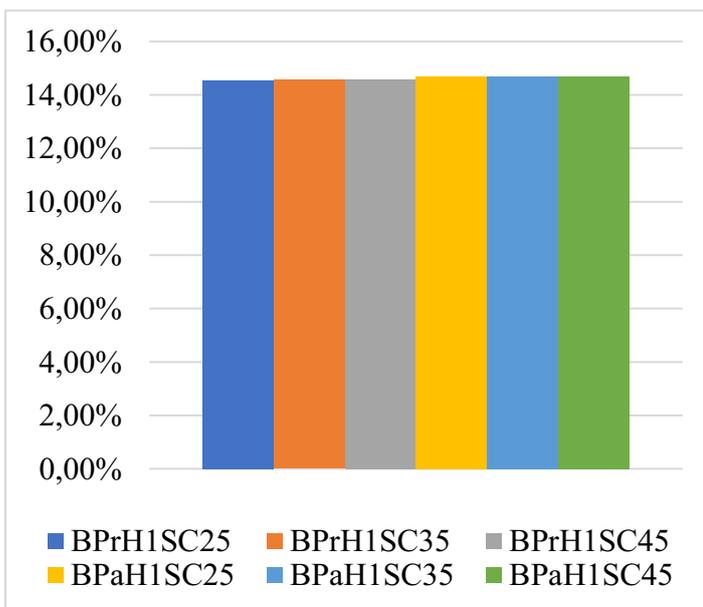
Conforme observado nas Figuras anteriores, podemos tirar algumas considerações. Nas Figuras 42 a 44 estão representados os modelos com pilar retangular, sem a presença de solo. Nesses modelos, houve uma variação maior nos resultados de reações no modelo com a menor altura, sendo que os maiores resultados de reações foram nas estacas 2, 3, 6, 7, 10 e 11 e nas alturas de 110 cm e 165 cm, os valores das reações foi distribuído de forma mais uniforme nas 12 estacas.

Nos modelos com pilares associados em “L”, ilustrados nas Figuras 48 a 50, foi observado que os modelos com a menor altura também sofreram maior variação nas reações das estacas, em relação aos modelos com outras alturas, sendo que seus maiores valores de reações foram encontrados nas estacas 5 e 8.

Nos modelos com a presença do solo, tanto com pilar retangular, quanto pilares associados, que estão sendo representados nas Figuras 45 a 47 e nas Figuras 51 a 53, os valores das reações dos modelos com a altura H1 e H2 foram bem próximos, já altura H3, em algumas estacas o valor das reações houve alguma variação, sendo maior nas estacas 2, 3, 6, 7, 10 e 11.

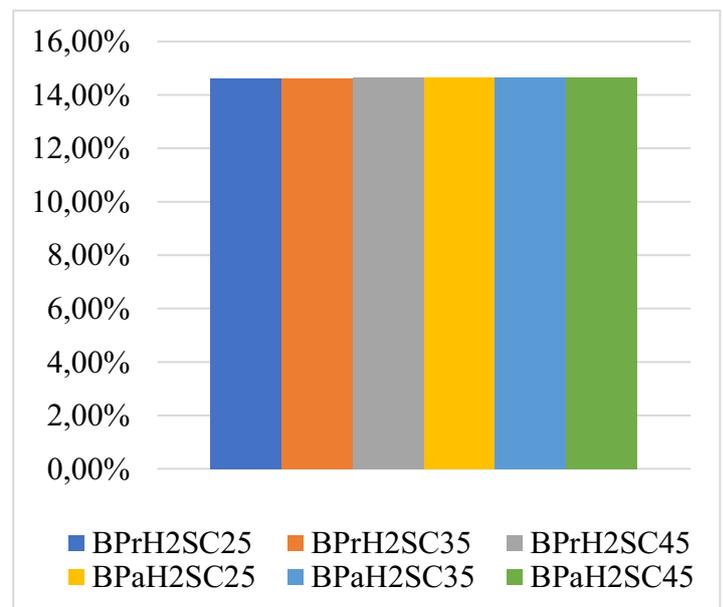
As Figuras 54 a 56 ilustra a influência da altura nos valores de reações transferidas para o solo nos modelos com presença de solo.

Figura 54 - Porcentagem transferida para o solo - Blocos com altura de 54 cm (kN)



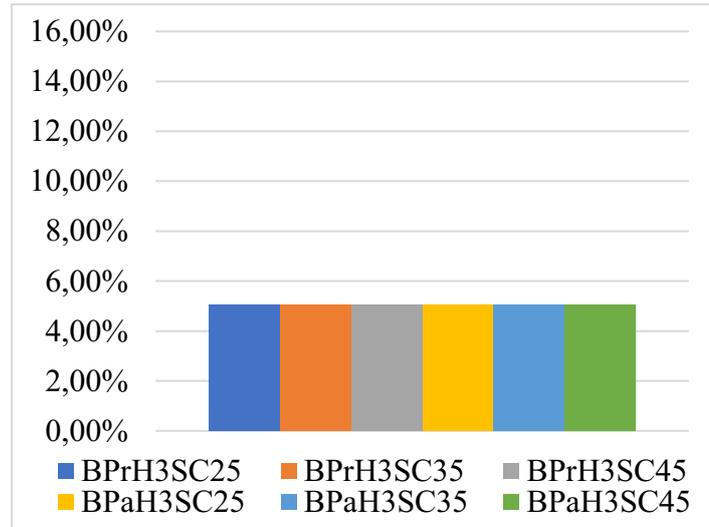
Fonte: Autor (2022)

Figura 55 - Porcentagem transferida para o solo - Blocos com altura de 110 cm (kN)



Fonte: Autor (2022)

Figura 56 - Reação transferida para o solo - Blocos com altura de 165 cm



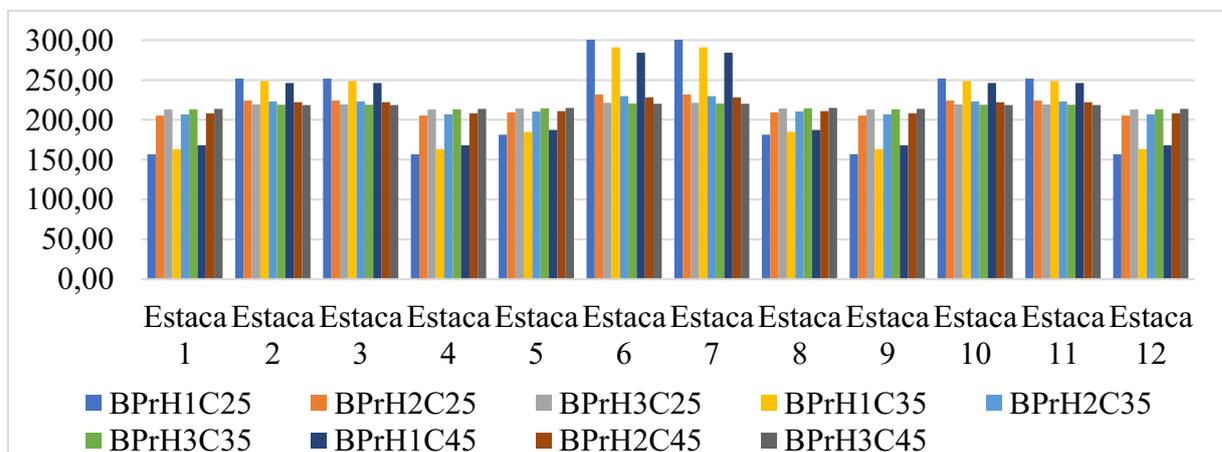
Fonte: Autor (2022)

As Figuras 54 a 56 mostram que nos modelos com a maior altura, ocorre uma grande redução nos valores de reação transferida para o solo. Já nos modelos com as alturas mínima e média, os valores são mais próximos. Isso indica que em blocos sobre estacas com maiores alturas, a tendência é as reações incidirem mais diretamente sobre as estacas, e uma porcentagem menor para o solo.

### 5.2.3 Influência da geometria do pilar

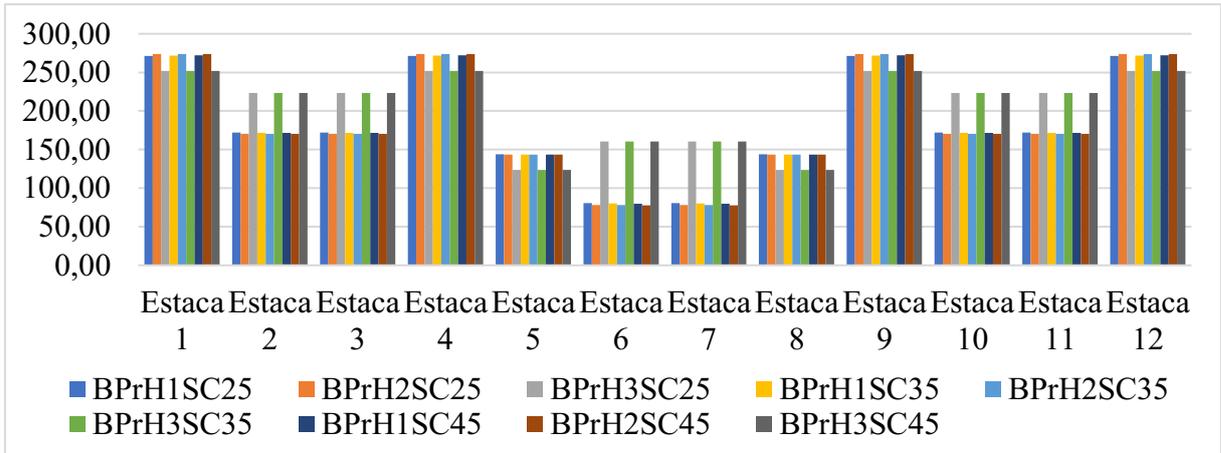
Nas Figuras 57 a 60 estão os resultados de reações de estacas fazendo uma comparação dos blocos com pilar retangular com os blocos com pilares associados.

Figura 57 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular (kN)



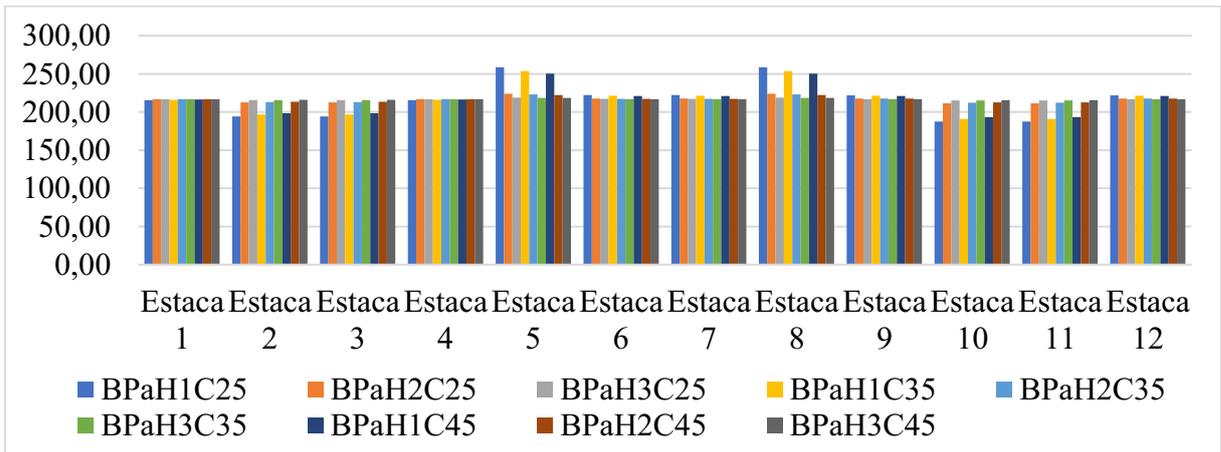
Fonte: Autor (2022)

Figura 58 – Reação das estacas – Blocos com pilar retangular e presença do solo (kN)



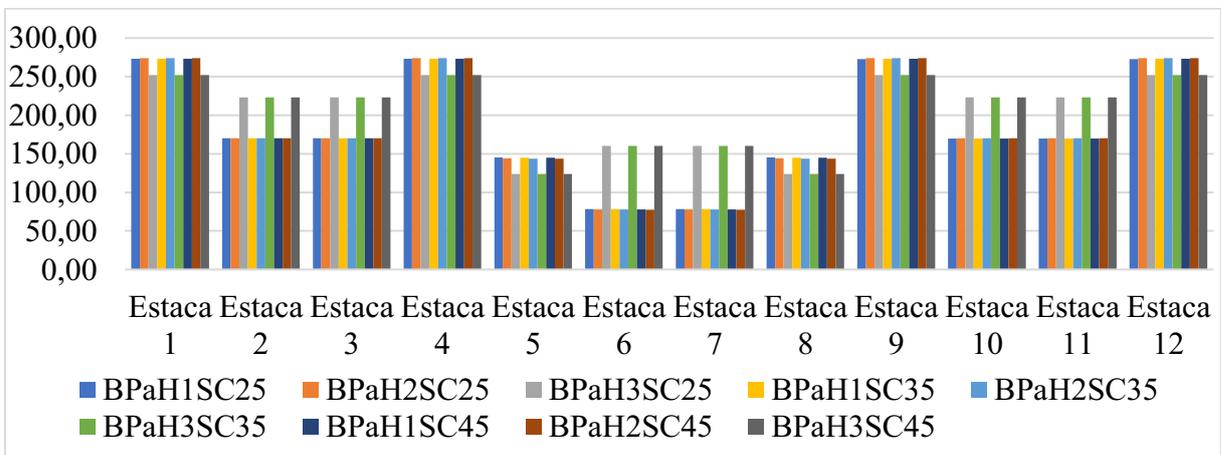
Fonte: Autor (2022)

Figura 59 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados (kN)



Fonte: Autor (2022)

Figura 60 – Reação das estacas – Blocos com pilares associados e presença do solo (kN)



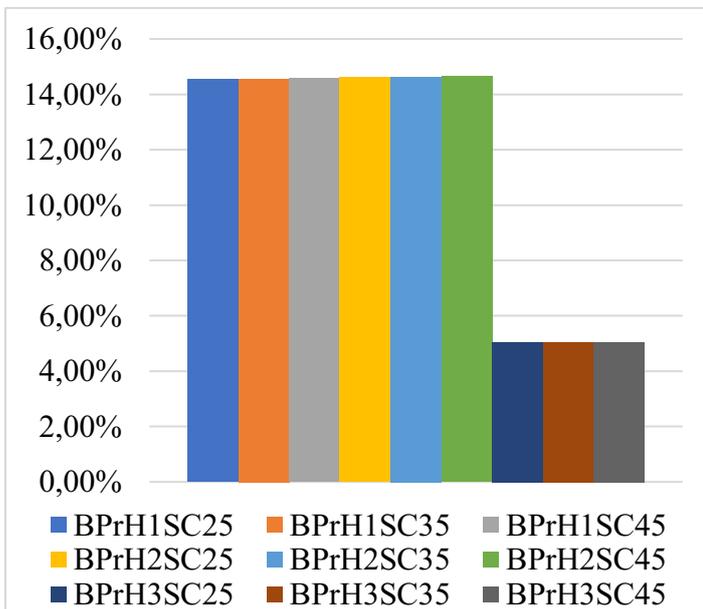
Fonte: Autor (2022)

Conforme foi observado na Figura 57, que ilustra os pilares retangulares sem solo, na maioria dos modelos, as reações das estacas são distribuídas de forma homogênea entre elas, exceto nos modelos com a menor altura, que obteve valores maiores nas estacas centrais, 6 e 7 e valores um pouco menores nas estacas dos cantos. Já nos modelos com pilares associados, ilustrado na Figura 59, os valores maiores se dão nas estacas 5 e 8.

Já nos modelos com presença de solo, representado nas Figuras 58 e 60, tanto nos modelos com pilar retangular e com pilares associados foi obtido um valor bem menor nas estacas centrais, e maior nas estacas 1, 4, 9 e 12. Sendo que nos modelos com a maior altura, o valor foi quase o dobro nas estacas centrais, e um pouco maior que os outros modelos nas estacas 2, 3, 10 e 11. Portanto, a alteração na geometria do pilar, não influenciou nos modelos com solo.

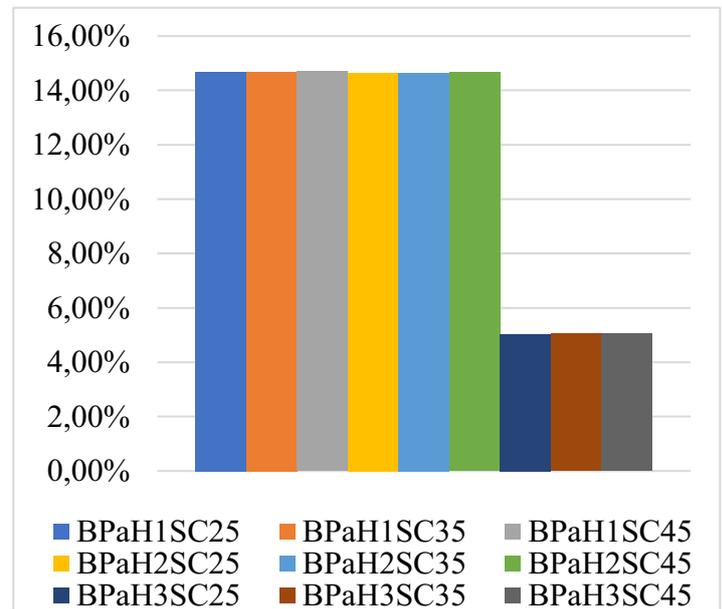
As reações que foram transferidas para o solo, nos modelos que possuem a consideração do solo, estão ilustradas nas Figuras 61 e 62 a seguir.

Figura 61 – Porcentagem transferida para o solo - Blocos com pilar retangular



Fonte: Autor (2022)

Figura 62 – Reação transferida para o solo - Blocos com pilares associados



Fonte: Autor (2022)

Pode-se observar que não há uma grande diferença no valor da reação transferida para o solo nos modelos com pilar retangular em relação aos modelos com pilares associados. Nos modelos com alturas mínima e média os resultados são maiores nos blocos que possuem os pilares associados, já nos modelos com altura máxima os resultados são maiores nos blocos que

possuem pilares associados. Como a diferença é bem pequena, a geometria do pilar não interfere muito nos valores de reação transmitidas para o solo.

#### 5.2.4 *Influência da presença ou não do solo*

Observando ainda as Figuras 57 a 60, foi possível verificar que nos blocos sem a presença do solo, as reações das estacas são distribuídas mais uniforme entre as estacas. Exceto nos modelos com a menor altura, que nos modelos com pilar retangular é maior nas estacas 6 e 7 e nos blocos com pilares associados é um pouco maior nas estacas 5 e 8. E nos modelos com presença de solo, os maiores valores de reações estão concentrados nas estacas 1, 4, 9 e 12.

### 5.3 DESLOCAMENTO NA PONTA DAS ESTACAS CENTRAIS

Foi calculado o deslocamento vertical nos modelos, e foi determinado o valor de deslocamento na ponta das estacas centrais. Esses valores estão detalhados na Tabela 13 a seguir. Nos modelos sem a presença do solo, o valor do deslocamento foi igual a 0, por causa da vinculação das estacas, que nesses modelos foi impedido o deslocamento em todas as direções.

Tabela 13 - Deslocamento na ponta das estacas centrais (m)

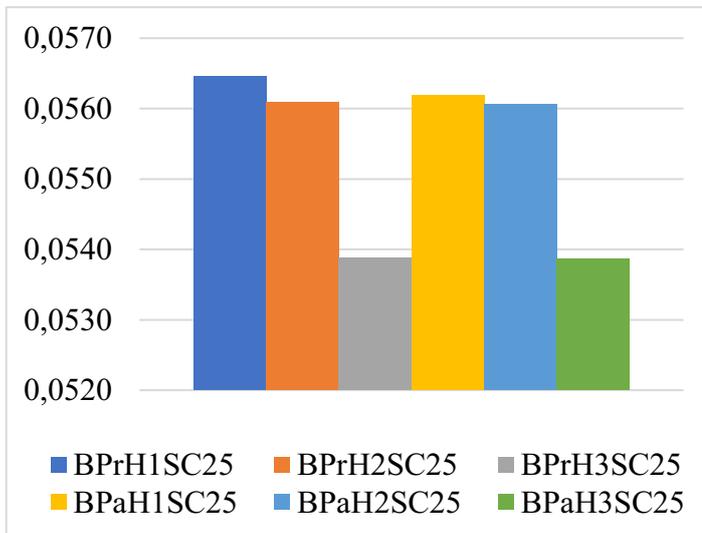
<b>Blocos</b>	<b>Deslocamento</b>	<b>Blocos</b>	<b>Deslocamento</b>
BPRH1SC25	0,05645200	BPaH1SC25	0,05619000
BPRH1SC35	0,05639100	BPaH1SC35	0,05616700
BPRH1SC45	0,05635100	BPaH1SC45	0,05615100
BPRH2SC25	0,05609300	BPaH2SC25	0,05605500
BPRH2SC35	0,05608000	BPaH2SC35	0,05604800
BPRH2SC45	0,05607200	BPaH2SC45	0,05604300
BPRH3SC25	0,05387300	BPaH3SC25	0,05386000
BPRH3SC35	0,05386400	BPaH3SC35	0,05385300
BPRH3SC45	0,05385800	BPaH3SC45	0,05384800

Fonte: Autor (2022)

#### 5.3.1 *Influência do $f_{ck}$*

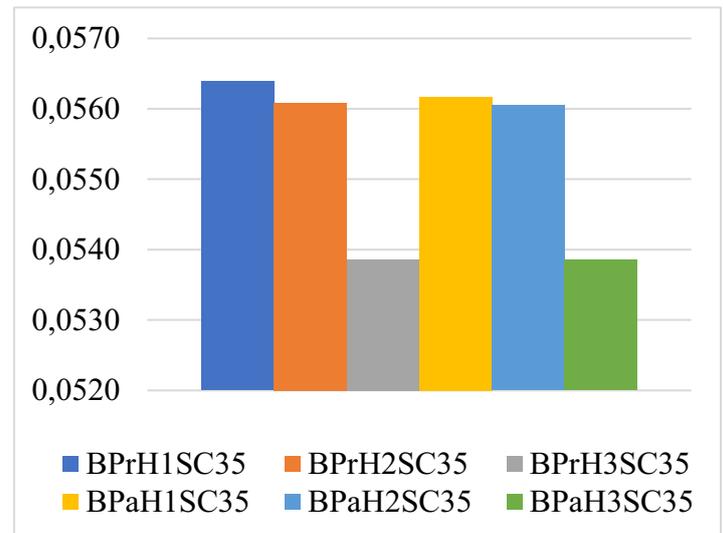
Foram analisados os resultados de deslocamento na ponta das estacas centrais e foram comparados os valores para verificar a influência da variação do  $f_{ck}$ . As Figuras 63 a 65 ilustram os resultados.

Figura 63 – Deslocamento nas estacas centrais – Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa (m)



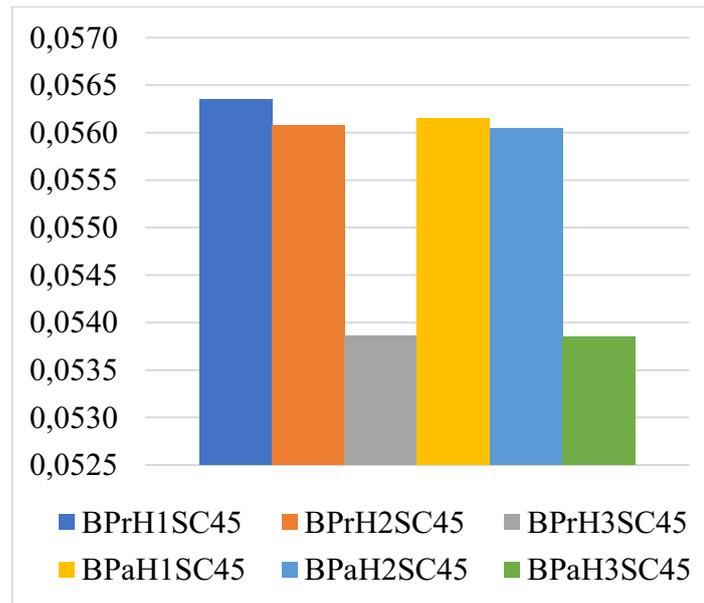
Fonte: Autor (2022)

Figura 64 – Deslocamento nas estacas centrais – Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa (m)



Fonte: Autor (2022)

Figura 65 – Deslocamento nas estacas centrais – Blocos com  $f_{ck}$  de 45 MPa (m)



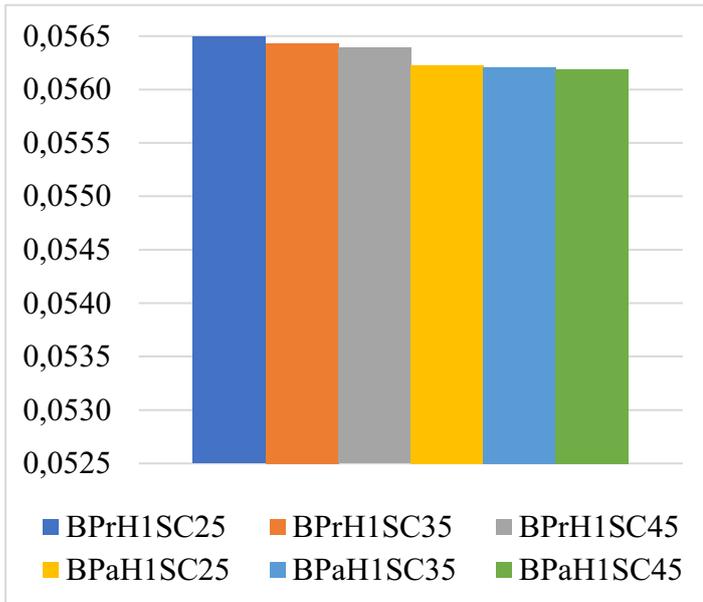
Fonte: Autor (2022)

Como pode-se observar os valores de deslocamento nas estacas centrais não tiveram grande alteração 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.

### 5.3.2 Influência da altura

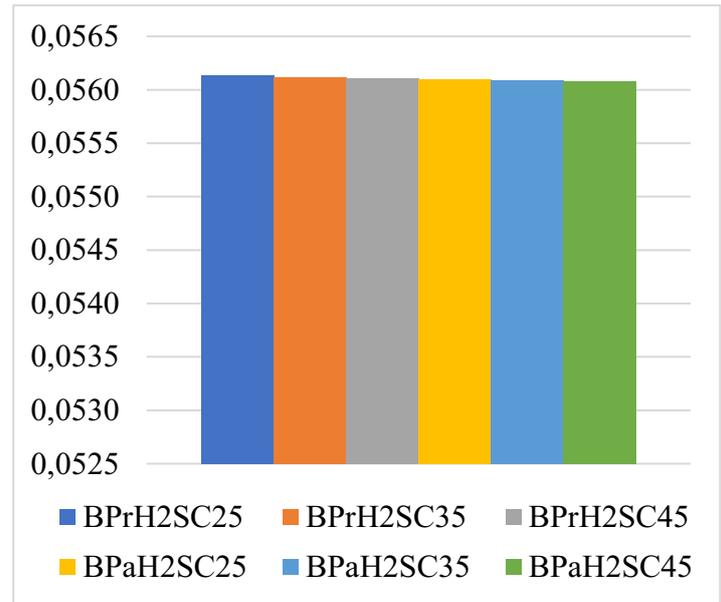
As Figuras 66 a 68 representam as análises dos valores de deslocamento considerando a variação da altura.

Figura 66 – Deslocamento nas estacas centrais – Blocos com altura de 54 cm (m)



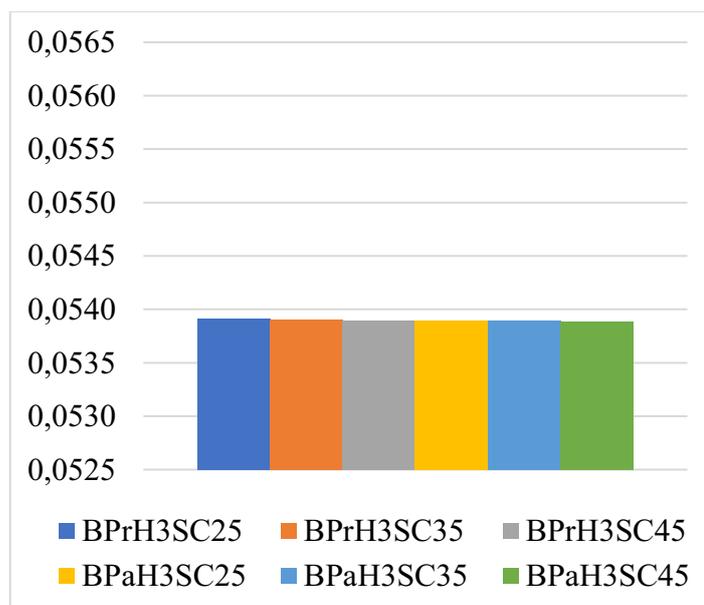
Fonte: Autor (2022)

Figura 67 - Deslocamento nas estacas centrais - Blocos com altura de 110 cm (m)



Fonte: Autor (2022)

Figura 68 – Deslocamento nas estacas centrais – Blocos com altura de 165 cm (m)



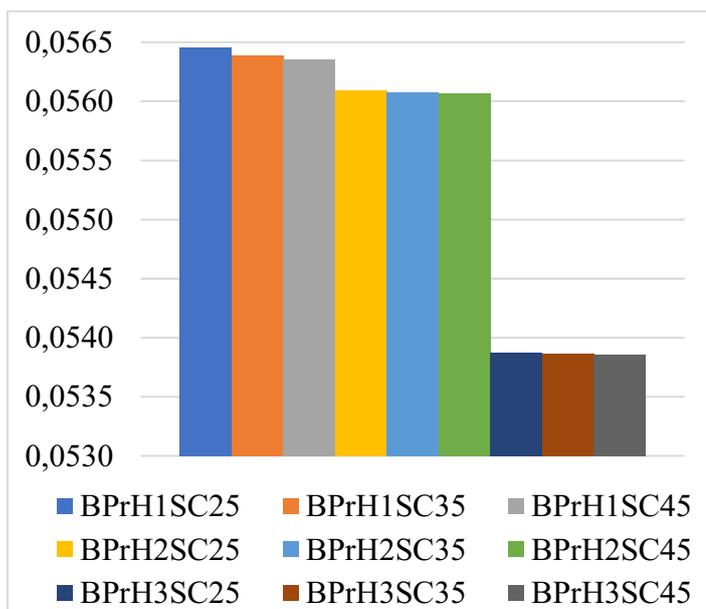
Fonte: Autor (2022)

Conforme pode-se verificar, aumentando a altura, os valores de deslocamento são menores. Portanto, o valor de deslocamento das estacas centrais é inversamente proporcional às alturas dos modelos.

### 5.3.3 Influência da geometria do pilar

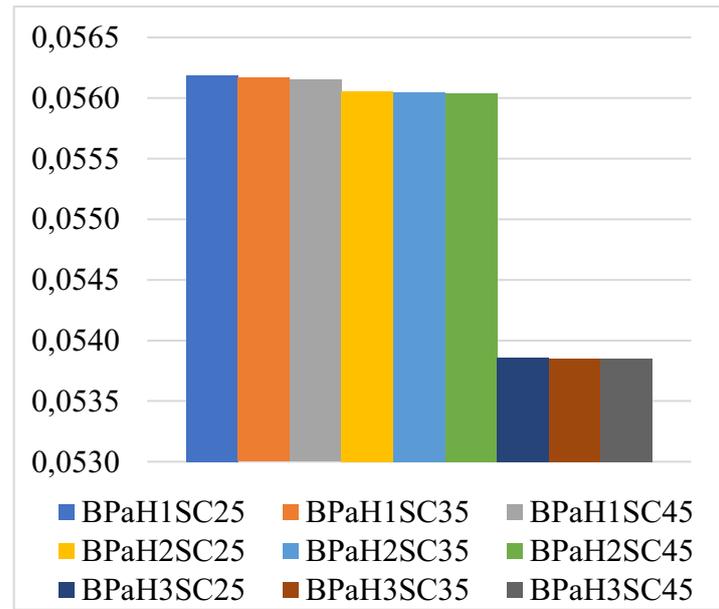
As Figuras 69 e 70 a seguir representam os valores de deslocamento em relação com a geometria do pilar dos modelos, sendo os blocos com pilar retangular e os blocos com pilares associados.

Figura 69 – Deslocamento nas estacas centrais – Blocos com pilar retangular (m)



Fonte: Autor (2022)

Figura 70 - Deslocamento nas estacas centrais - Blocos com pilares associados (m)



Fonte: Autor (2022)

Como podemos observar nas Figuras 69 e 70, os valores de deslocamento nas estacas centrais foram bem próximos nos modelos com pilar retangular e nos modelos com pilares associados.

Apenas nos blocos com menor altura, que os valores são um pouco maior nos blocos com pilar retangular que nos blocos com pilares associados.

## 5.4 DESLOCAMENTO NO PILAR

Na tabela 14 estão apresentados os valores de deslocamento na face do pilar. Esses valores foram analisados considerando a influência dos fatores variados nos modelos.

Tabela 14 - Deslocamento no pilar (m)

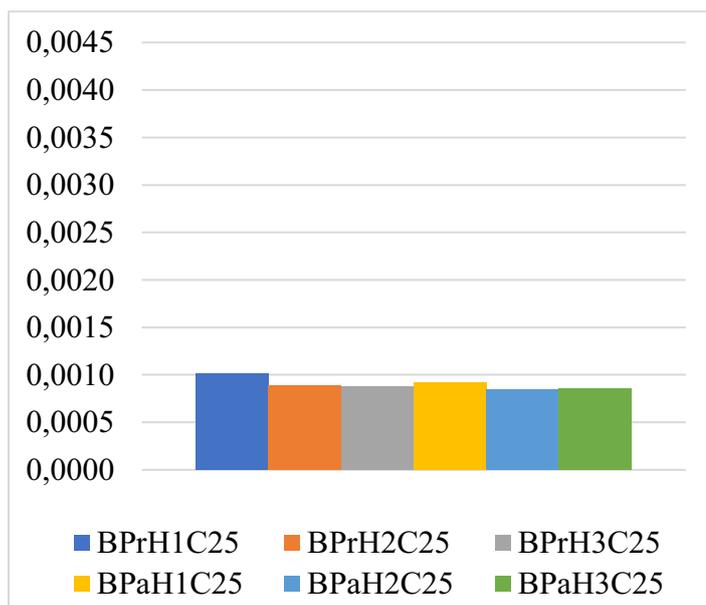
Blocos	Deslocamento no Pilar	Blocos	Deslocamento no Pilar	Blocos	Deslocamento no Pilar	Blocos	Deslocamento no Pilar
BPrH1C25	0,00101940	BPRH1SC25	0,05687400	BPaH1C25	0,00091727	BPaH1SC25	0,05657600
BPrH1C35	0,00098775	BPrH1SC35	0,05680100	BPaH1C35	0,00089825	BPaH1SC35	0,05649700
BPrH1C45	0,00096655	BPrH1SC45	0,05675300	BPaH1C45	0,00088556	BPaH1SC45	0,05648300
BPrH2C25	0,00088618	BPrH2SC25	0,05649800	BPaH2C25	0,00085063	BPaH2SC25	0,05642800
BPrH2C35	0,00086915	BPrH2SC35	0,05647500	BPaH2C35	0,00083895	BPaH2SC35	0,05641500
BPrH2C45	0,00085811	BPrH2SC45	0,05646000	BPaH2C45	0,00083138	BPaH2SC45	0,05640700
BPrH3C25	0,00087891	BPrH3SC25	0,05429200	BPaH3C25	0,00085298	BPaH3SC25	0,05425800
BPrH3C35	0,00086276	BPrH3SC35	0,05427000	BPaH3C35	0,00084077	BPaH3SC35	0,05423200
BPrH3C45	0,00085231	BPrH3SC45	0,05425600	BPaH3C45	0,00083288	BPaH3SC45	0,05422300

Fonte: Autor (2022)

### 5.4.1 Influência do $f_{ck}$

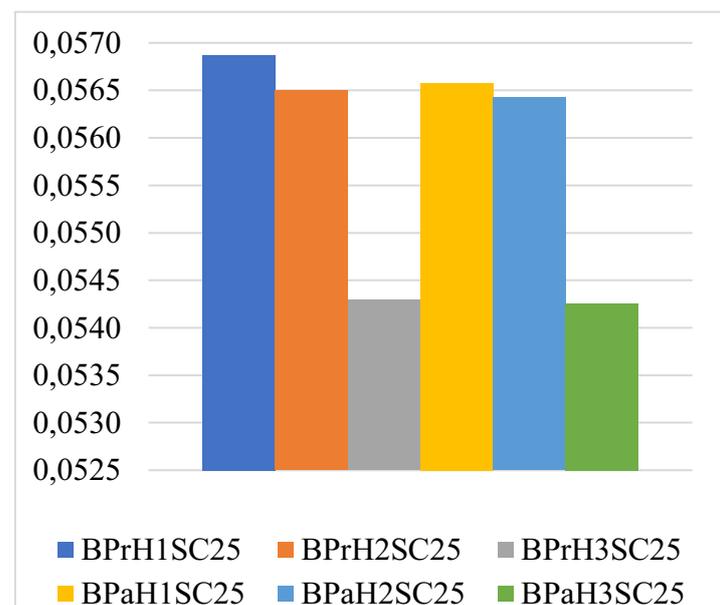
As Figuras 71 a 76 apresentam a variação dos valores de deslocamentos do pilar, considerando a influência da alteração do  $f_{ck}$ .

Figura 71 – Deslocamento no pilar – Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa (m)



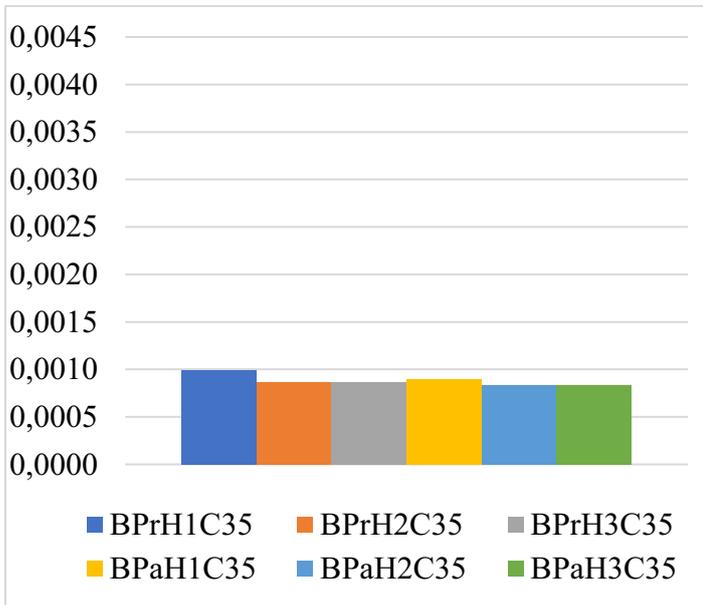
Fonte: Autor (2022)

Figura 72 – Deslocamento no pilar – Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa e presença do solo (m)



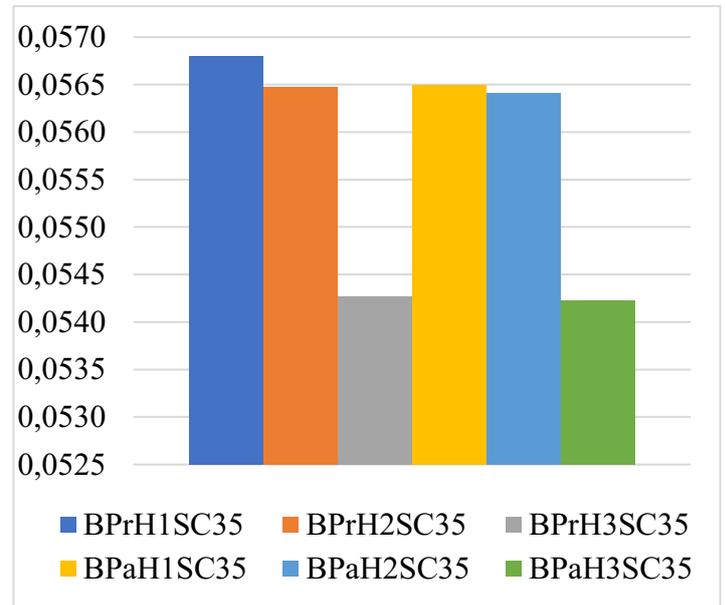
Fonte: Autor (2022)

Figura 73 – Deslocamento no pilar –  
Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa (m)



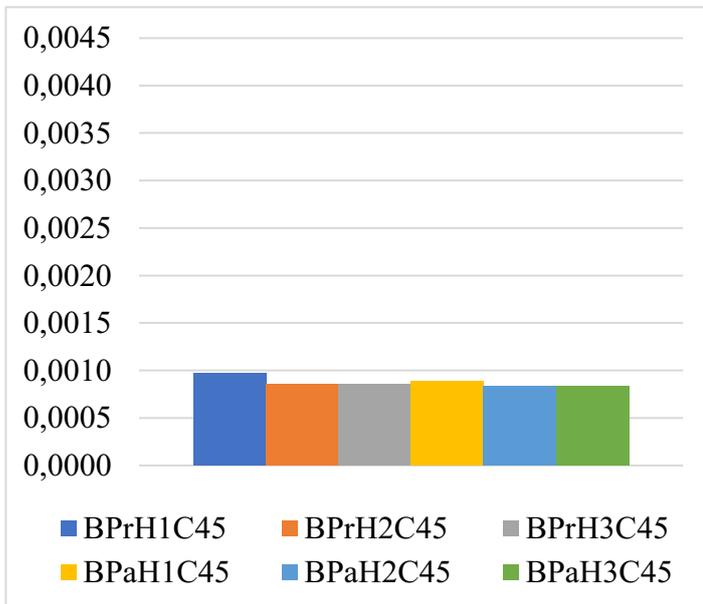
Fonte: Autor (2022)

Figura 74 - Deslocamento no pilar - Blocos  
com  $f_{ck}$  de 35 MPa e presença do solo (m)



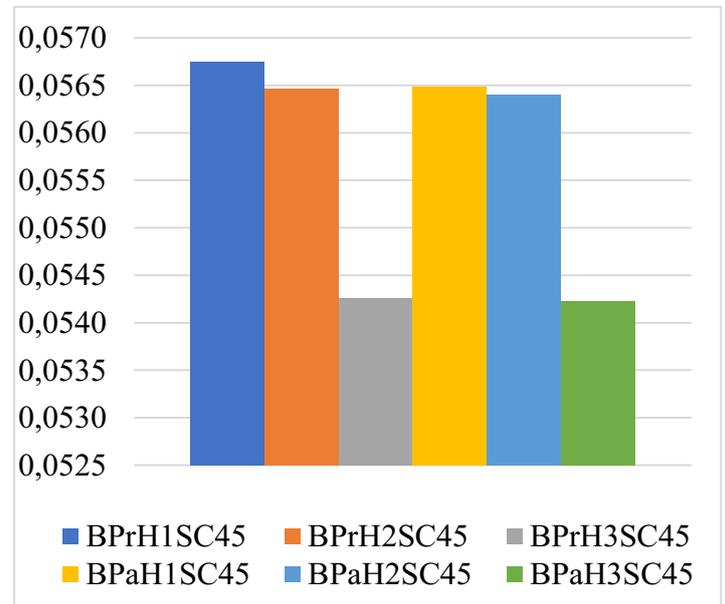
Fonte: Autor (2022)

Figura 75 – Deslocamento no pilar –  
Blocos com  $f_{ck}$  de 45 MPa (m)



Fonte: Autor (2022)

Figura 76 – Deslocamento no pilar –  
Blocos com  $f_{ck}$  de 45 MPa e presença do  
solo (m)



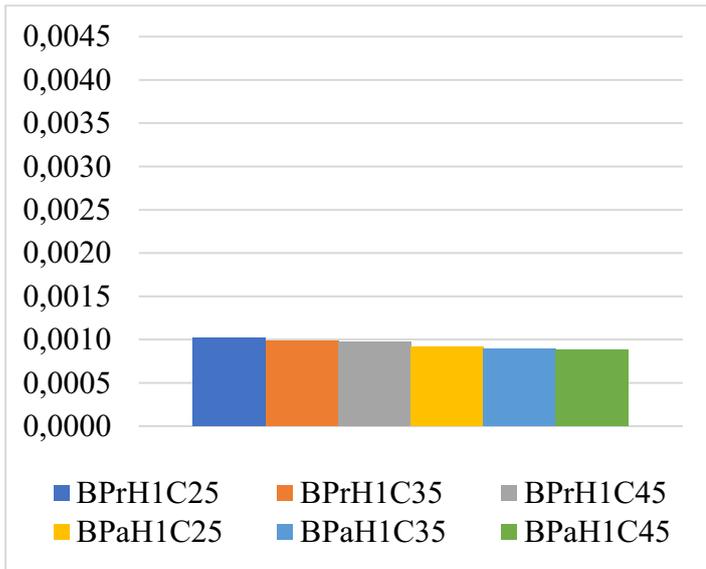
Fonte: Autor (2022)

Como podemos analisar nas figuras, não houve uma grande variação ao se alterar o  $f_{ck}$ , tanto nos modelos sem presença do solo, quanto nos modelos com o solo. Portanto, a variação do  $f_{ck}$  não influencia muito nos valores de deslocamento do pilar.

5.4.2 *Influência da altura*

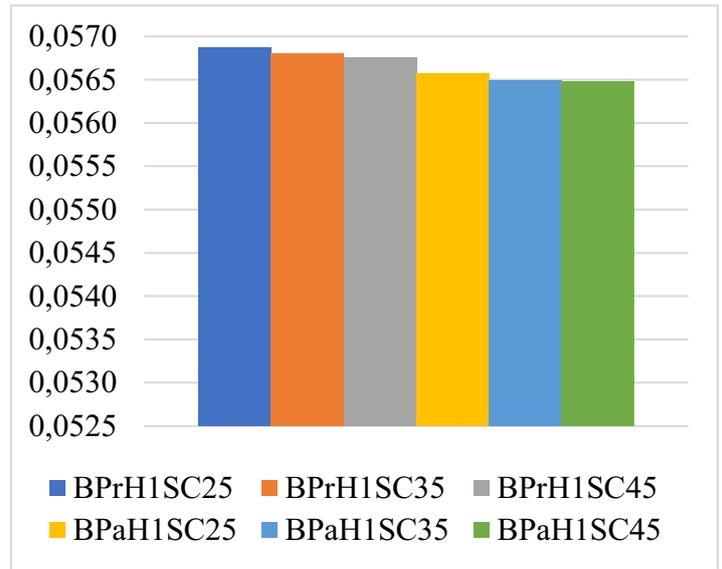
As Figuras 77 a 82 representa a influência do parâmetro altura no deslocamento dos pilares.

Figura 77 – Deslocamento no pilar – Blocos com altura de 54 cm (m)



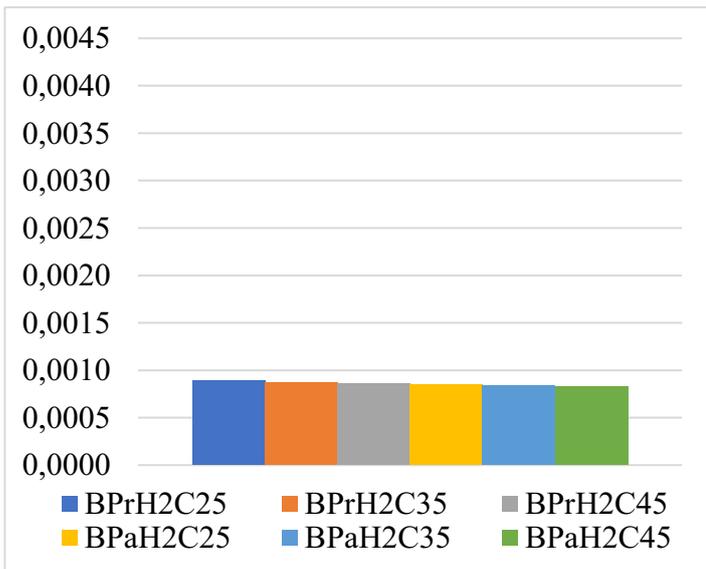
Fonte: Autor (2022)

Figura 78 - Deslocamento no pilar - Blocos com altura de 54 cm e presença do solo (m)



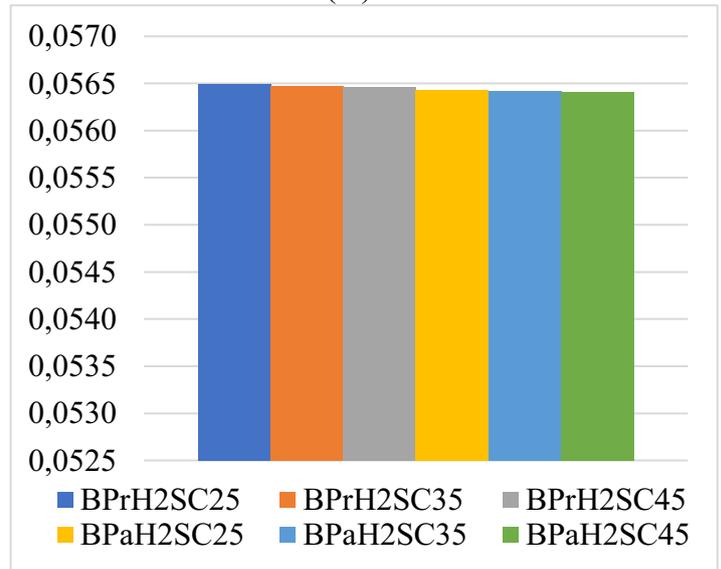
Fonte: Autor (2022)

Figura 79 – Deslocamento no pilar – Blocos com altura de 110 cm (m)



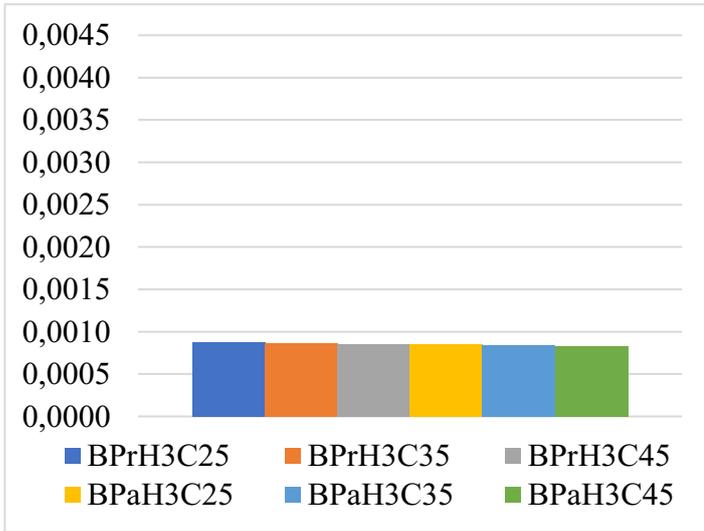
Fonte: Autor (2022)

Figura 80 - Deslocamento no pilar - Blocos com altura de 110 cm e presença do solo (m)



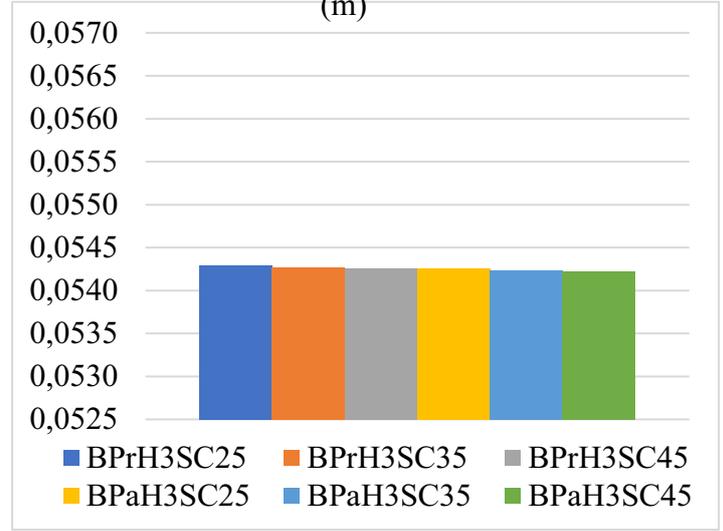
Fonte: Autor (2022)

Figura 81 – Deslocamento no pilar – Blocos com altura de 165 cm (m)



Fonte: Autor (2022)

Figura 82 - Deslocamento no pilar - Blocos com altura de 165 cm e presença do solo (m)



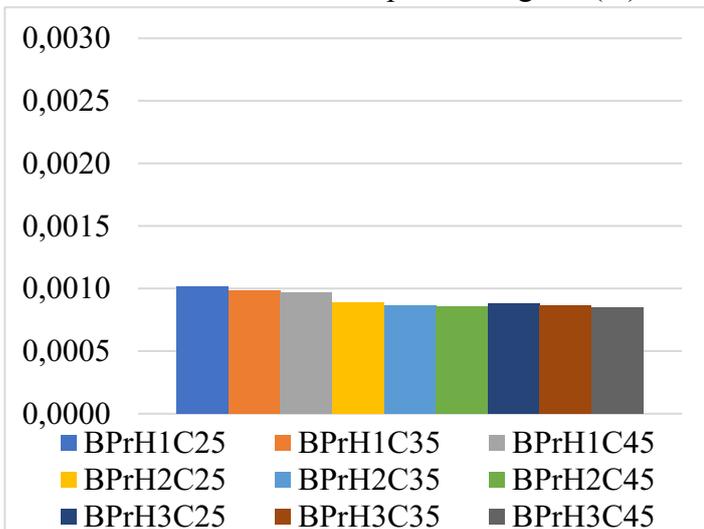
Fonte: Autor (2022)

Como pode-se perceber, ao se alterar as alturas, não houve uma grande influência nos valores do deslocamento do pilar nos modelos sem presença de solo. Nos modelos com a presença do solo, verificou-se que ao aumentar a altura, o deslocamento do pilar diminuiu.

### 5.4.3 Influência da geometria do pilar

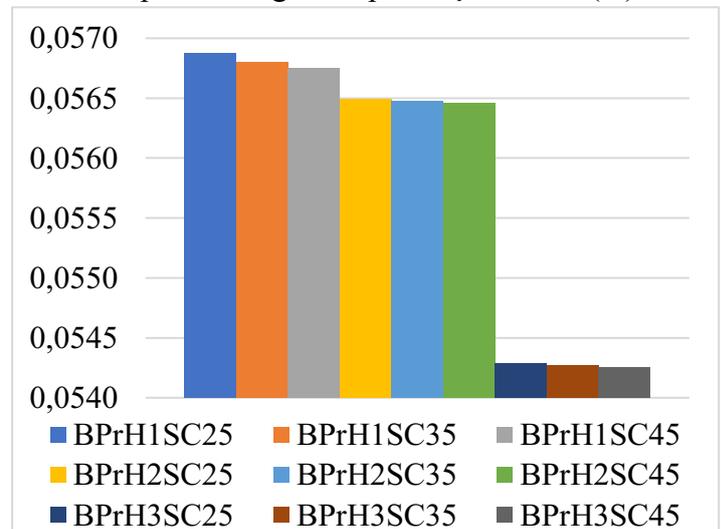
As Figuras 83 a 86 representam os valores de deslocamento da face do pilar.

Figura 83 – Deslocamento no pilar – Blocos com pilar retangular (m)



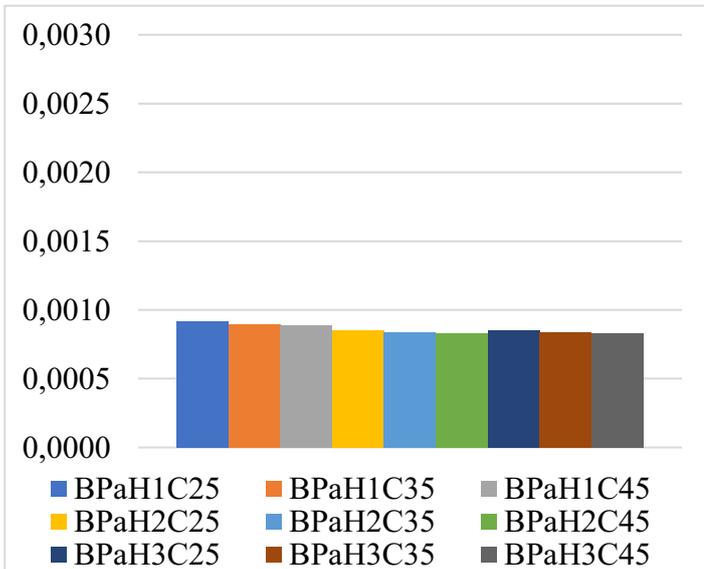
Fonte: Autor (2022)

Figura 84 - Deslocamento no pilar - Blocos com pilar retangular e presença de solo (m)



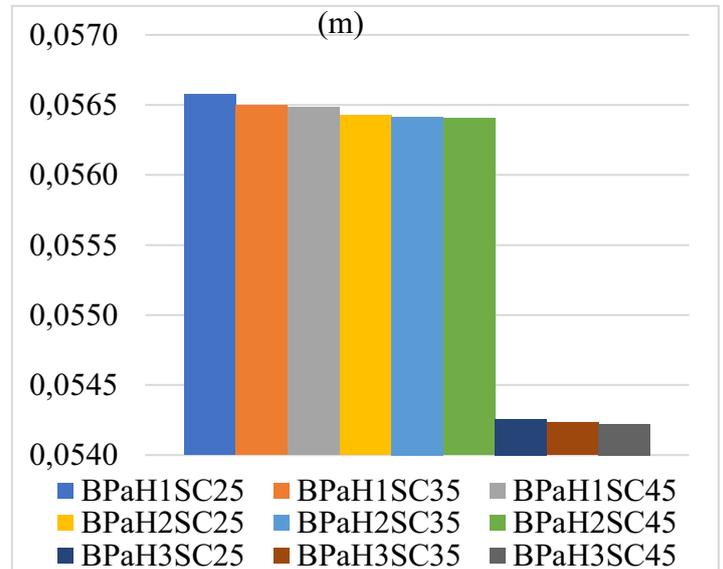
Fonte: Autor (2022)

Figura 85 – Deslocamento no pilar – Blocos com pilares associados (m)



Fonte: Autor (2022)

Figura 86 - Deslocamento no pilar - Blocos com pilares associados e presença do solo (m)



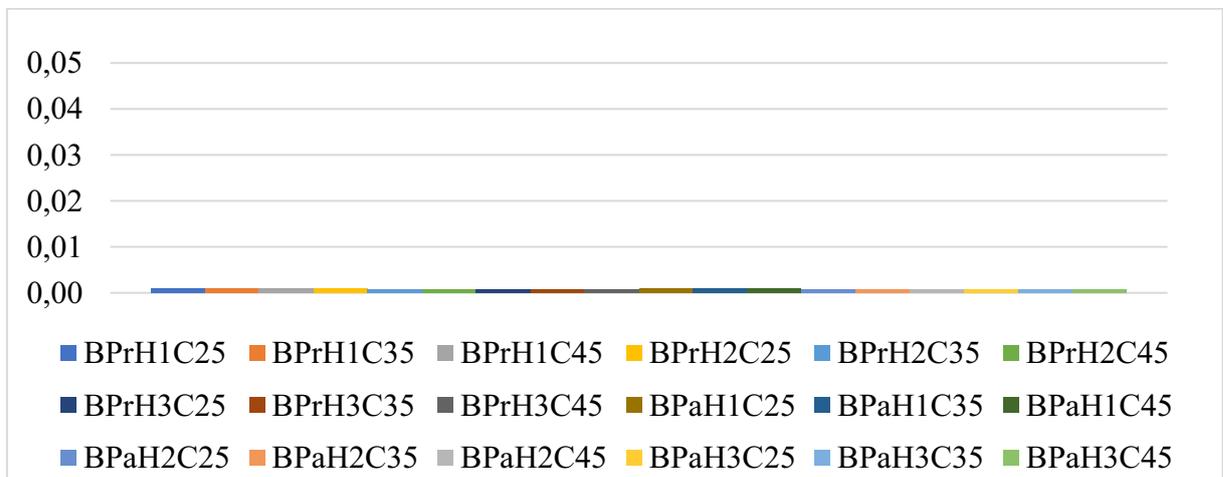
Fonte: Autor (2022)

Pode-se verificar nas Figuras 83 a 86 que não houve grandes variações ao se alterar a geometria do pilar. Os valores encontrados foram bem próximos, tanto nos modelos com presença do solo, quanto nos sem essa consideração.

#### 5.4.4 Influência da presença ou não do solo

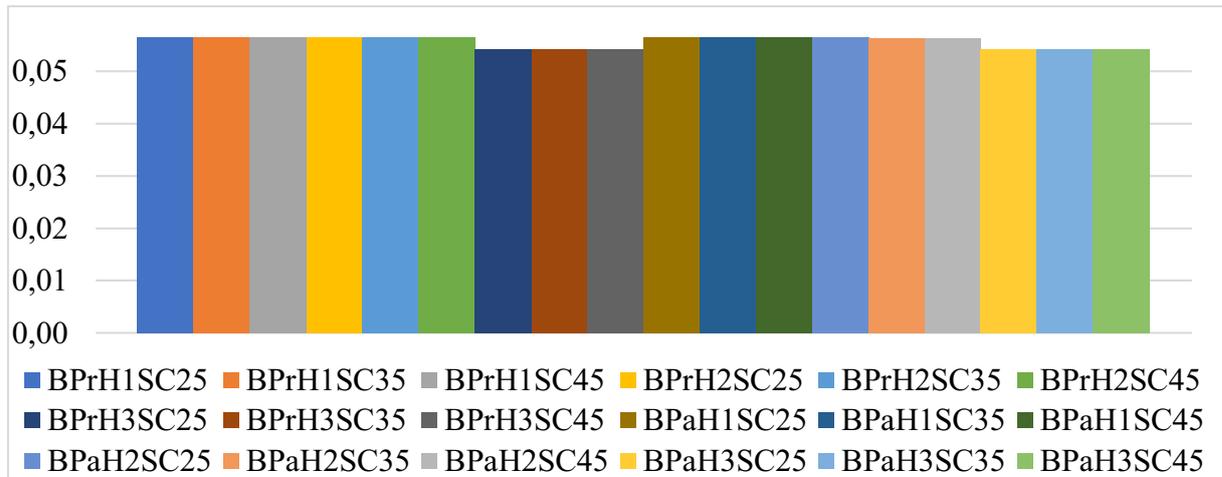
As Figuras 87 e 88 representam os resultados do deslocamento do pilar ao se analisar os resultados conforme a consideração ou não do solo.

Figura 87 – Deslocamento no pilar – Blocos sem presença do solo (m)



Fonte: Autor (2022)

Figura 88 – Deslocamento no pilar – Blocos com presença do solo (m)



Fonte: Autor (2022)

Analisando as Figuras 79 e 80, pode-se verificar que os valores de deslocamento na face do pilar são bem maiores nos modelos com presença do solo do que nos modelos sem a presença do solo, sendo o solo um parâmetro bastante influente nesse resultado.

### 5.5 DESLOCAMENTO NA FACE INFERIOR DO BLOCO

A Tabela 15 apresenta os valores encontrados para o deslocamento na face inferior do bloco. Após isso, será analisada a influência dos parâmetros analisados.

Tabela 15 - Deslocamento na face inferior do bloco (m)

Blocos	Deslocamento na face inferior do bloco	Blocos	Deslocamento na face inferior do bloco	Blocos	Deslocamento na face inferior do bloco	Blocos	Deslocamento na face inferior do bloco
BPRH1C25	0,00067693	BPrH1SC25	0,05654600	BPaH1C25	0,00043990	BPaH1SC25	0,05618500
BPRH1C35	0,00064734	BPrH1SC35	0,05647100	BPaH1C35	0,00043870	BPaH1SC35	0,05616200
BPRH1C45	0,00062735	BPrH1SC45	0,05642300	BPaH1C45	0,00043802	BPaH1SC45	0,05614800
BPRH2C25	0,00049151	BPrH2SC25	0,05611000	BPaH2C25	0,00044674	BPaH2SC25	0,05605400
BPRH2C35	0,00048300	BPrH2SC35	0,05609400	BPaH2C35	0,00044509	BPaH2SC35	0,05604700
BPRH2C45	0,00047775	BPrH2SC45	0,05608400	BPaH2C45	0,00044403	BPaH2SC45	0,05604200
BPRH3C25	0,00046175	BPrH3SC25	0,05388400	BPaH3C25	0,00044857	BPaH3SC25	0,05386700
BPRH3C35	0,00045788	BPrH3SC35	0,05387300	BPaH3C35	0,00044665	BPaH3SC35	0,05385800
BPRH3C45	0,00045568	BPrH3SC45	0,05386600	BPaH3C45	0,00044570	BPaH3SC45	0,05385300

Fonte: Autor (2022)

### 5.5.1 Influência do $f_{ck}$

As Figuras 89 a 94 representam a influência do parâmetro  $f_{ck}$  no deslocamento da face inferior do bloco.

Figura 89 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa (m)

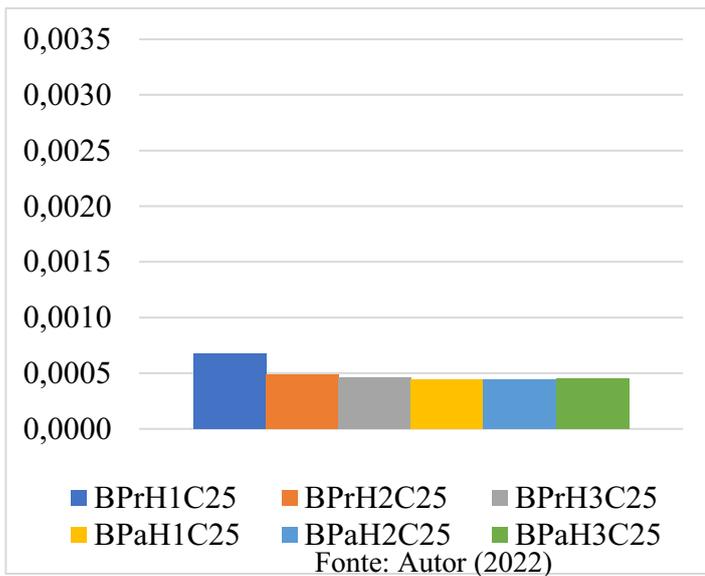


Figura 90 - Deslocamento na face inferior do bloco - Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa e presença de solo (m)

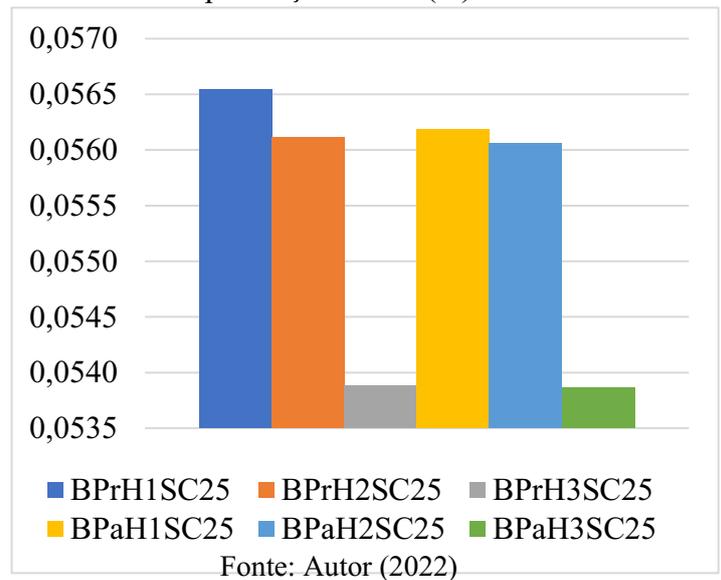


Figura 91 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa (m)

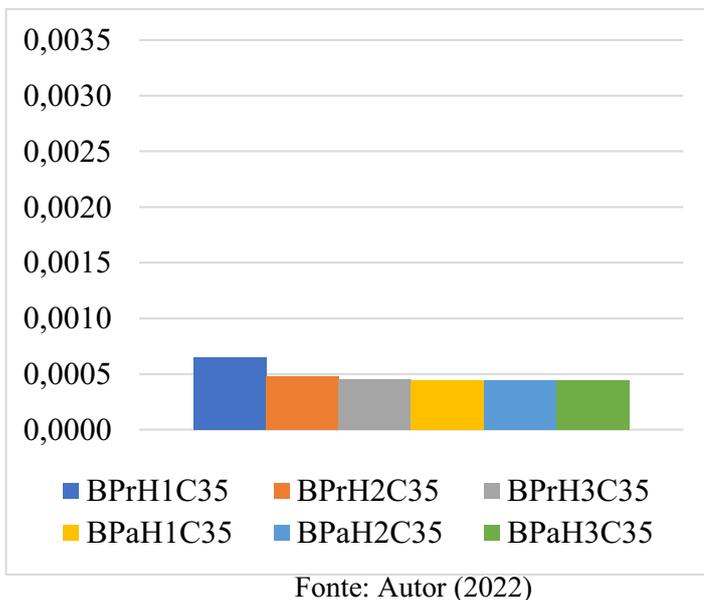


Figura 92 - Deslocamento na face inferior do bloco - Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa e presença de solo (m)

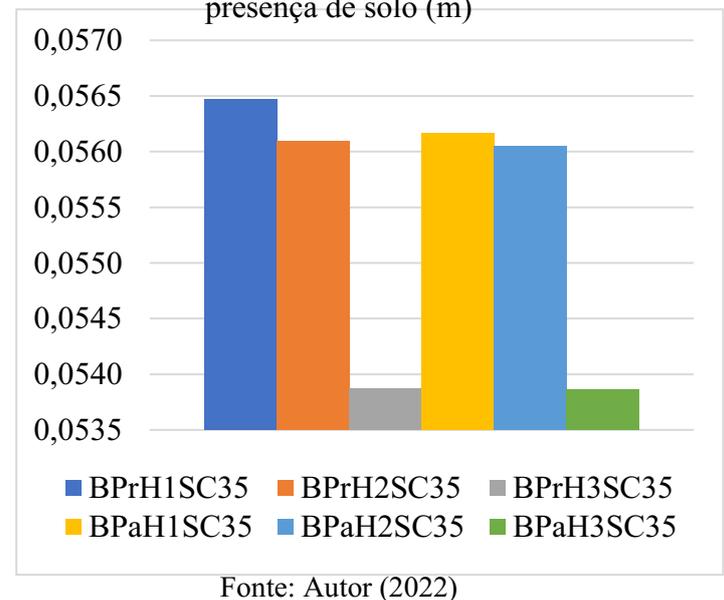
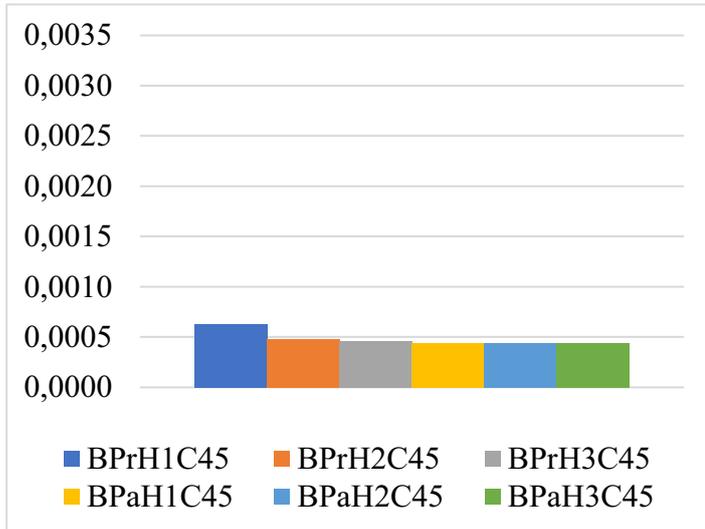
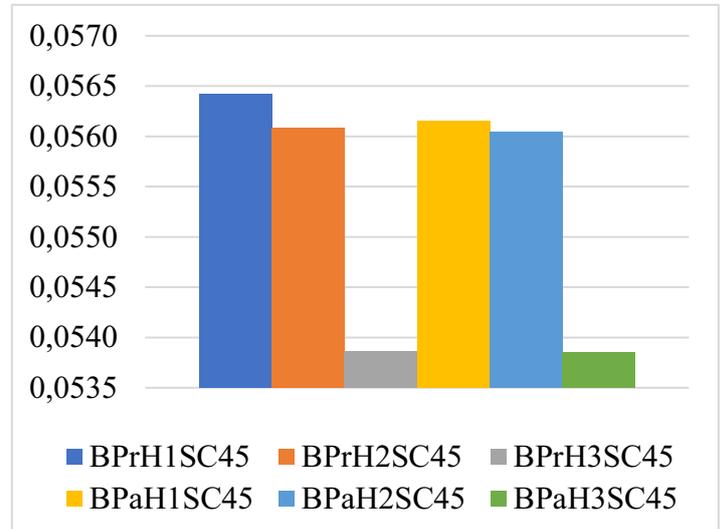


Figura 93 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa (m)



Fonte: Autor (2022)

Figura 94 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa e presença de solo (m)



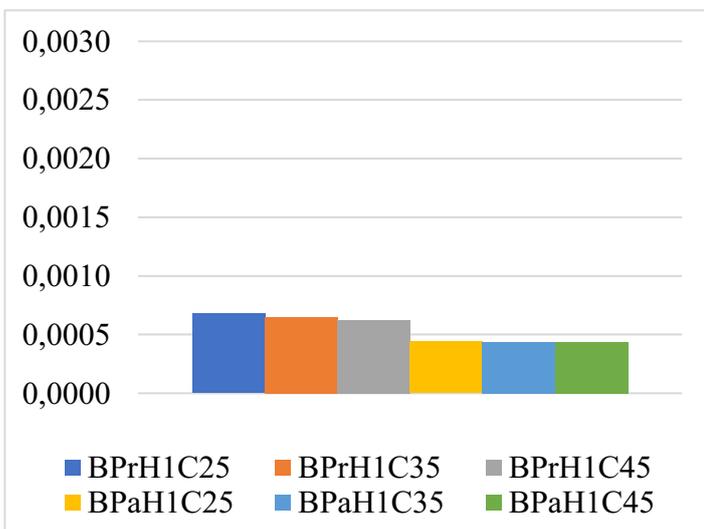
Fonte: Autor (2022)

Podemos verificar nas Figuras 89 a 94 que a variação do  $f_{ck}$  não interferiu significativamente nos valores de deslocamento da face inferior do bloco.

### 5.5.2 Influência da altura

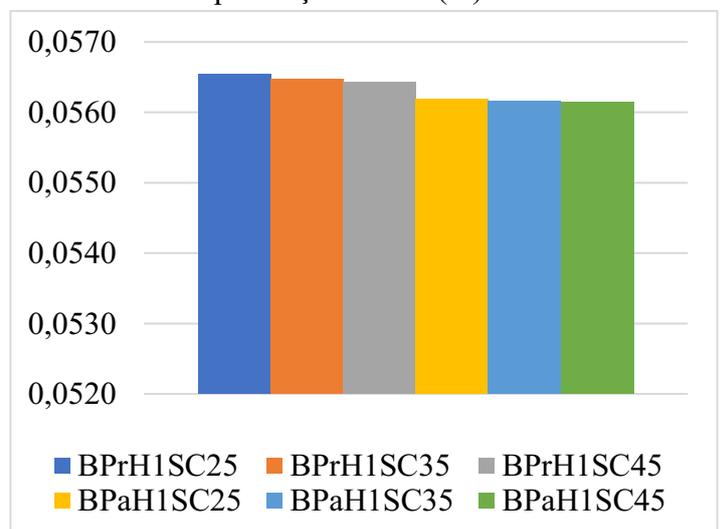
As Figuras 95 a 100 representam a influência da altura no deslocamento do bloco.

Figura 95 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com altura de 54 cm (m)



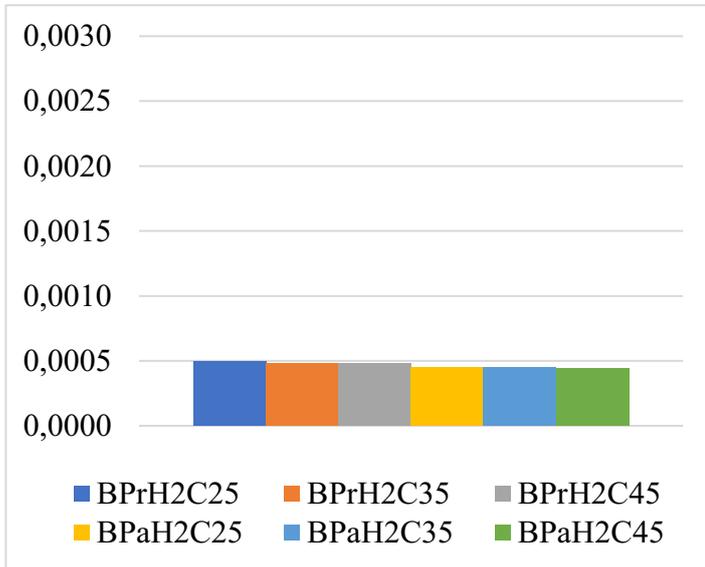
Fonte: Autor (2022)

Figura 96 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com altura de 54 cm e presença do solo (m)



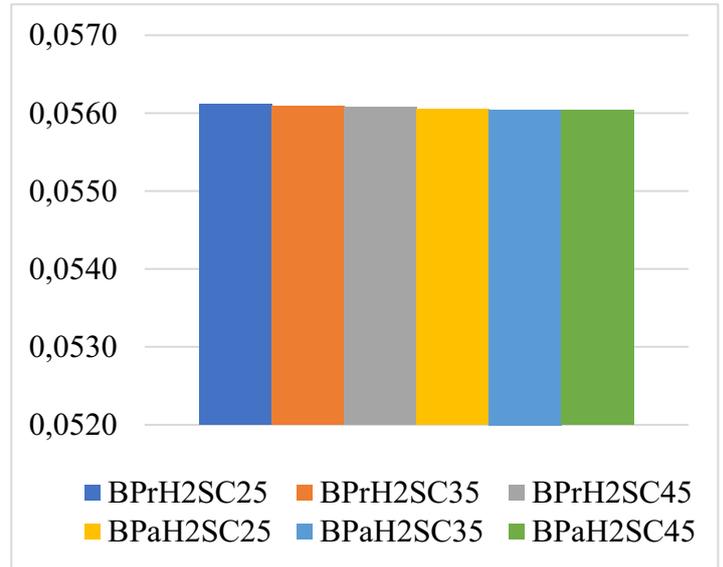
Fonte: Autor (2022)

Figura 97 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com altura de 110 cm (m)



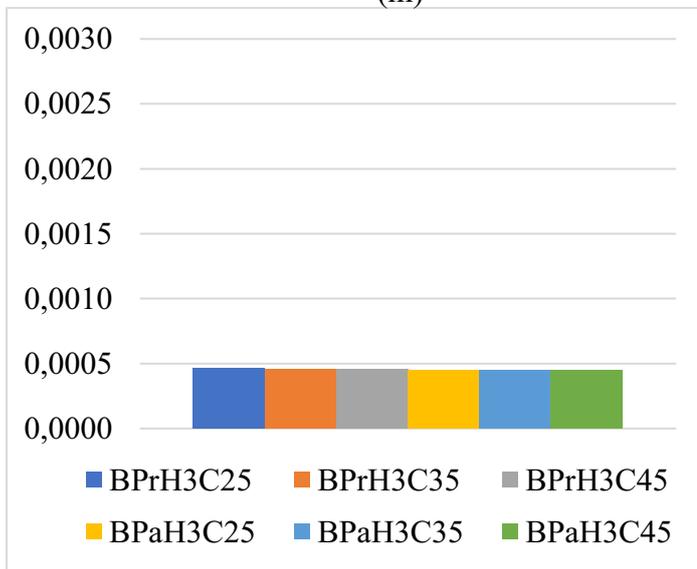
Fonte: Autor (2022)

Figura 98 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com altura de 110 cm e presença de solo (m)



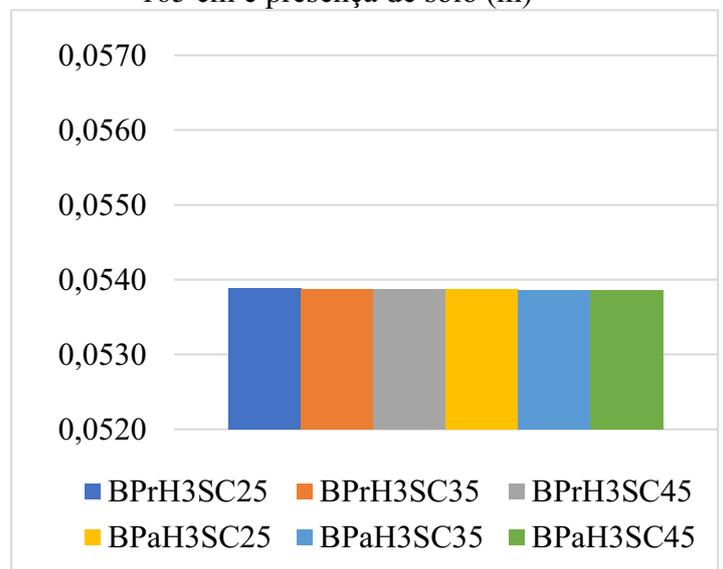
Fonte: Autor (2022)

Figura 99 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com altura de 165 cm (m)



Fonte: Autor (2022)

Figura 100 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com altura de 165 cm e presença de solo (m)



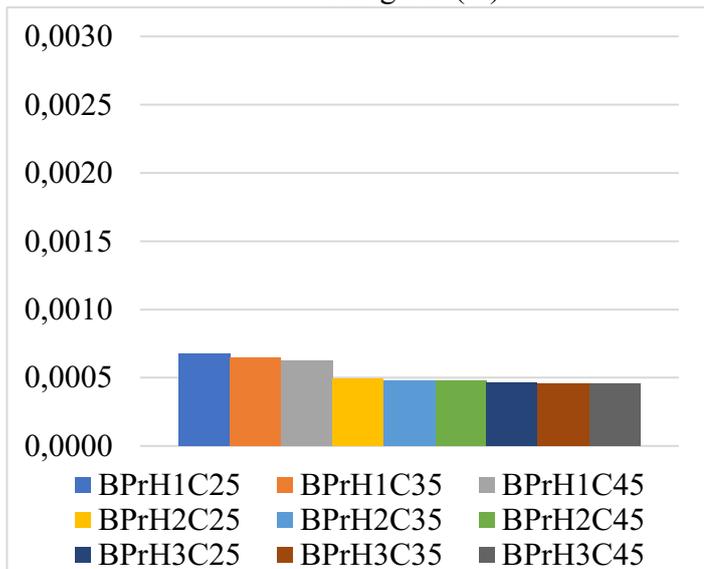
Fonte: Autor (2022)

As Figuras 95 a 100 ilustram que 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.

5.5.3 *Influência da geometria do pilar*

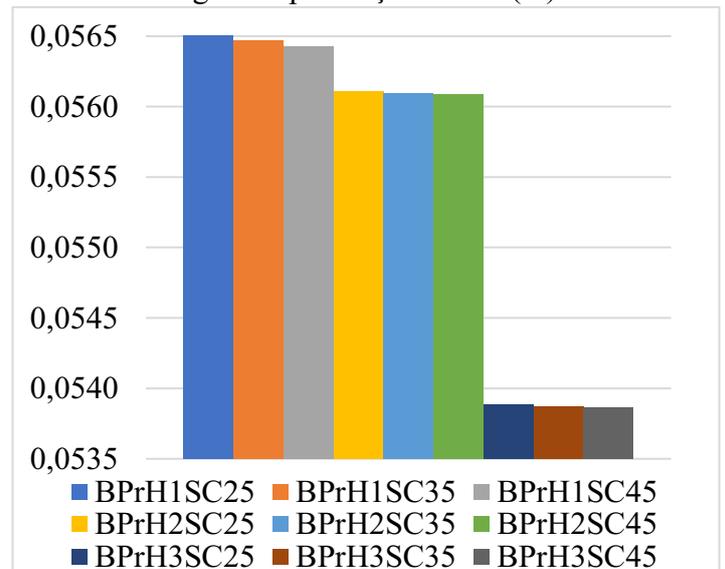
As Figuras 101 a 104 mostram a influência da geometria do pilar no deslocamento na face inferior do bloco.

Figura 101 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com pilar retangular (m)



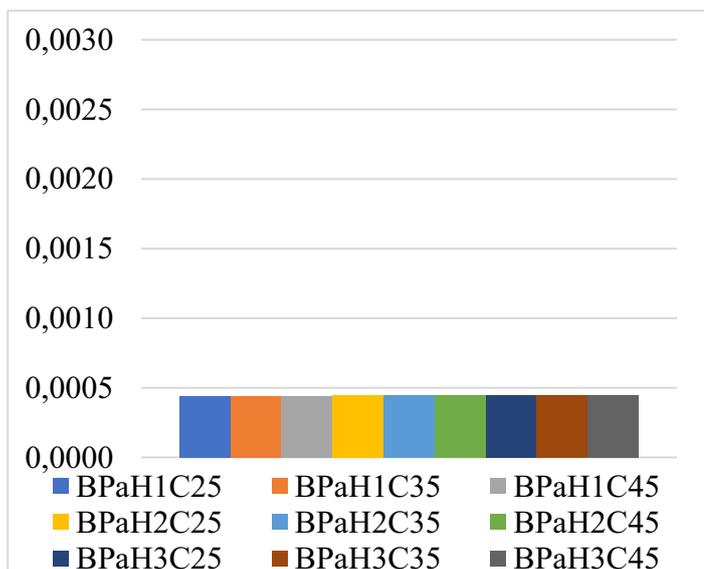
Fonte: Autor (2022)

Figura 102 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com pilar retangular e presença de solo (m)



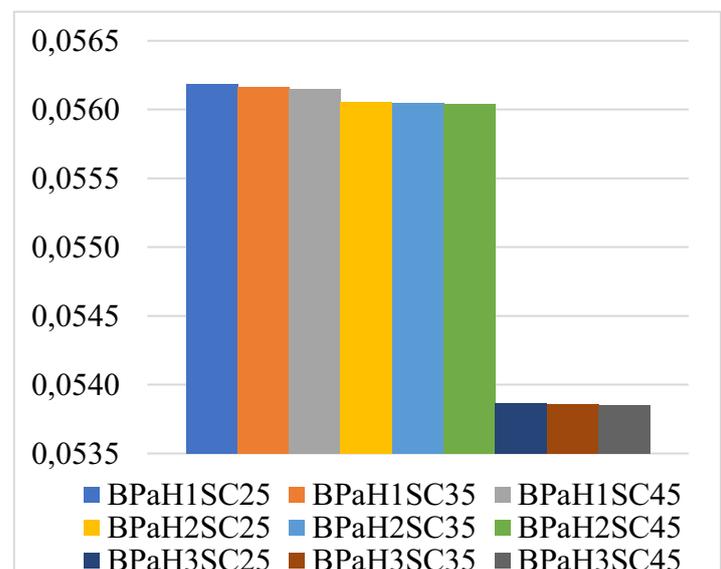
Fonte: Autor (2022)

Figura 103 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com pilares associados (m)



Fonte: Autor (2022)

Figura 104 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com pilares associados e presença de solo (m)



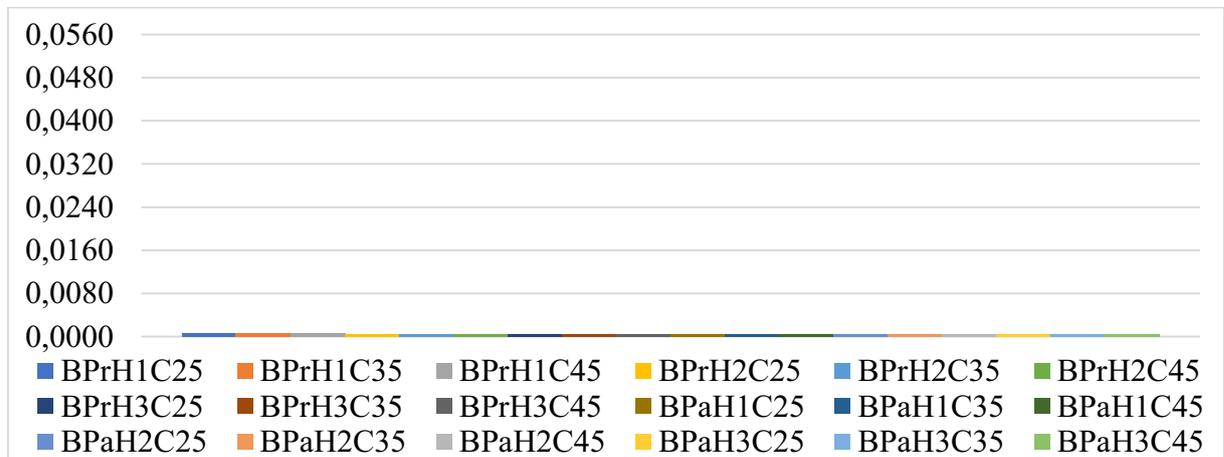
Fonte: Autor (2022)

As Figuras 101 a 104 demonstram que 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 é maior que nos modelos com pilares associados.

#### 5.5.4 Influência da presença ou não do solo

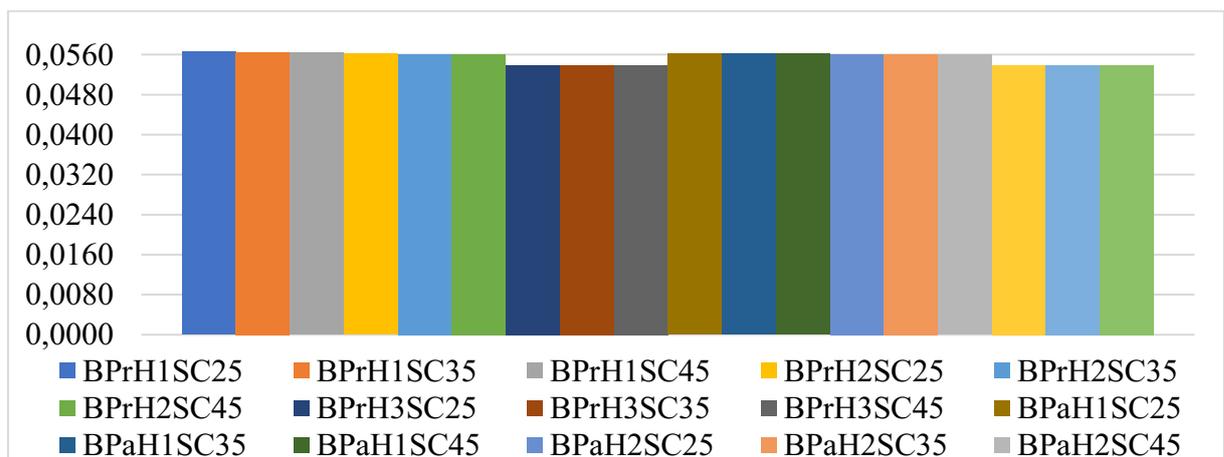
As Figuras 105 e 106 mostra a comparação dos valores de deslocamento na face inferior do bloco nos modelos sem a presença do solo e com a presença do solo.

Figura 105 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos sem presença do solo (m)



Fonte: Autor (2022)

Figura 106 – Deslocamento na face inferior do bloco – Blocos com presença do solo (m)



Fonte: Autor (2022)

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.

## 5.6 TENSÕES DE COMPRESSÃO

Os blocos foram modelados e as tensões de compressão calculadas. Na Tabela 16, estão os valores máximos de compressão encontrados em cada modelo. Posteriormente, foram analisados os parâmetros e sua influência.

Tabela 16 – Tensões de Compressão (MPa)

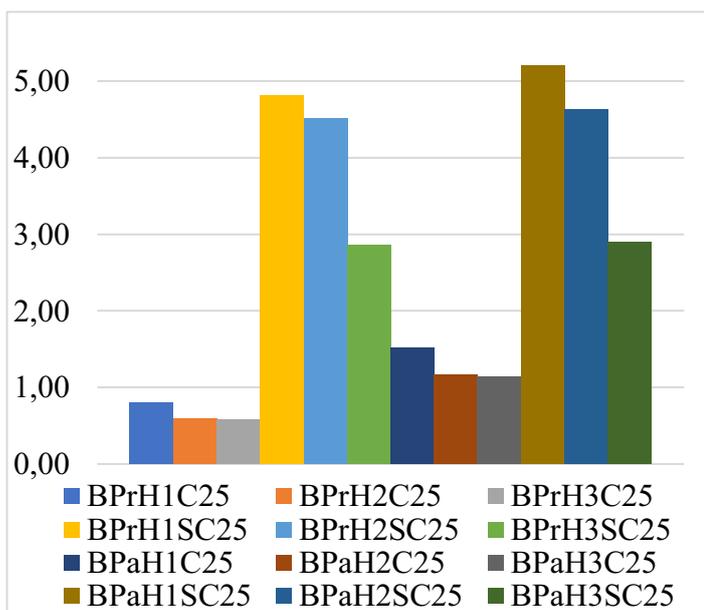
Blocos	Compressão	Blocos	Compressão	Blocos	Compressão	Blocos	Compressão
BPrH1C25	0,80510	BPrH1SC25	4,8157	BPaH1C25	1,5193	BPaH1SC25	5,1982
BPrH1C35	0,76389	BPrH1SC35	4,4208	BPaH1C35	1,4807	BPaH1SC35	4,7651
BPrH1C45	0,76389	BPrH1SC45	4,2409	BPaH1C45	1,451	BPaH1SC45	4,4399
BPrH2C25	0,59786	BPrH2SC25	4,5154	BPaH2C25	1,1631	BPaH2SC25	4,6322
BPrH2C35	0,58476	BPrH2SC35	4,1123	BPaH2C35	1,1422	BPaH2SC35	4,2192
BPrH2C45	0,57596	BPrH2SC45	3,8172	BPaH2C45	1,1273	BPaH2SC45	3,9168
BPrH3C25	0,57911	BPrH3SC25	2,8556	BPaH3C25	1,1334	BPaH3SC25	2,9004
BPrH3C35	0,57114	BPrH3SC35	2,6001	BPaH3C35	1,1152	BPaH3SC35	2,6407
BPrH3C45	0,56561	BPrH3SC45	2,4116	BPaH3C45	1,1023	BPaH3SC45	2,4492

Fonte: Autor (2022)

### 5.6.1 Influência do $f_{ck}$

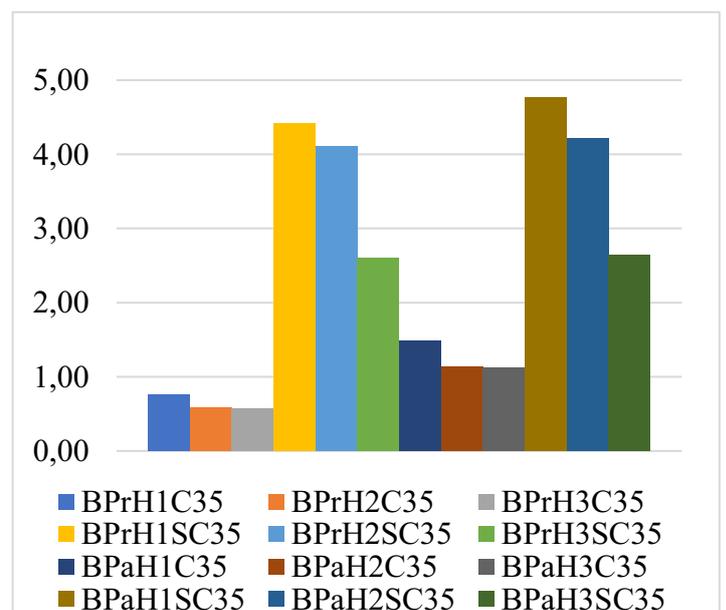
As Figuras 107 a 109 mostram a influência da alteração do  $f_{ck}$  nas tensões de compressão.

Figura 107 – Tensões de Compressão – Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa (MPa)



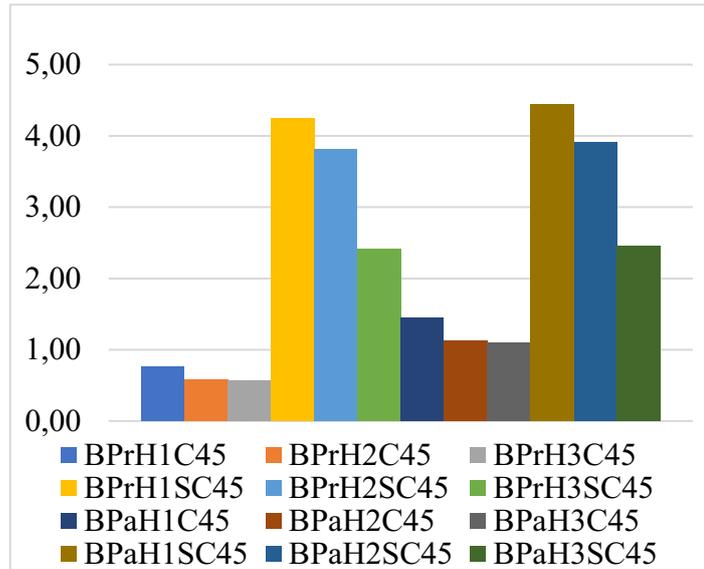
Fonte: Autor (2022)

Figura 108 – Tensões de Compressão – Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 109 – Tensões de Compressão – Blocos com  $f_{ck}$  de 45 MPa (MPa)



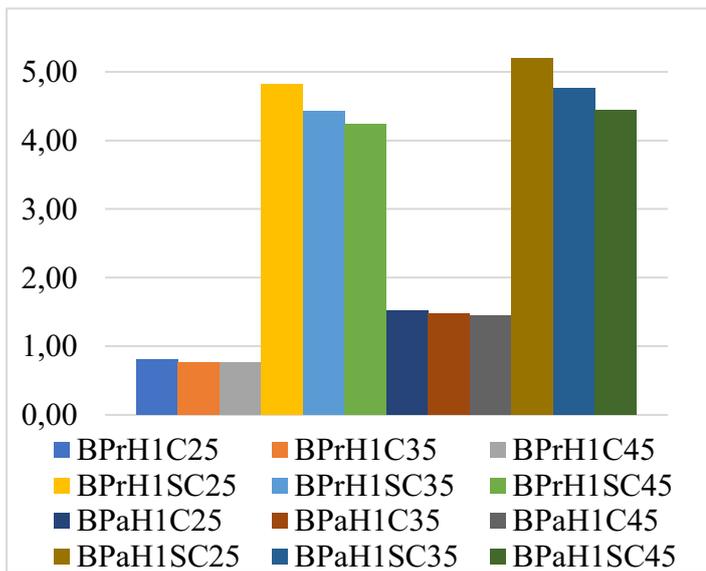
Fonte: Autor (2022)

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

5.6.2 *Influência da altura*

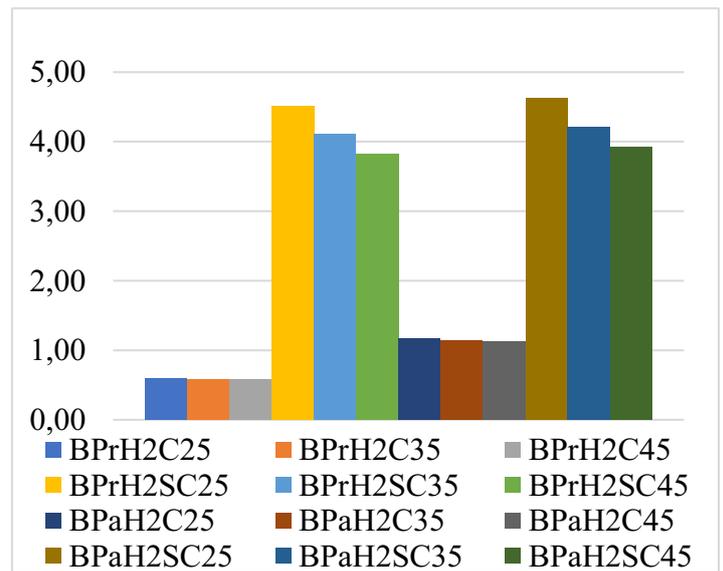
As Figuras 110 a 112 representam a influência da altura nos valores de compressão.

Figura 110 – Tensões de Compressão – Blocos com altura de 54 cm (MPa)



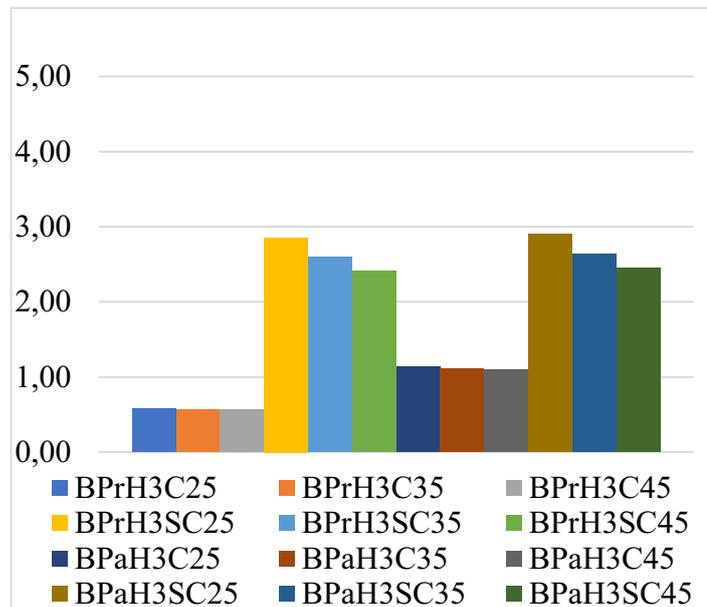
Fonte: Autor (2022)

Figura 111 – Tensões de Compressão – Blocos com altura de 110 cm (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 112 – Tensões de Compressão – Blocos com altura de 165 cm (MPa)



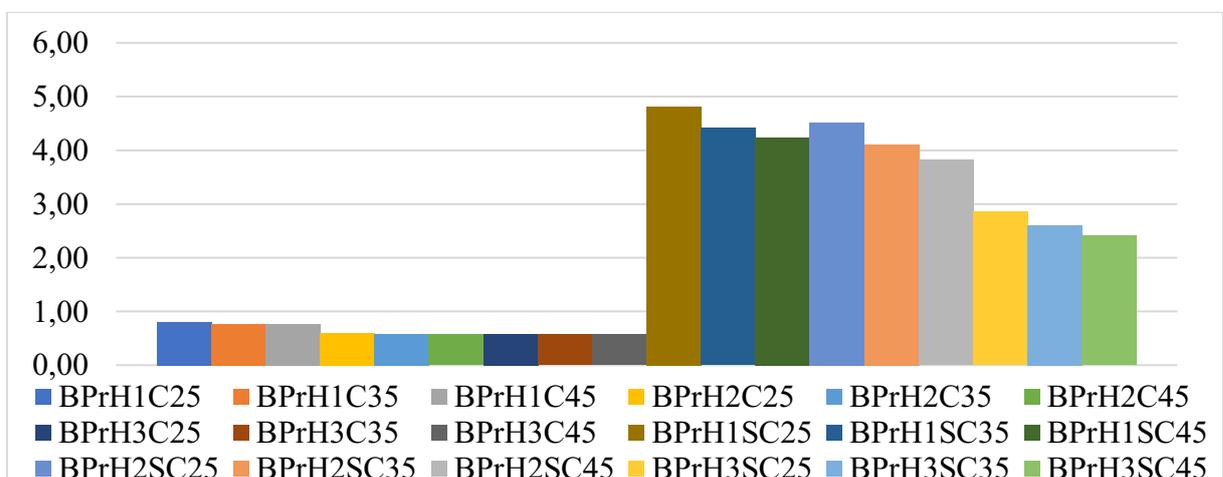
Fonte: Autor (2022)

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

### 5.6.3 Influência da geometria do pilar

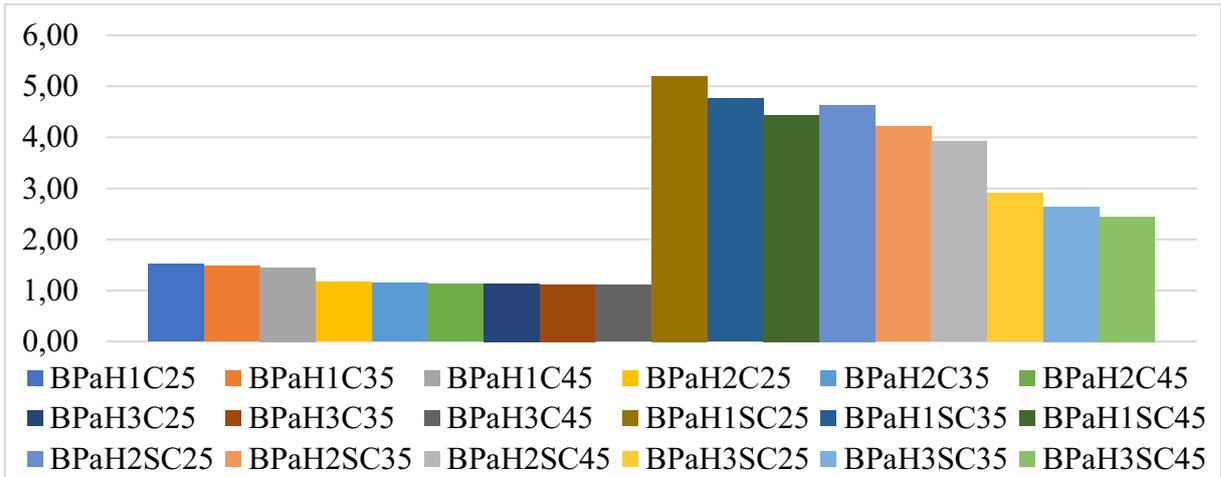
As Figuras 113 e 114 mostram a influência da geometria do pilar nas tensões de compressão.

Figura 113 – Tensões de Compressão – Blocos com pilar retangular (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 114 – Tensões de Compressão – Blocos com pilares associados (MPa)



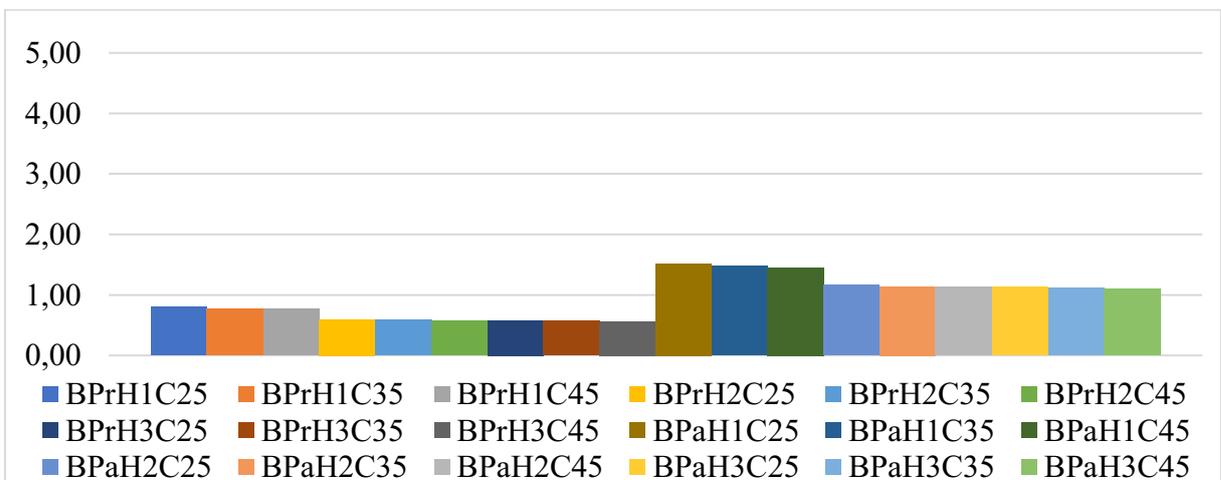
Fonte: Autor (2022)

As Figuras 113 e 114 mostram que tanto nos modelos sem presença do solo, quanto nos modelos com a presença do solo, as tensões de compressão são maiores ao se utilizar os pilares associados.

#### 5.6.4 Influência da presença ou não do solo

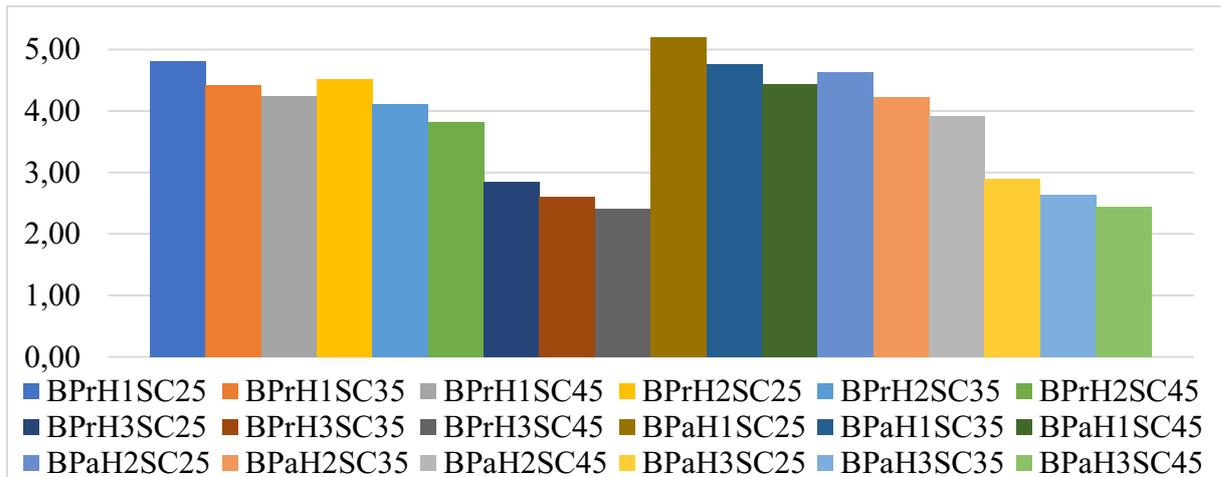
As Figuras 115 e 116 mostram as tensões de compressão em relação com a presença ou não do solo para poder analisar a influência desse parâmetro.

Figura 115 – Tensões de Compressão – Blocos sem presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 116 – Tensões de Compressão – Blocos com presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

As Figuras 115 e 116 ilustram a influência do solo nas tensões de compressão. Pode-se perceber que as tensões são bem maiores nos modelos com o solo, sendo que os valores diminuem conforme se aumenta o  $f_{ck}$  e se aumenta a altura.

## 5.7 TENSÕES DE COMPRESSÃO LONGITUDINAL

Para realizar essa análise, foi considerado um corte longitudinal no bloco. Ou seja, foi feito um corte paralelo à maior dimensão do bloco. E com isso, foi analisado o maior valor encontrado de compressão nessa região. A Tabela 17 representa os resultados de tensões de compressão longitudinal em todos os modelos.

Tabela 17 – Tensões de Compressão Longitudinal (MPa)

Blocos	Compressão	Blocos	Compressão	Blocos	Compressão	Blocos	Compressão
BPrH1C25	0,80510	BPrH1SC25	1,1963	BPaH1C25	0,62621	BPaH1SC25	0,47499
BPrH1C35	0,76389	BPrH1SC35	1,0553	BPaH1C35	0,6301	BPaH1SC35	0,41641
BPrH1C45	0,73587	BPrH1SC45	0,95783	BPaH1C45	0,63153	BPaH1SC45	0,37761
BPrH2C25	0,56691	BPrH2SC25	0,522	BPaH2C25	0,53357	BPaH2SC25	1,4291
BPrH2C35	0,55906	BPrH2SC35	0,53102	BPaH2C35	0,53546	BPaH2SC35	1,4395
BPrH2C45	0,55389	BPrH2SC45	0,53837	BPaH2C45	0,53643	BPaH2SC45	1,4471
BPrH3C25	0,52468	BPrH3SC25	1,049	BPaH3C25	0,52165	BPaH3SC25	1,0483
BPrH3C35	0,5236	BPrH3SC35	1,0467	BPaH3C35	0,52348	BPaH3SC35	1,0459
BPrH3C45	0,52295	BPrH3SC45	1,0443	BPaH3C45	0,52459	BPaH3SC45	1,0435

Fonte: Autor (2022)

5.7.1 Influência do  $f_{ck}$

As Figuras 117 a 119 representam a influência do parâmetro  $f_{ck}$  nos valores de tensões de compressão longitudinal.

Figura 117 - Tensões de Compressão Longitudinal - Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa (MPa)

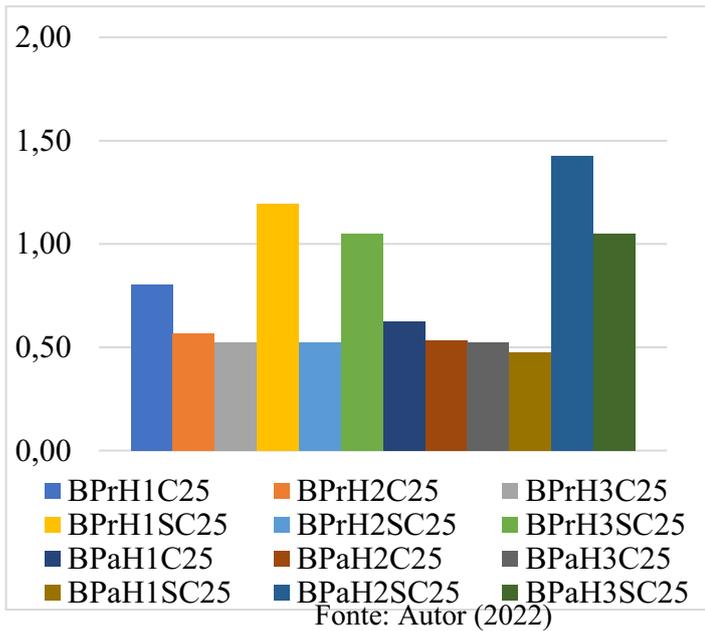


Figura 118 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa (MPa)

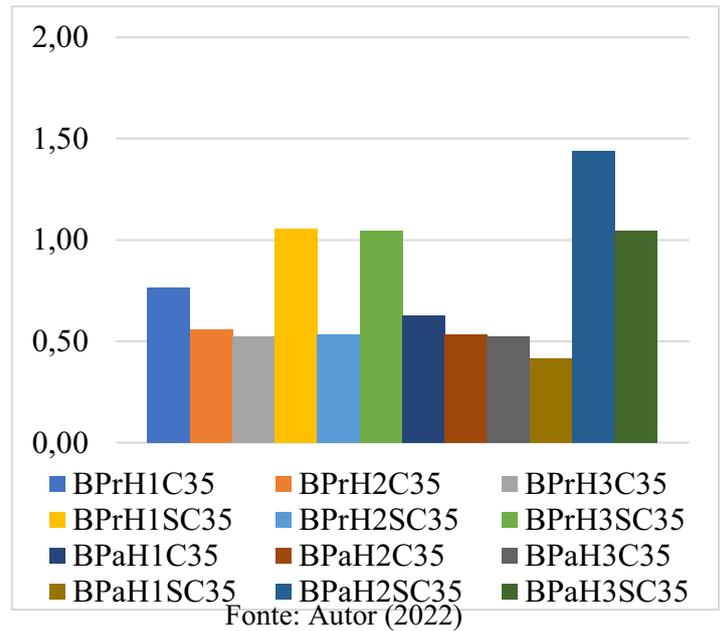
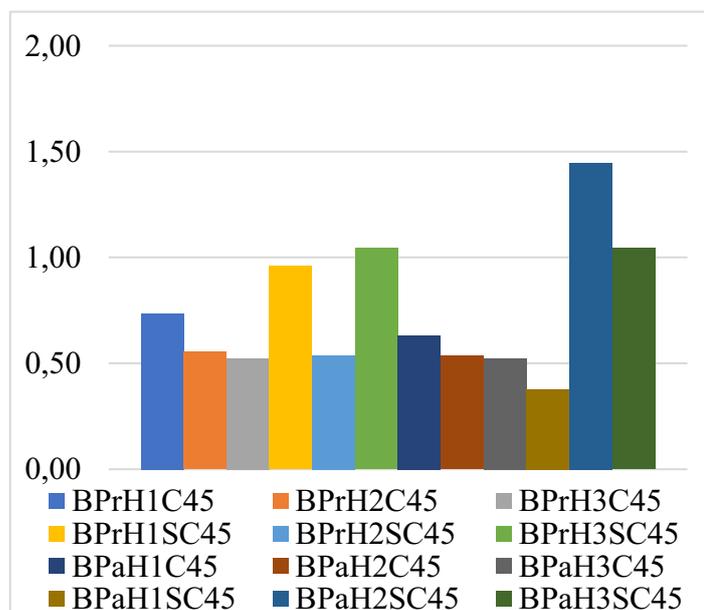


Figura 119 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos  $f_{ck}$  de MPa (MPa)

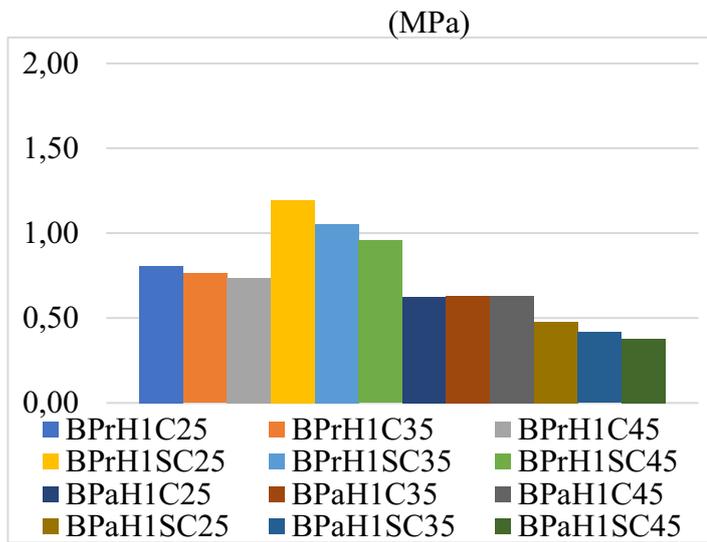


Pode-se perceber que os valores de compressão longitudinal são bem próximos ao se alterar o valor do  $f_{ck}$ . Nos modelos com a altura 1 e presença do solo, há uma redução maior nos valores de compressão ao se aumentar o  $f_{ck}$ , ou seja, nesses modelos a variação do  $f_{ck}$  influencia mais na compressão longitudinal.

5.7.2 *Influência da altura*

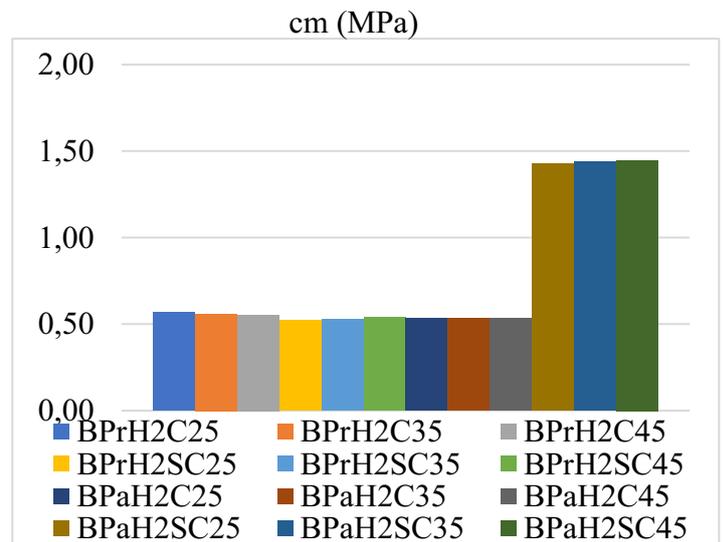
As Figuras 120 a 122 representam as tensões de compressão longitudinal levando em consideração a influência da variação da altura do bloco.

Figura 120 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos com altura de 54 cm



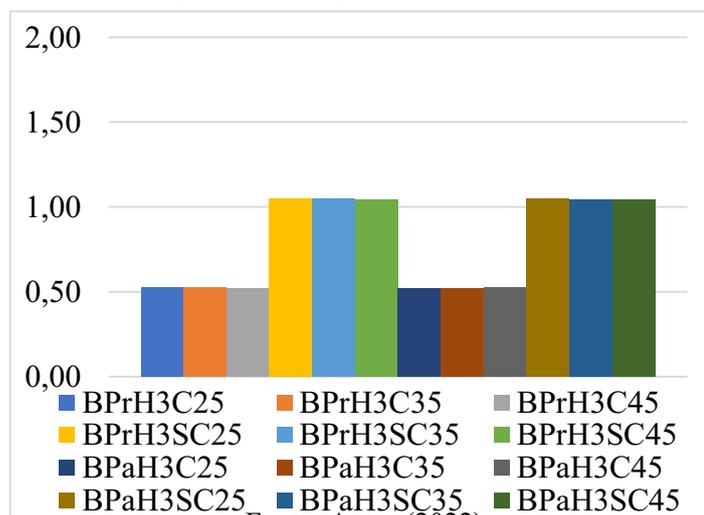
Fonte: Autor (2022)

Figura 121 - Tensões de Compressão Longitudinal - Blocos com altura de 110 cm



Fonte: Autor (2022)

Figura 122 - Tensões de Compressão Longitudinal - Blocos com altura de 165 cm (MPa)



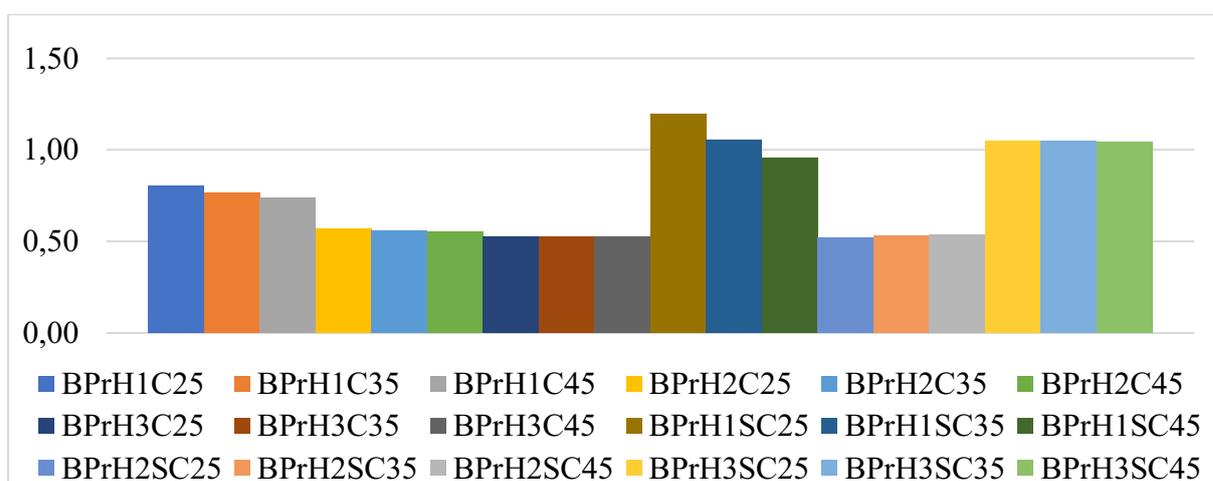
Fonte: Autor (2022)

Observando as figuras acima, pode-se perceber que nos modelos sem a presença do solo os valores de compressão longitudinal diminuem conforme se aumenta a altura. Já nos modelos com a presença do solo, e com pilar retangular, os menores valores de compressão se dão nos modelos de altura média, logo depois, vem os valores dos modelos com a altura máxima e os maiores valores de tensões são encontrados nos modelos com menor altura.

### 5.7.3 Influência da geometria do pilar

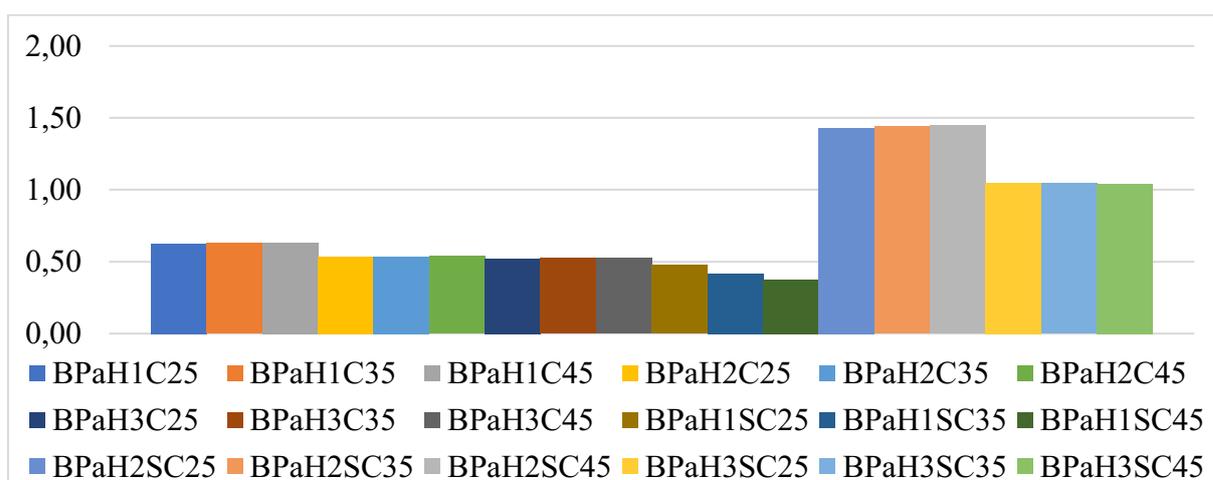
As Figuras 123 e 124 representam a influência do tipo de geometria do pilar.

Figura 123 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos com pilar retangular (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 124 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos com pilares associados (MPa)



Fonte: Autor (2022)

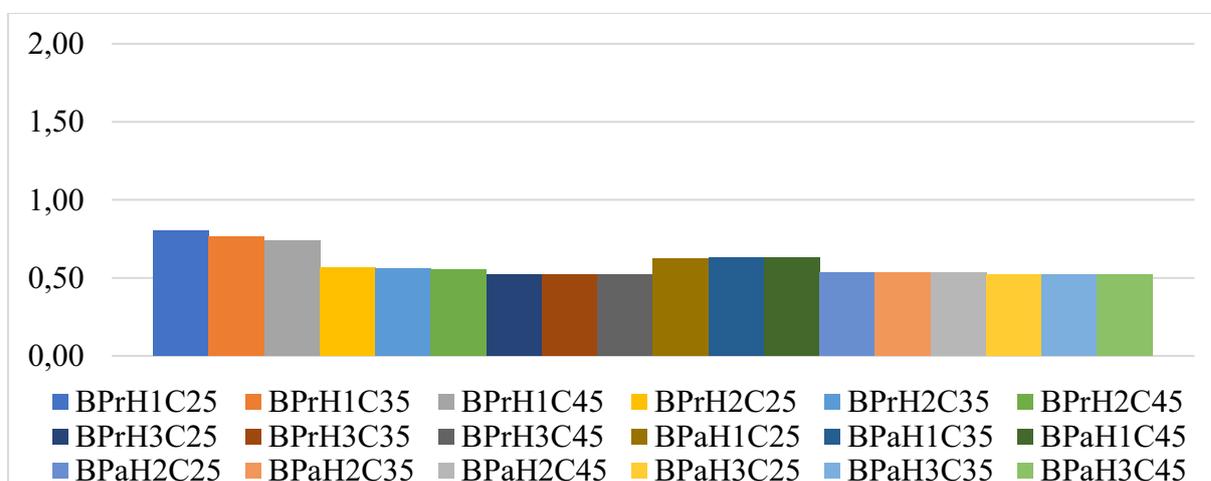
As Figuras 123 e 124 ilustram que nos blocos com pilares associados as tensões de compressão longitudinal são menores que nos blocos com pilar retangular. Exceto nos blocos

com altura média e presença do solo, que os valores de compressão são maiores que nos modelos com pilar retangular. Os modelos com altura mínima e presença do solo sofrem uma grande redução nos valores de compressão ao se alterar o tipo de geometria do pilar de retangular para associados.

#### 5.7.4 Influência da presença ou não do solo

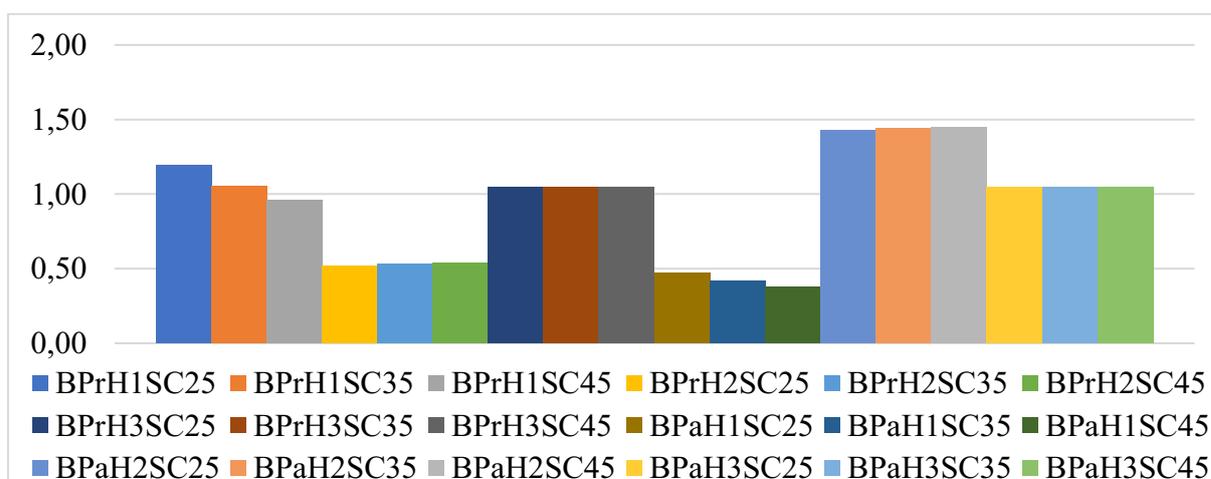
As Figuras 125 e 126 mostram a influência da presença ou não de solo na tensão de compressão longitudinal.

Figura 125 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos sem presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 126 – Tensões de Compressão Longitudinal – Blocos com presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Como pode-se observar, 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 são maiores quando há a presença do solo. Já nos outros modelos, os valores maiores de tensão se dão nos modelos sem a presença do solo.

## 5.8 TENSÕES DE COMPRESSÃO TRANSVERSAL

A Tabela 18 mostra os valores de tensões de compressão transversal. Para obter esses valores, foi considerado um corte na geometria do bloco perpendicular à sua maior dimensão.

Tabela 18 – Tensões de Compressão Transversal (MPa)

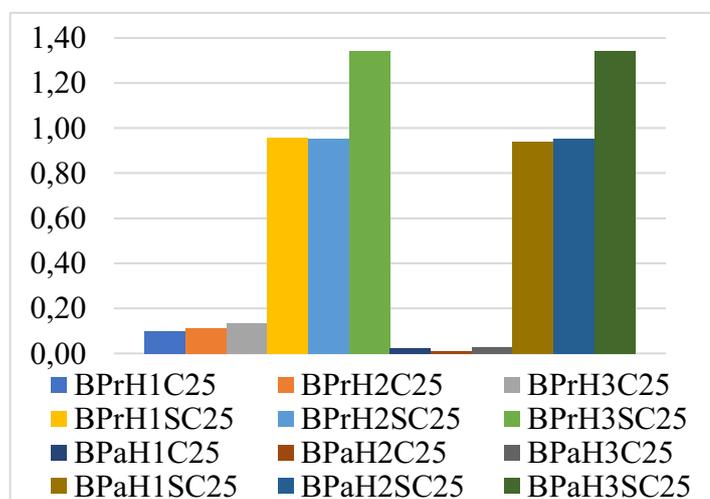
Blocos	Compressão	Blocos	Compressão	Blocos	Compressão	Blocos	Compressão
BPrH1C25	0,099953	BPrH1SC25	0,95777	BPaH1C25	0,024423	BPaH1SC25	0,94143
BPrH1C35	0,099373	BPrH1SC35	0,9588	BPaH1C35	0,024573	BPaH1SC35	0,94488
BPrH1C45	0,098891	BPrH1SC45	0,95954	BPaH1C45	0,024704	BPaH1SC45	0,94717
BPrH2C25	0,11297	BPrH2SC25	0,95448	BPaH2C25	0,011574	BPaH2SC25	0,95195
BPrH2C35	0,11417	BPrH2SC35	0,95673	BPaH2C35	0,012074	BPaH2SC35	0,95447
BPrH2C45	0,11504	BPrH2SC45	0,95825	BPaH2C45	0,012489	BPaH2SC45	0,95615
BPrH3C25	0,13614	BPrH3SC25	1,3422	BPaH3C25	0,029501	BPaH3SC25	1,3428
BPrH3C35	0,13535	BPrH3SC35	1,3451	BPaH3C35	0,029672	BPaH3SC35	1,3455
BPrH3C45	0,13672	BPrH3SC45	1,347	BPaH3C45	0,0298	BPaH3SC45	1,3473

Fonte: Autor (2022)

### 5.8.1 Influência do $f_{ck}$

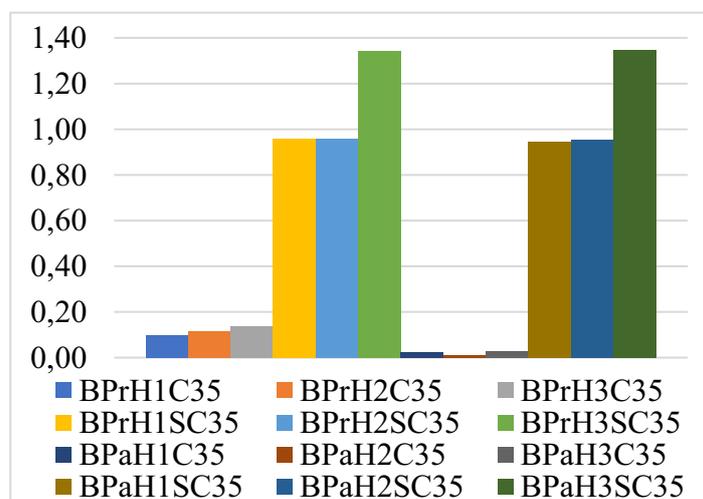
As Figuras 127 a 129 mostram a influência da variação do  $f_{ck}$ .

Figura 127 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa (MPa)



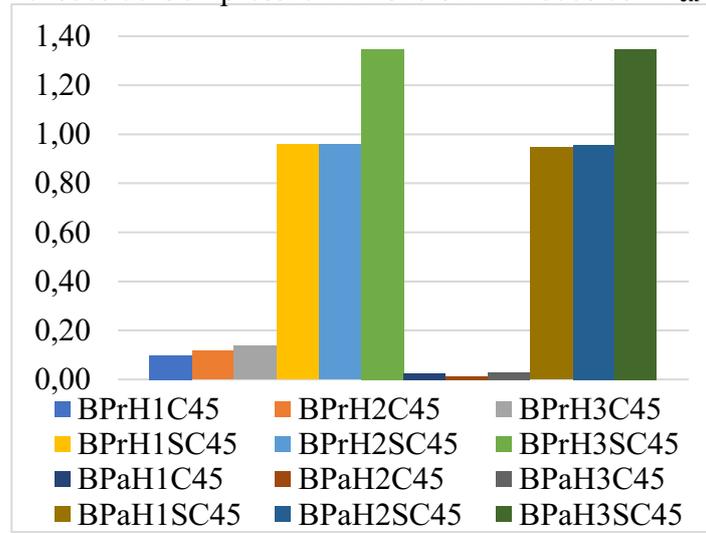
Fonte: Autor (2022)

Figura 128 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 129 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com  $f_{ck}$  de 45 MPa (MPa)



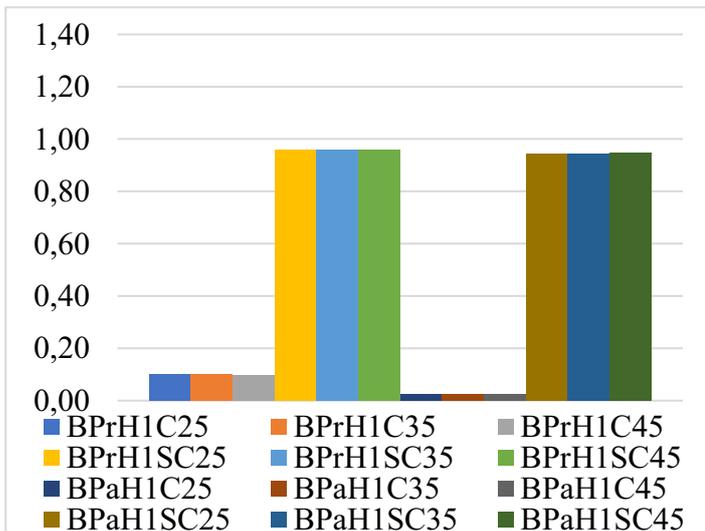
Fonte: Autor (2022)

As figuras demonstram que a variação do  $f_{ck}$  não influencia significativamente nas tensões de compressão transversal, pois os resultados com os três valores de  $f_{ck}$  resultaram em valores de compressão transversal bem próximos.

### 5.8.2 Influência da altura

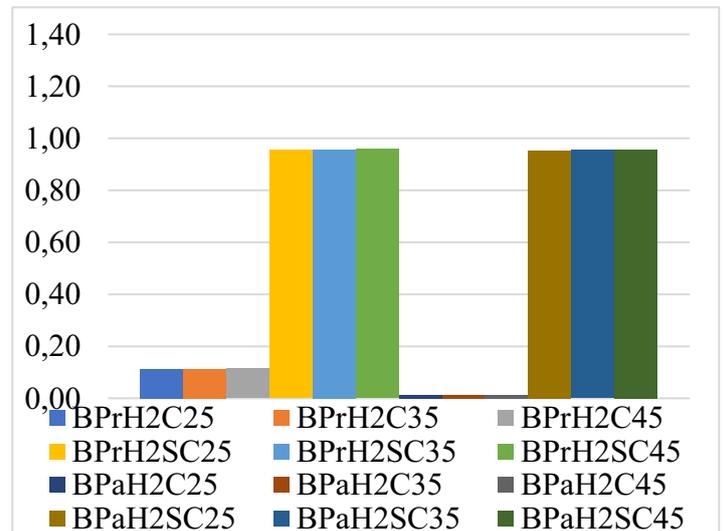
As Figuras 130 a 132 mostram a influência da variação da altura nas tensões de compressão transversal.

Figura 130 - Tensões de Compressão Transversal - Blocos com altura de 54 cm (Mpa)



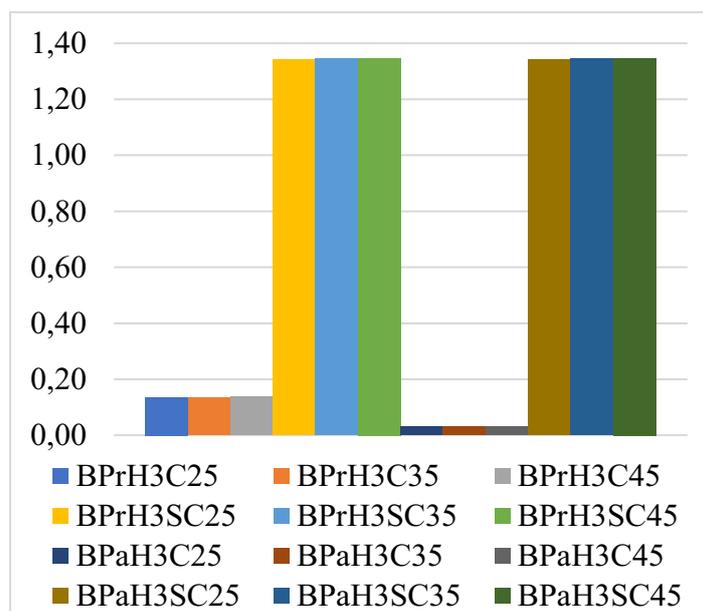
Fonte: Autor (2022)

Figura 131 - Tensões de Compressão Transversal - Blocos com altura de 110 cm (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 132 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com altura de 165 cm (MPa)



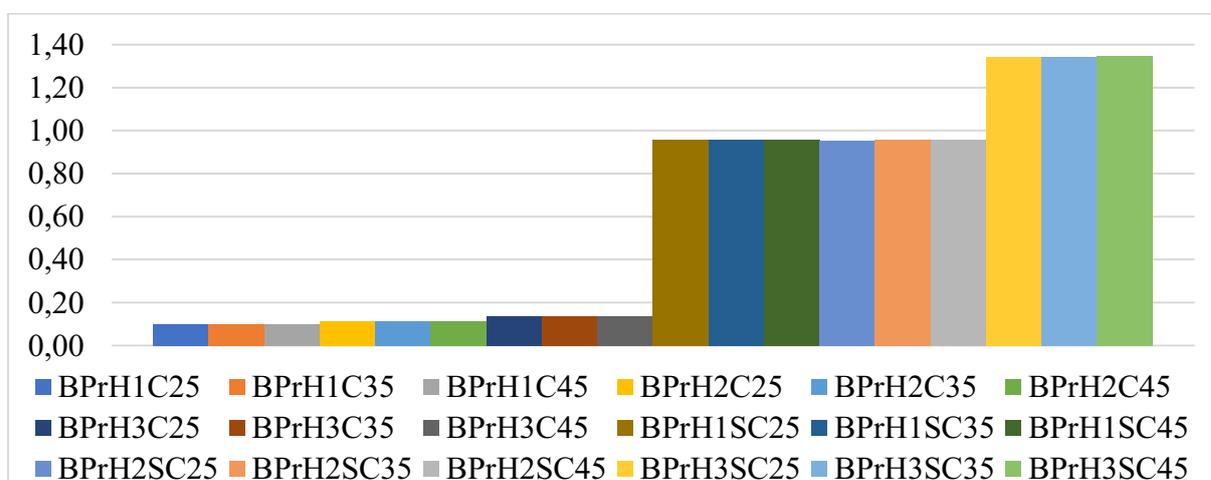
Fonte: Autor (2022)

Observando as figuras acima, pode-se perceber que a influência maior da variação da altura se dá nos modelos com presença do solo. O valor de compressão aumenta ao aumentar a altura, portanto são grandezas diretamente proporcionais.

### 5.8.3 Influência da geometria do pilar

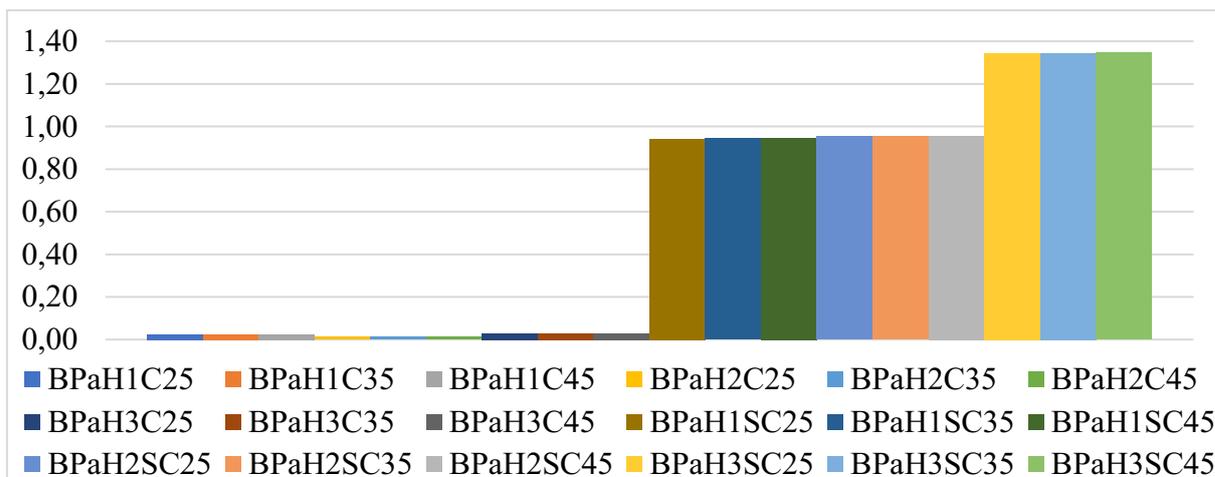
As Figuras 133 e 134 demonstram a influência do tipo de geometria do pilar nos valores de compressão transversal.

Figura 133 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com pilar retangular (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 134 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com pilares associados (MPa)



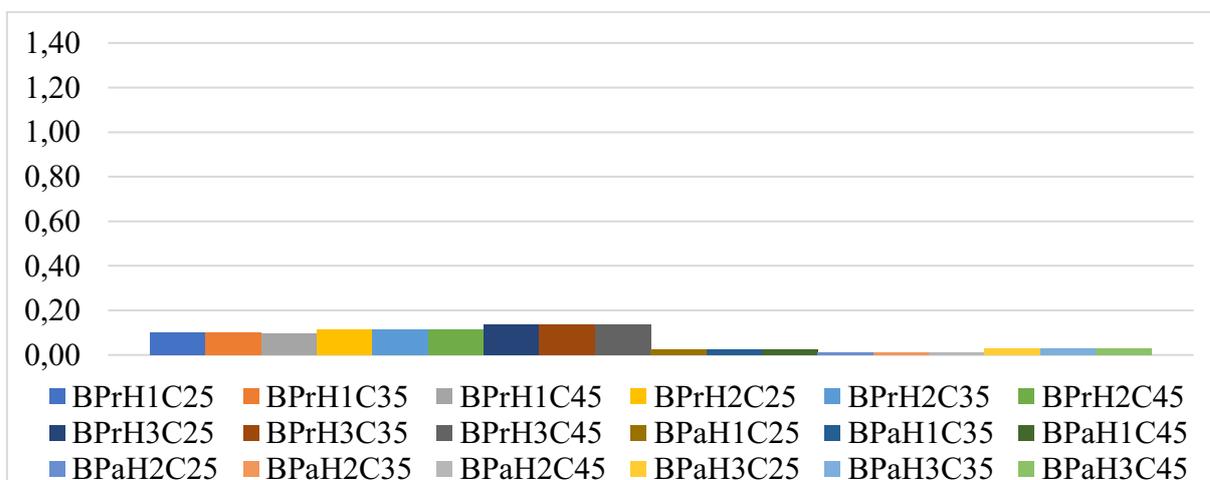
Fonte: Autor (2022)

Ao modificar o tipo da geometria do pilar, pode-se perceber que os modelos sem a presença do solo resultam em valores menores de compressão transversal. Já nos modelos com a presença do solo, não há uma grande influência nas tensões a alteração do tipo de geometria do pilar.

#### 5.8.4 Influência da presença ou não do solo

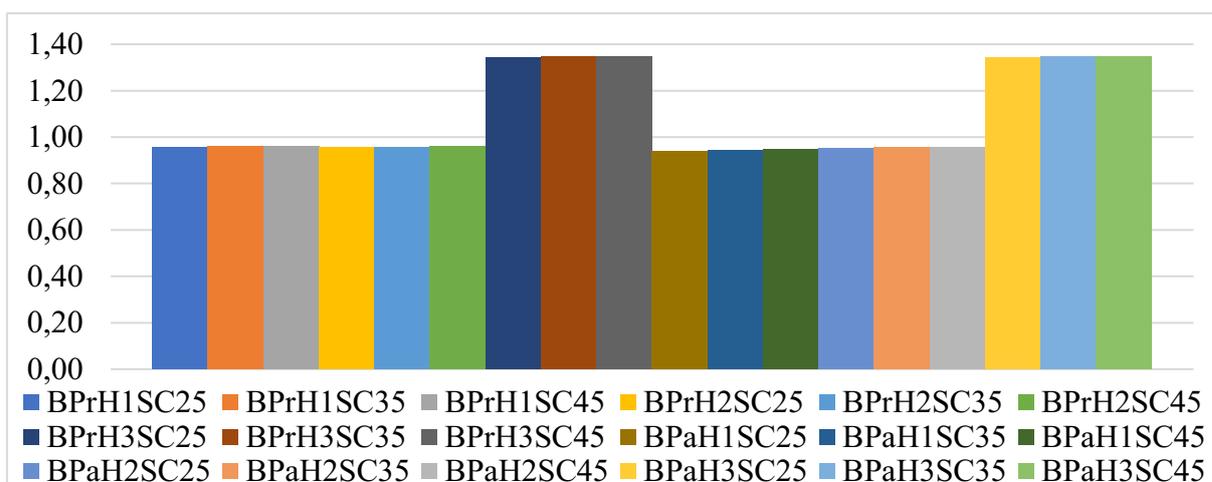
As Figuras 135 e 136 demonstram a influência da presença ou não de solo nos valores de compressão transversal.

Figura 135 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos sem presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 136 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Observando as tensões nas figuras anteriores pode-se observar que ao se considerar a presença do solo os valores das tensões de compressão transversal são bem maiores. Tanto nos modelos com pilar retangular, quanto nos modelos com pilares associados.

## 5.9 TENSÕES DE TRAÇÃO NA DIREÇÃO X

A Tabela 19 compreende os resultados encontrados da tensão de tração dos blocos sobre doze estacas na direção X. Foram encontradas as tensões na direção Z também.

Tabela 19 – Tensões de Tração na Direção X (MPa)

Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração
BPrH1C25	6,5661	BPrH1SC25	9,0825	BPaH1C25	1,8025	BPaH1SC25	3,1068
BPrH1C35	6,7466	BPrH1SC35	8,8903	BPaH1C35	1,8002	BPaH1SC35	3,0271
BPrH1C45	6,8783	BPrH1SC45	8,9376	BPaH1C45	1,7997	BPaH1SC45	2,9666
BPrH2C25	2,2112	BPrH2SC25	2,4683	BPaH2C25	0,78028	BPaH2SC25	1,5606
BPrH2C35	2,2204	BPrH2SC35	2,4148	BPaH2C35	0,7854	BPaH2SC35	1,5126
BPrH2C45	2,2267	BPrH2SC45	2,3753	BPaH2C45	0,78923	BPaH2SC45	1,4762
BPrH3C25	1,138	BPrH3SC25	2,2678	BPaH3C25	0,74159	BPaH3SC25	2,1255
BPrH3C35	1,1412	BPrH3SC35	2,2313	BPaH3C35	0,72192	BPaH3SC35	2,09
BPrH3C45	1,1436	BPrH3SC45	2,2029	BPaH3C45	0,72486	BPaH3SC45	2,0624

Fonte: Autor (2022)

### 5.9.1 Influência do $f_{ck}$

As Figuras 137 a 139 mostram a influência da variação do  $f_{ck}$  nos valores de tensões de tração de todos os modelos.

Figura 137 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa (MPa)

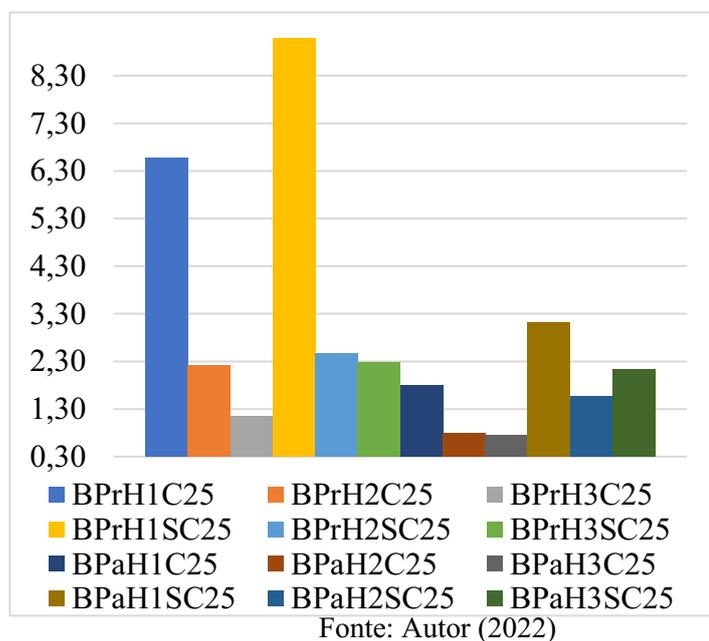


Figura 138 – Tensões de Compressão Transversal – Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa (MPa)

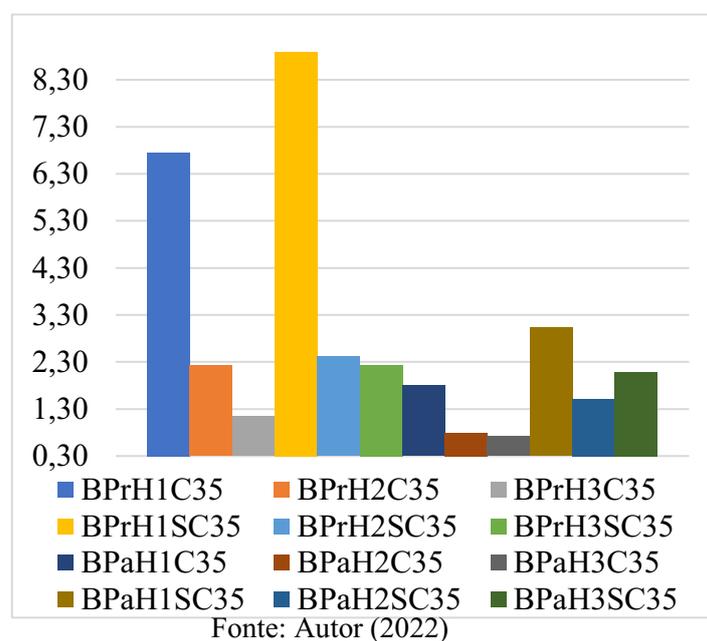
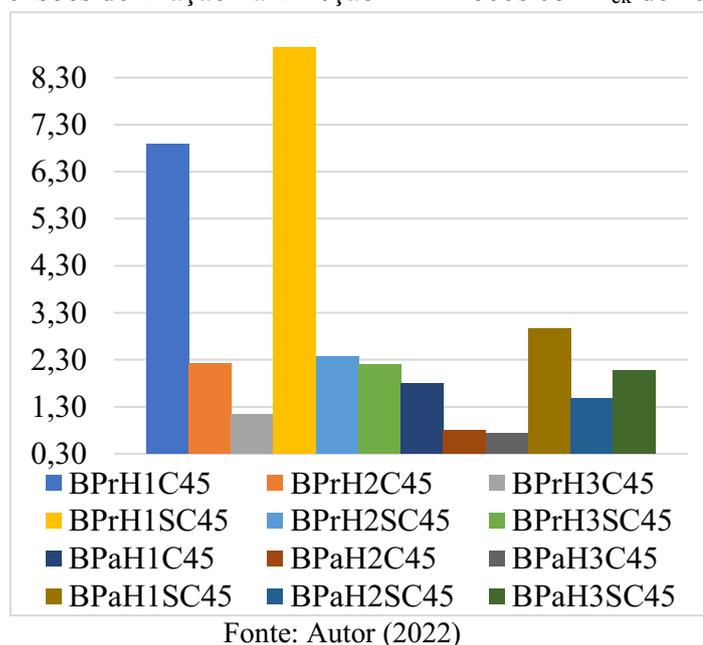


Figura 139 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com  $f_{ck}$  de 45 MPa (MPa)

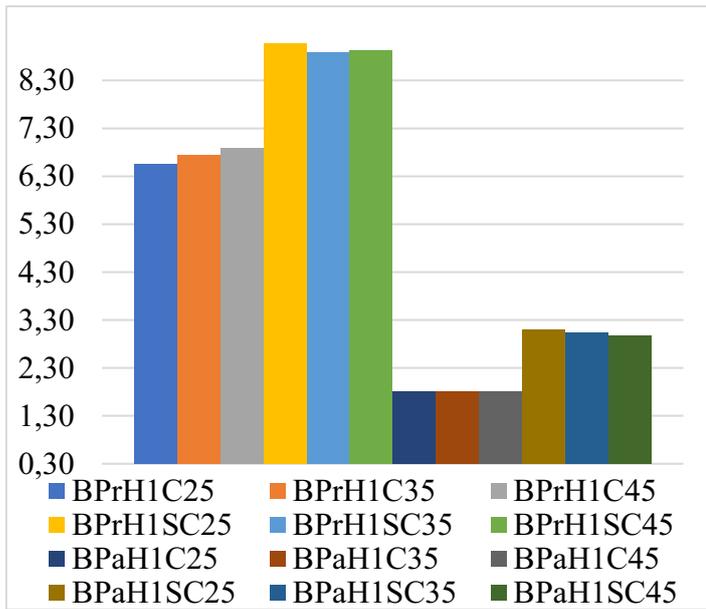


As Figuras 137 a 139 mostra em quais modelos a variação do  $f_{ck}$  é mais relevante nos valores das tensões de tração na direção X. Nos modelos com pilar retangular sem presença de solo, os valores de tração sofrem um aumento ao se aumentar o  $f_{ck}$ . Nos outros modelos os valores de tensões diminuíram, ou seja, foram inversamente proporcionais.

5.9.2 *Influência da altura*

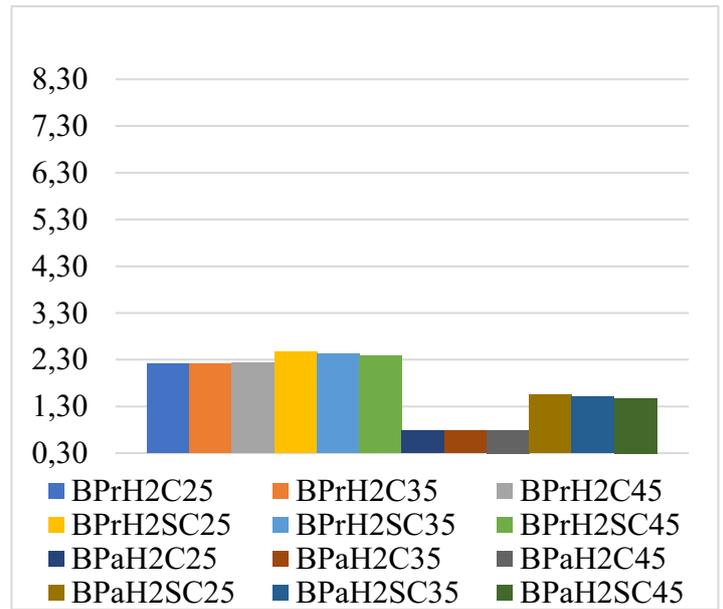
As Figuras 140 a 142 mostram a influência da variação da altura nos valores de tensões de tração de todos os modelos.

Figura 140 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com altura de 54 cm (MPa)



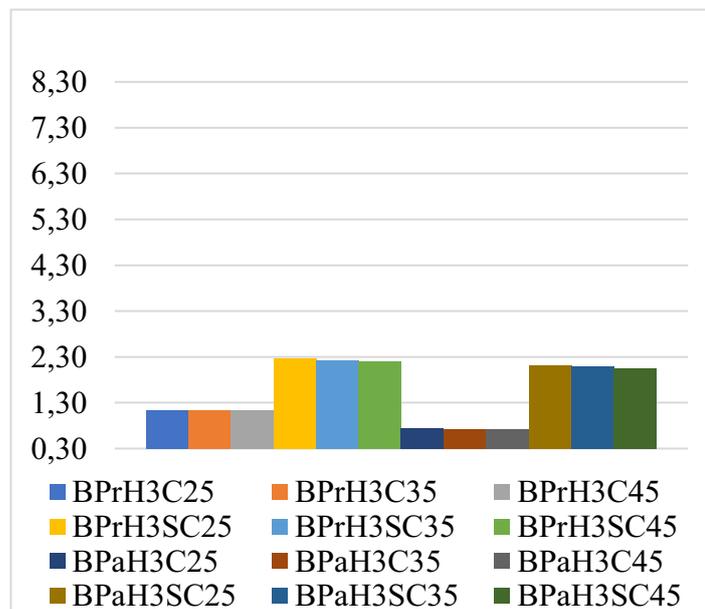
Fonte: Autor (2022)

Figura 141 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com altura de 110 cm (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 142 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com altura de 165 cm (MPa)



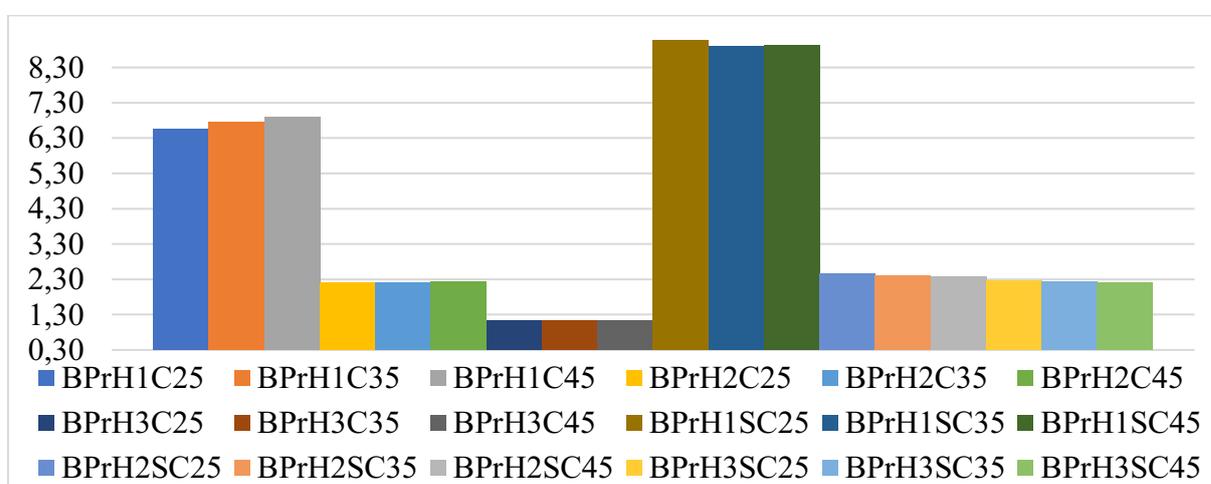
Fonte: Autor (2022)

Pode-se observar que em todos os modelos ocorre 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 diminuem.

### 5.9.3 Influência da geometria do pilar

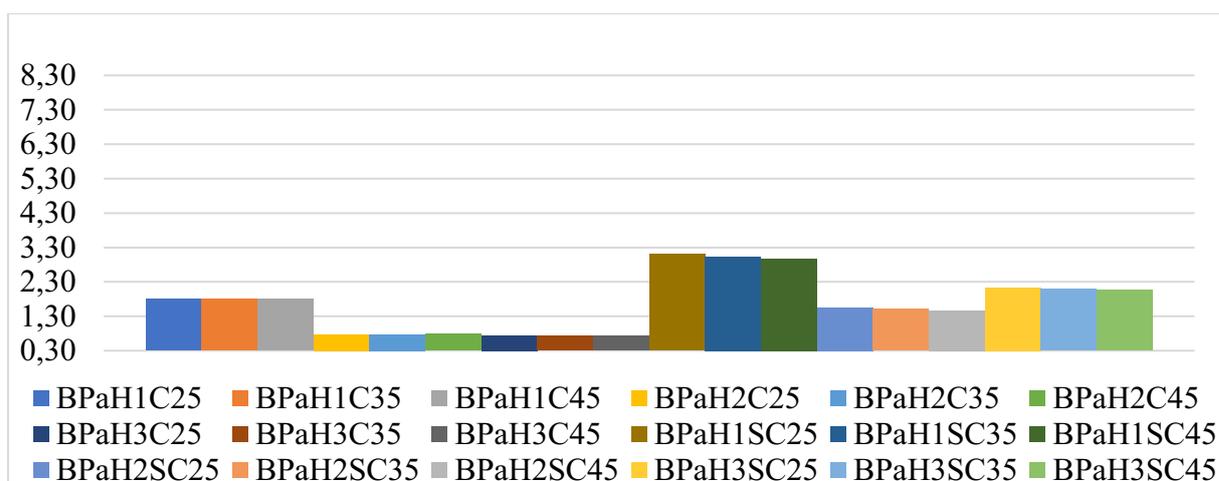
As Figuras 143 e 144 a seguir representam a influência do tipo de geometria do pilar nos valores de tensões de tração de todos os modelos.

Figura 143 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com pilar retangular (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 144 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com pilares associados (MPa)



Fonte: Autor (2022)

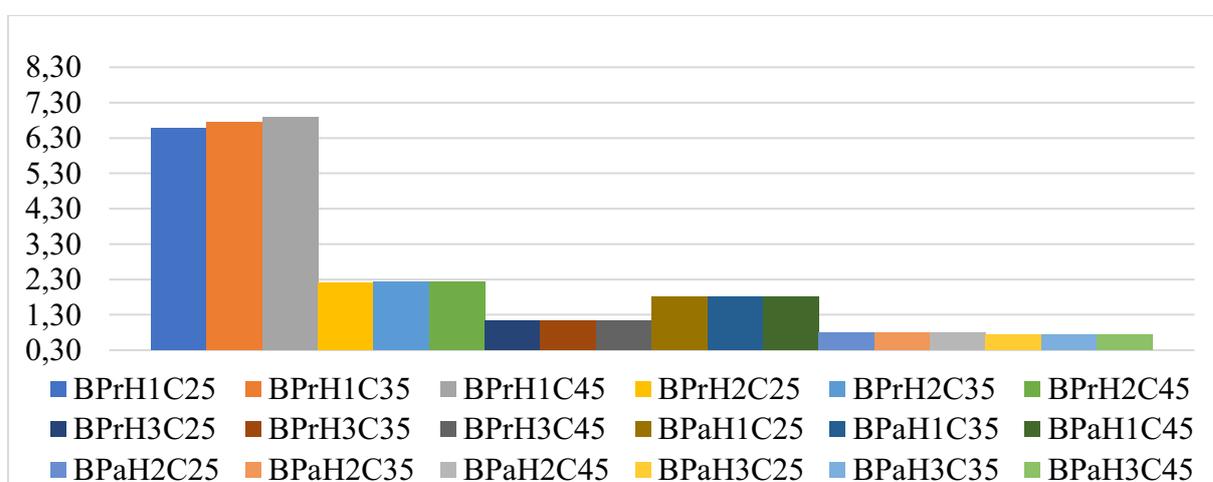
Pode-se perceber que em todos os modelos, ao se alterar a geometria do pilar de pilar retangular para pilares associados, os valores de tensões de tração na direção X diminuem. Os

modelos que sofrem uma redução maior nessa tensão são os modelos com a altura de 54 cm, ou seja, a altura mínima.

#### 5.9.4 Influência da presença ou não do solo

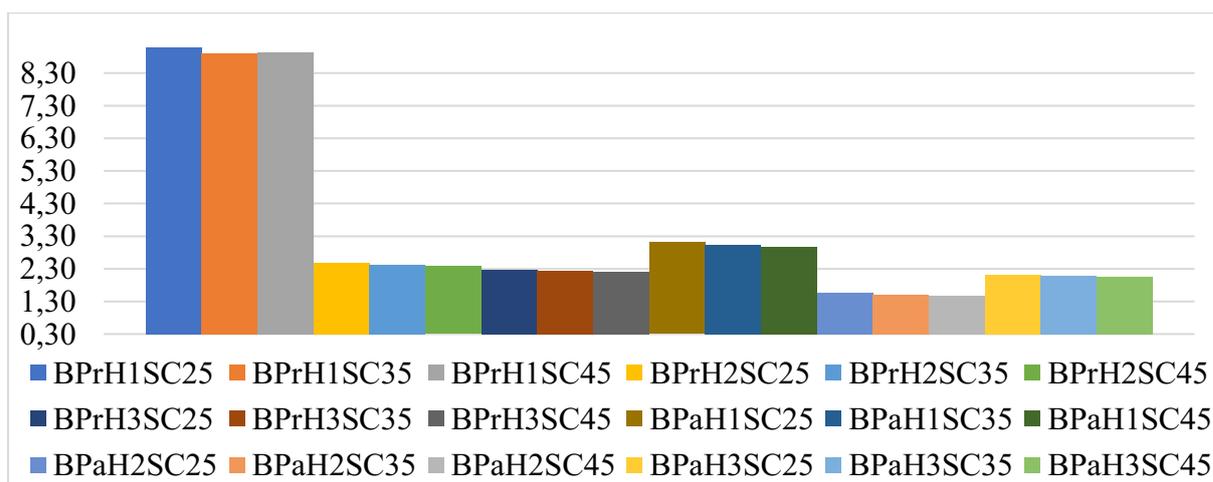
As Figuras 145 e 146 mostram a influência da presença ou não de solo nos valores de tensões de tração na direção X.

Figura 145 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos sem presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 146 – Tensões de Tração na Direção X – Blocos com presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Observando os resultados obtidos, pode-se perceber que ao considerar a presença do solo os valores de tensões de tração na direção X são maiores. Principalmente os modelos com a maior altura.

### 5.10 TENSÕES DE TRAÇÃO LONGITUDINAL NA DIREÇÃO X

A Tabela 20 apresenta os resultados das tensões de tração no corte longitudinal na direção X que foi considerado nos modelos.

Tabela 20 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X (MPa)

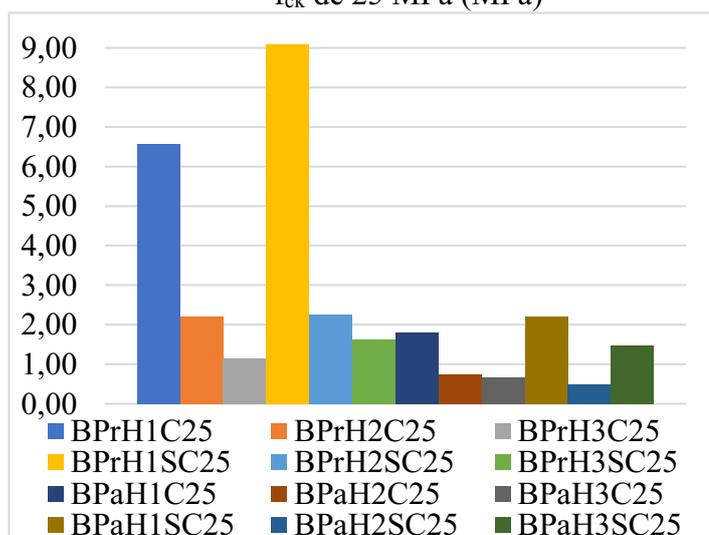
Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração
BPrH1C25	6,5661	BPrH1SC25	9,0825	BPaH1C25	1,7961	BPaH1SC25	2,1934
BPrH1C35	6,7466	BPrH1SC35	8,8903	BPaH1C35	1,7949	BPaH1SC35	2,2281
BPrH1C45	6,8783	BPrH1SC45	8,9376	BPaH1C45	1,7953	BPaH1SC45	2,2534
BPrH2C25	2,2112	BPrH2SC25	2,267	BPaH2C25	0,73626	BPaH2SC25	0,50245
BPrH2C35	2,2204	BPrH2SC35	2,2638	BPaH2C35	0,74015	BPaH2SC35	0,50365
BPrH2C45	2,2267	BPrH2SC45	2,2614	BPaH2C45	0,7429	BPaH2SC45	0,50447
BPrH3C25	1,138	BPrH3SC25	1,6295	BPaH3C25	0,67281	BPaH3SC25	1,4839
BPrH3C35	1,1412	BPrH3SC35	1,614	BPaH3C35	0,67837	BPaH3SC35	1,4702
BPrH3C45	1,1436	BPrH3SC45	1,6013	BPaH3C45	0,68246	BPaH3SC45	1,4589

Fonte: Autor (2022)

#### 5.10.1 Influência do $f_{ck}$

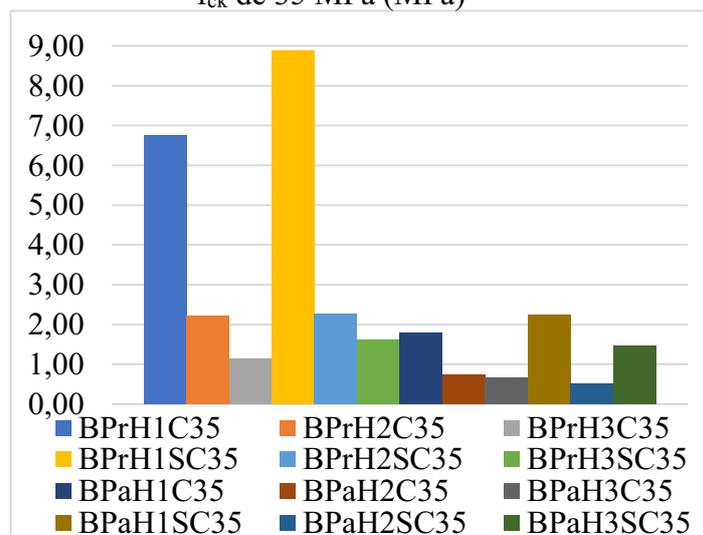
As Figuras 147 a 149 mostram a influência do  $f_{ck}$  nos valores de tensões de tração longitudinal na direção X.

Figura 147 - Tensões de Tração Longitudinal na Direção X - Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa (MPa)

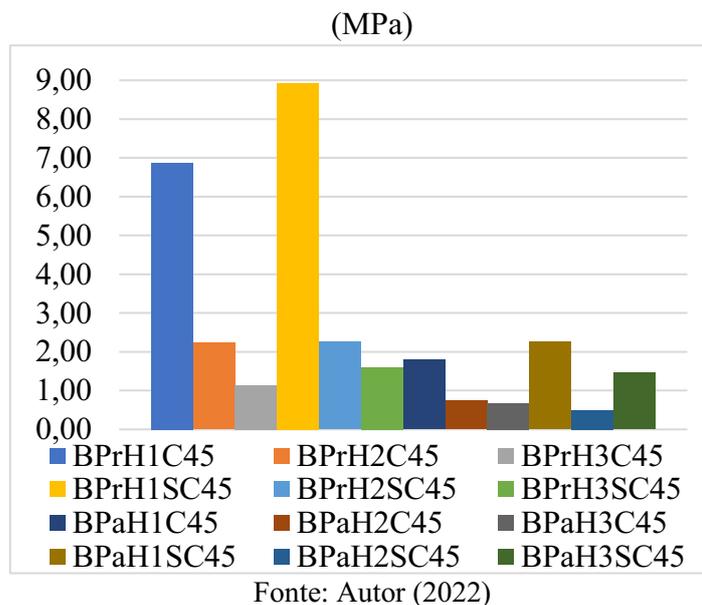


Fonte: Autor (2022)

Figura 148 - Tensões de Tração Longitudinal na Direção X - Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 149 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com  $f_{ck}$  de 45 MPa

Observando as figuras acima, pode-se verificar que ao alterar o  $f_{ck}$  não há uma grande variação nos valores de tensões de tração, portanto o parâmetro  $f_{ck}$  não possui influência nesse resultado.

### 5.10.2 Influência da altura

As Figuras 150 a 152 mostram a influência da altura nos valores de tensões de tração longitudinal na direção X.

Figura 150 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com altura de 54 cm (MPa)

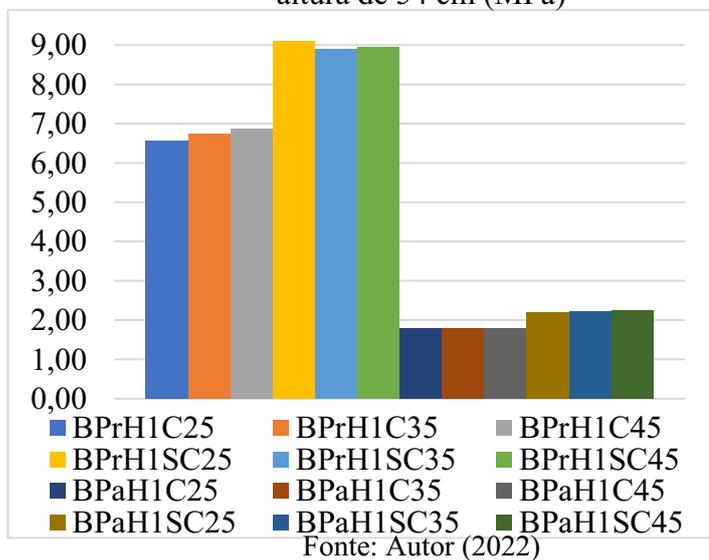


Figura 151 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com altura de 110 cm (MPa)

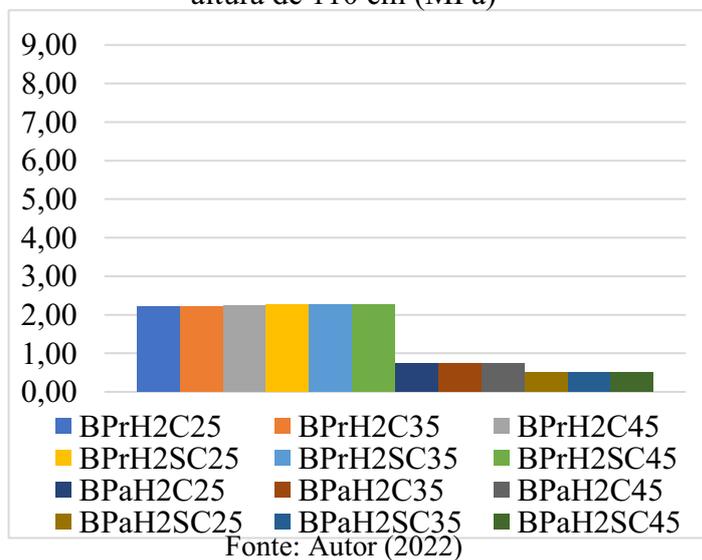
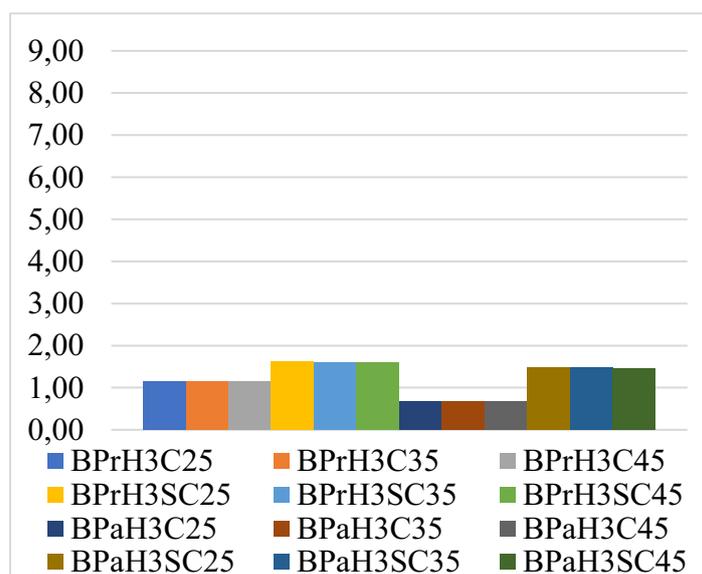


Figura 152 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com altura de 165 cm (MPa)



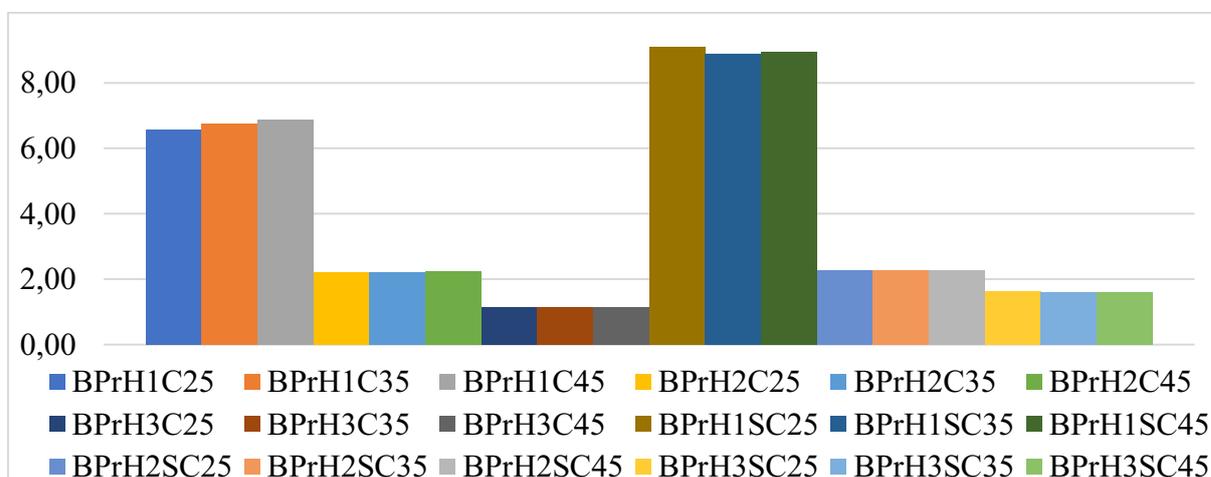
Fonte: Autor (2022)

Observando as figuras, pode-se perceber que em quase todos os modelos, ao aumentar a altura, os valores de tensões de tração longitudinal diminuem. Menos nos modelos com presença de solo e pilares associados que os valores de tensões aumentam na altura máxima.

### 5.10.3 Influência da geometria do pilar

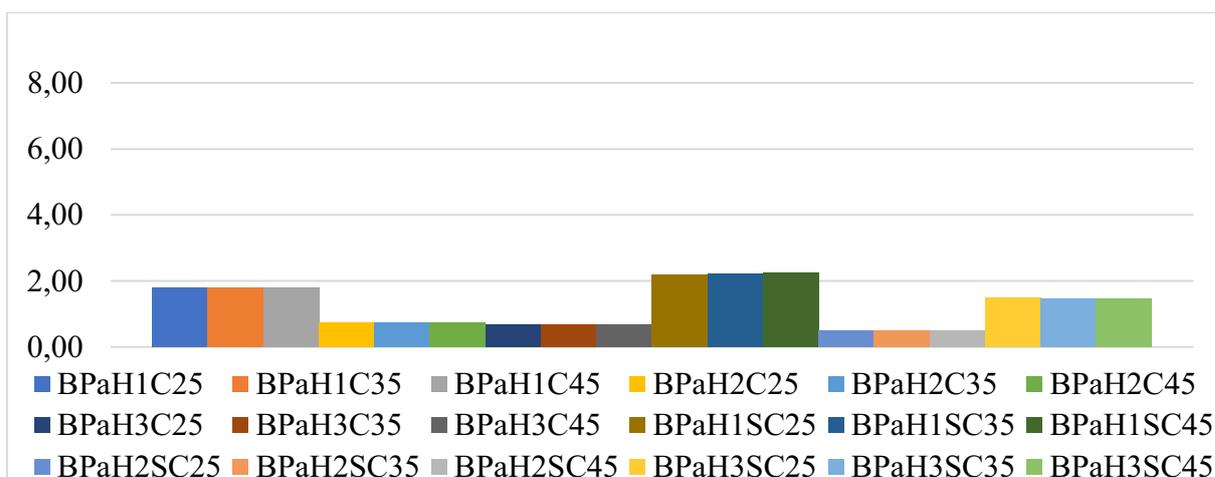
As Figuras 153 e 154 representam a influência do tipo de geometria do pilar nos valores de tensões de tração longitudinal na direção X.

Figura 153 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com pilar retangular (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 154 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com pilares associados (MPa)



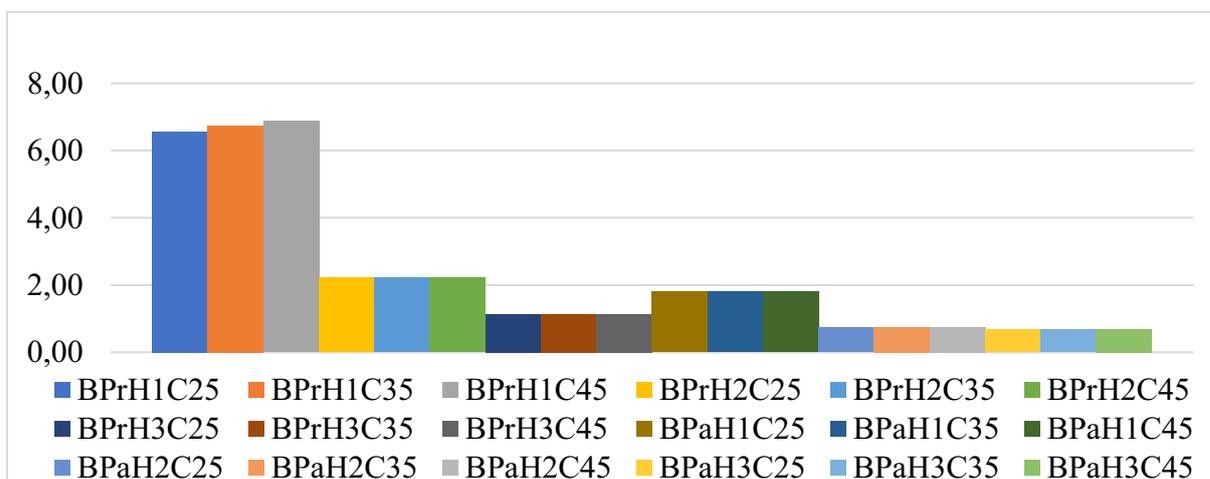
Fonte: Autor (2022)

Pode-se observar que ao alterar a geometria do pilar de retangular para pilares associados em “L”, encontramos resultados menores de tensões de tração longitudinal. Principalmente nos modelos com a menor altura dos blocos, ocorre a maior redução nos valores de tensões.

#### 5.10.4 Influência da presença ou não do solo

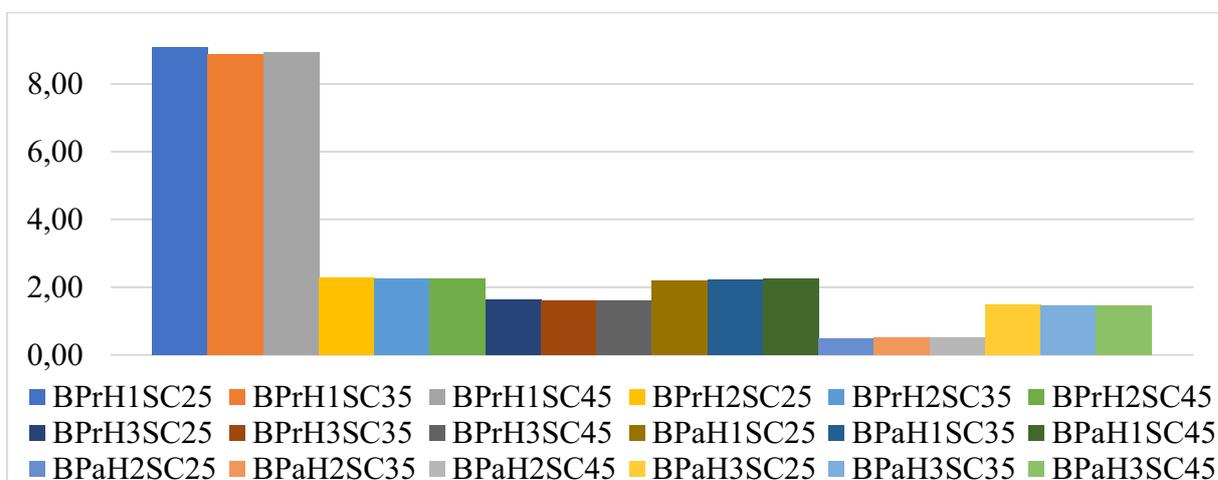
As Figuras 155 e 156 representam a influência da presença ou não do solo nos valores de tensões de tração longitudinal na direção X.

Figura 155 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos sem presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 156 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção X – Blocos com presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Podemos concluir através da análise desses resultados, que na maioria dos modelos ocorre um aumento dos valores de tensão de tração dos modelos sem presença do solo em relação aos modelos com presença do solo. Menos nos modelos com pilares associados e altura média, que os valores de tensão são maiores nos modelos sem o solo.

### 5.11 TENSÕES DE TRAÇÃO TRANSVERSAL NA DIREÇÃO X

A Tabela 21 apresenta os resultados das tensões de tração no corte transversal que foi considerado nos modelos.

Tabela 21 – Tensões de Tração Transversal na Direção X (MPa)

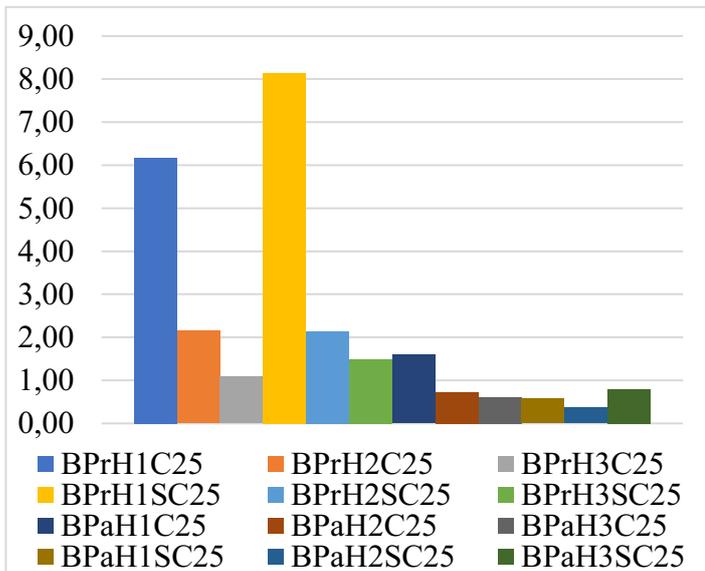
Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração
BPrH1C25	6,169	BPrH1SC25	8,1404	BPaH1C25	1,5901	BPaH1SC25	0,57408
BPrH1C35	6,3738	BPrH1SC35	8,2897	BPaH1C35	1,6343	BPaH1SC35	0,57941
BPrH1C45	6,5261	BPrH1SC45	8,4033	BPaH1C45	1,6654	BPaH1SC45	0,57408
BPrH2C25	2,1522	BPrH2SC25	2,1385	BPaH2C25	0,72847	BPaH2SC25	0,3696
BPrH2C35	2,1647	BPrH2SC35	2,146	BPaH2C35	0,73161	BPaH2SC35	0,37104
BPrH2C45	2,1737	BPrH2SC45	2,1515	BPaH2C45	0,73377	BPaH2SC45	0,37207
BPrH3C25	1,0911	BPrH3SC25	1,4951	BPaH3C25	0,60432	BPaH3SC25	0,79977
BPrH3C35	1,0935	BPrH3SC35	1,4976	BPaH3C35	0,60519	BPaH3SC35	0,80242
BPrH3C45	1,0953	BPrH3SC45	1,4993	BPaH3C45	0,60588	BPaH3SC45	0,80427

Fonte: Autor (2022)

5.11.1 Influência do  $f_{ck}$

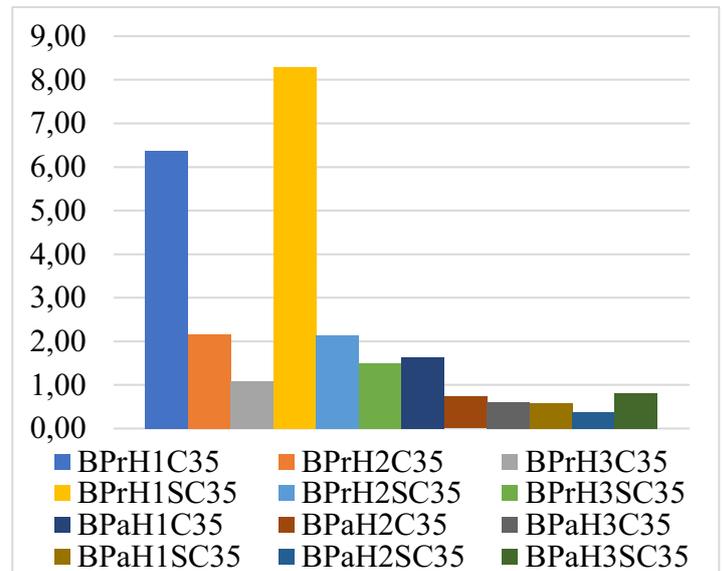
As Figuras 157 a 159 representam a influência do parâmetro  $f_{ck}$  nos valores de tensões de tração transversal na direção X.

Figura 157 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa (MPa)



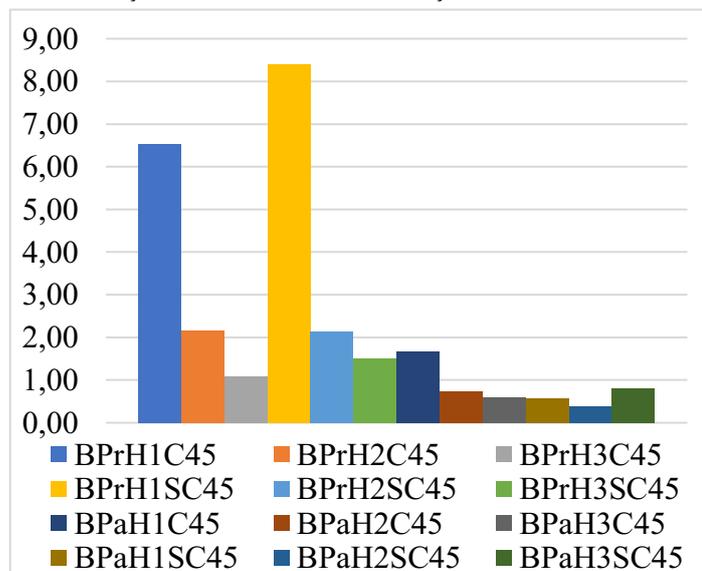
Fonte: Autor (2022)

Figura 158 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 159 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com  $f_{ck}$  de 45 MPa (MPa)



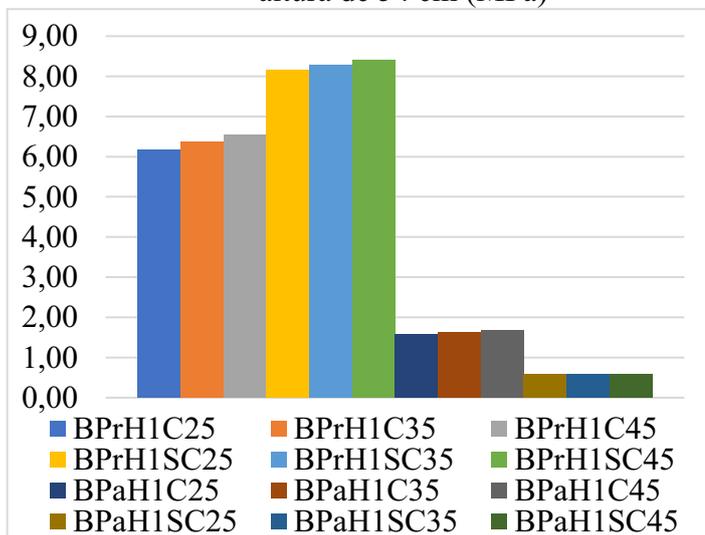
Fonte: Autor (2022)

Pode-se observar que não ocorre uma grande influência nos valores de tração ao se aumentar o  $f_{ck}$ , portanto não é um parâmetro relevante nesse resultado.

5.11.2 Influência da altura

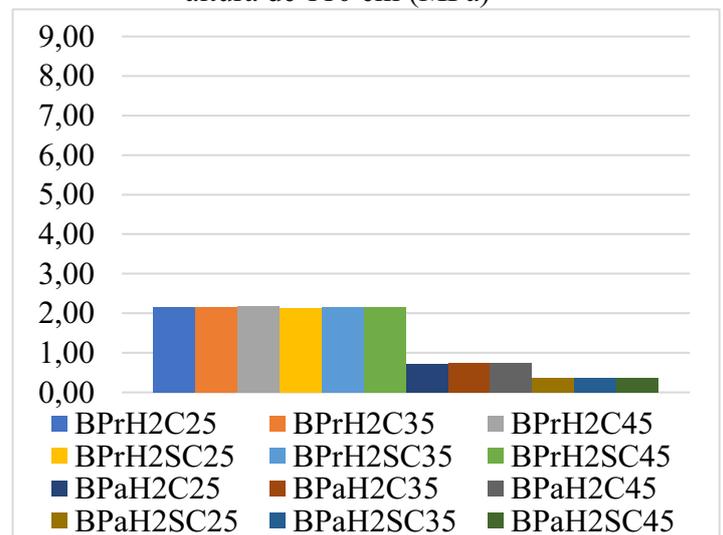
As Figuras 160 a 162 representam a influência do parâmetro altura nos valores de tensões de tração transversal na direção X.

Figura 160 - Tensões de Tração Transversal na Direção X - Blocos com altura de 54 cm (MPa)



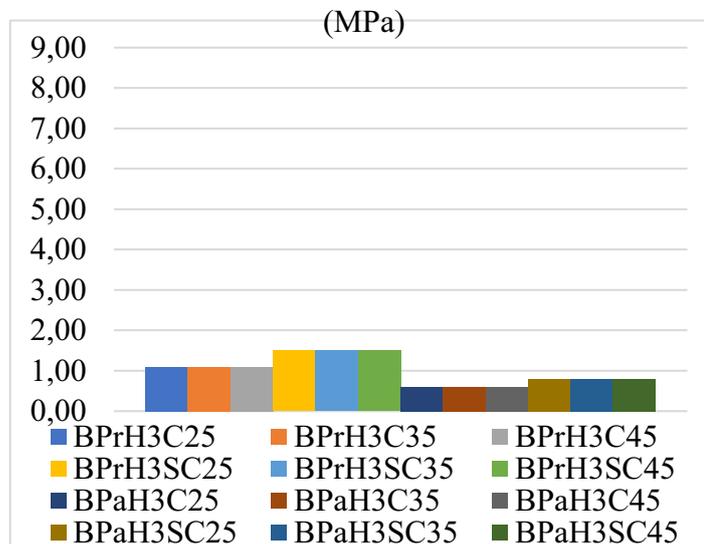
Fonte: Autor (2022)

Figura 161 - Tensões de Tração Transversal na Direção X - Blocos com altura de 110 cm (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 162 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com altura de 165 cm



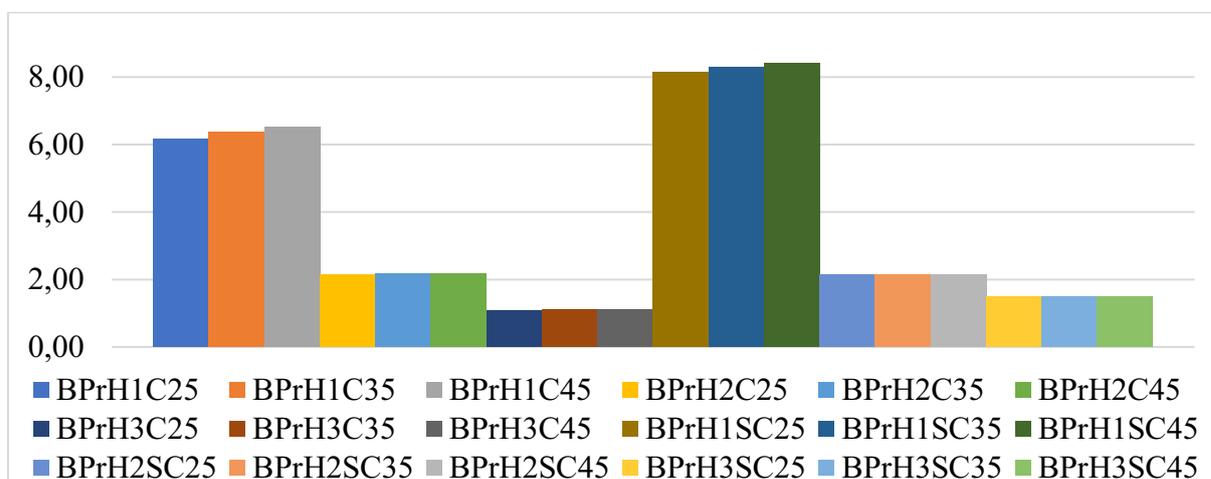
Fonte: Autor (2022)

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.

### 5.11.3 Influência da geometria do pilar

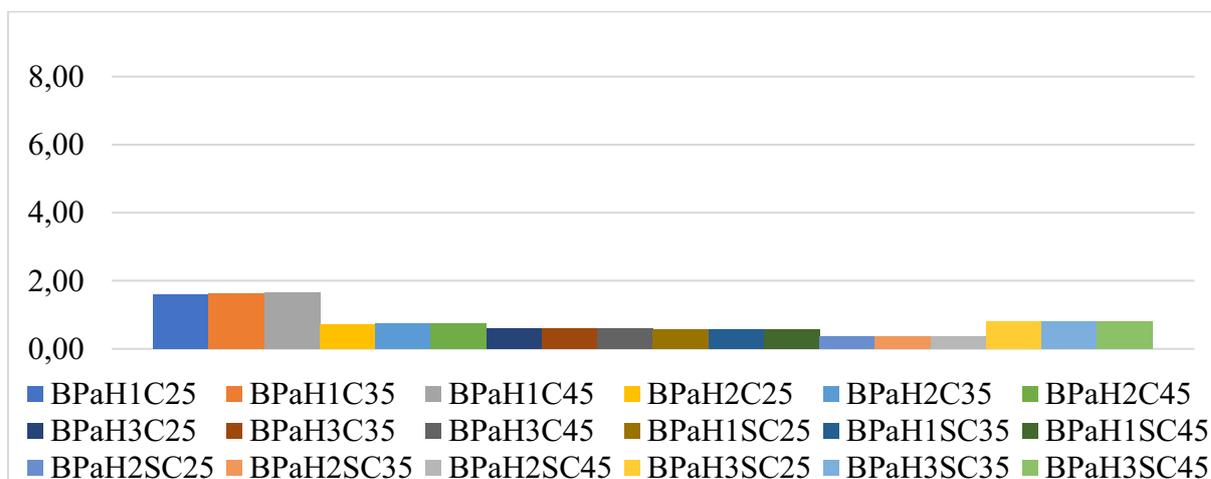
As Figuras 163 e 164 representam a influência da geometria do pilar nos valores de tensões de tração transversal na direção X.

Figura 163 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com pilar retangular (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 164 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com pilares associados (MPa)



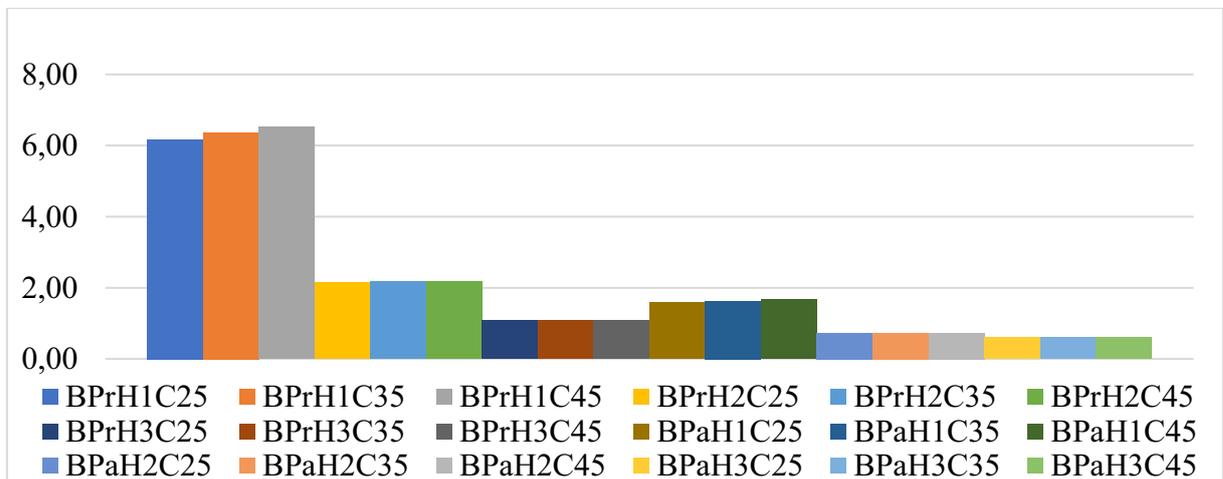
Fonte: Autor (2022)

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.

5.11.4 *Influência da presença ou não do solo*

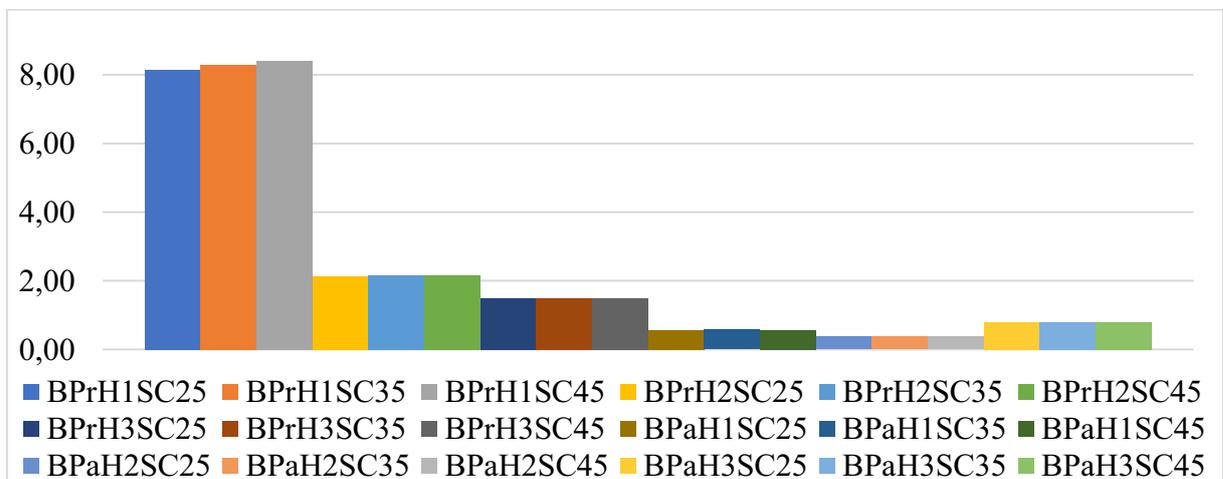
As Figuras 165 e 166 representam a influência da presença ou não do solo nos valores de tensões de tração transversal na direção X.

Figura 165 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos sem presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 166 – Tensões de Tração Transversal na Direção X – Blocos com presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Observando os gráficos, 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.

## 5.12 TENSÕES DE TRAÇÃO NA DIREÇÃO Z

A Tabela 22 apresenta os resultados das tensões de tração na direção Z em todos os modelos analisados.

Tabela 22 – Tensões de Tração na Direção Z (MPa)

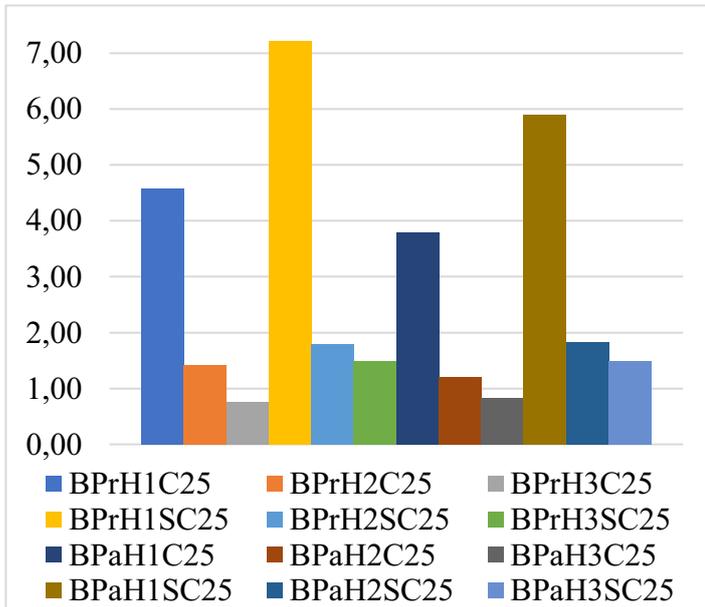
<b>Blocos</b>	<b>Tração</b>	<b>Blocos</b>	<b>Tração</b>	<b>Blocos</b>	<b>Tração</b>	<b>Blocos</b>	<b>Tração</b>
BPrH1C25	4,5878	BPrH1SC25	7,2276	BPaH1C25	3,7884	BPaH1SC25	5,8953
BPrH1C35	4,6273	BPrH1SC35	7,2268	BPaH1C35	3,8216	BPaH1SC35	5,8764
BPrH1C45	4,7163	BPrH1SC45	7,2298	BPaH1C45	3,8439	BPaH1SC45	5,8688
BPrH2C25	1,412	BPrH2SC25	1,7994	BPaH2C25	1,2045	BPaH2SC25	1,8364
BPrH2C35	1,415	BPrH2SC35	1,7823	BPaH2C35	1,2073	BPaH2SC35	1,7792
BPrH2C45	1,4177	BPrH2SC45	1,7699	BPaH2C45	1,2096	BPaH2SC45	1,7666
BPrH3C25	0,75545	BPrH3SC25	1,4814	BPaH3C25	0,83316	BPaH3SC25	1,4906
BPrH3C35	0,76051	BPrH3SC35	1,4881	BPaH3C35	0,79638	BPaH3SC35	1,4941
BPrH3C45	0,7648	BPrH3SC45	1,4928	BPaH3C45	0,76964	BPaH3SC45	1,4976

Fonte: Autor (2022)

### 5.12.1 Influência do $f_{ck}$

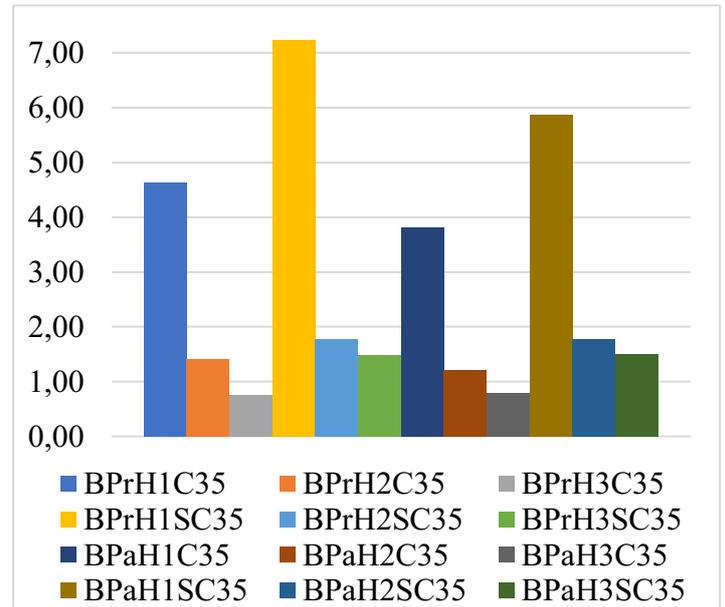
As Figuras 167 a 169 representam a influência do  $f_{ck}$  nos valores de tensões de tração na direção Z.

Figura 167 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa (MPa)



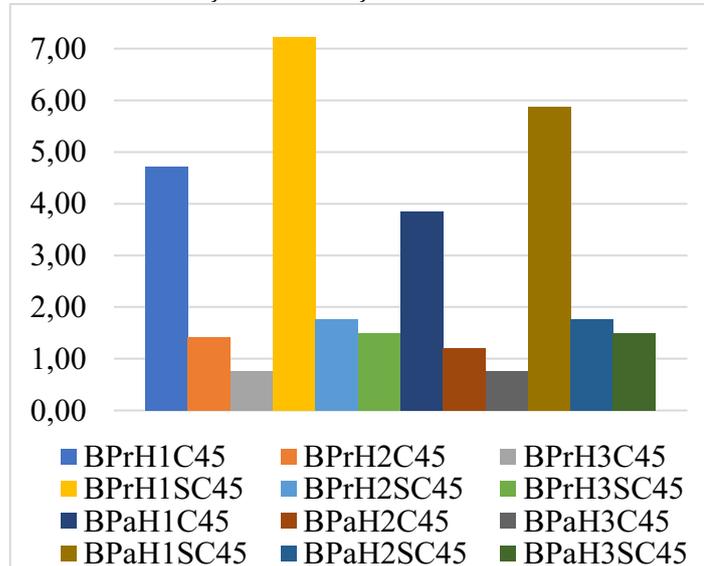
Fonte: Autor (2022)

Figura 168 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 169 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com  $f_{ck}$  de 45 MPa (MPa)



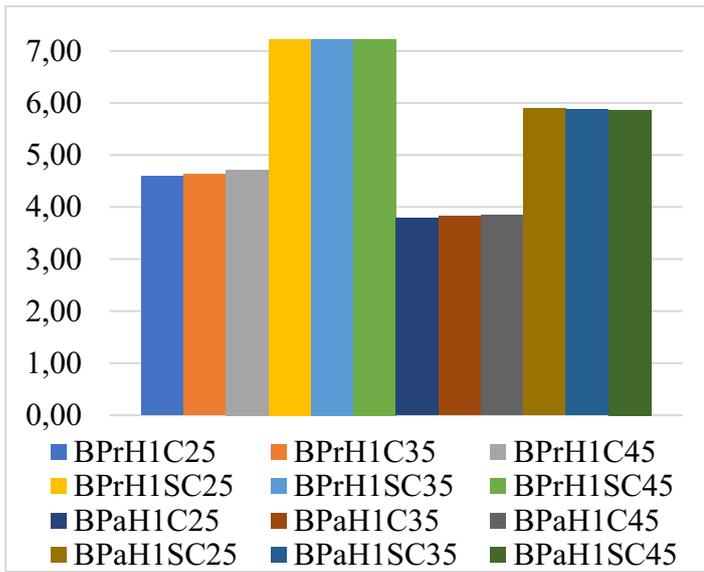
Fonte: Autor (2022)

Pode-se observar 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.

5.12.2 Influência da altura

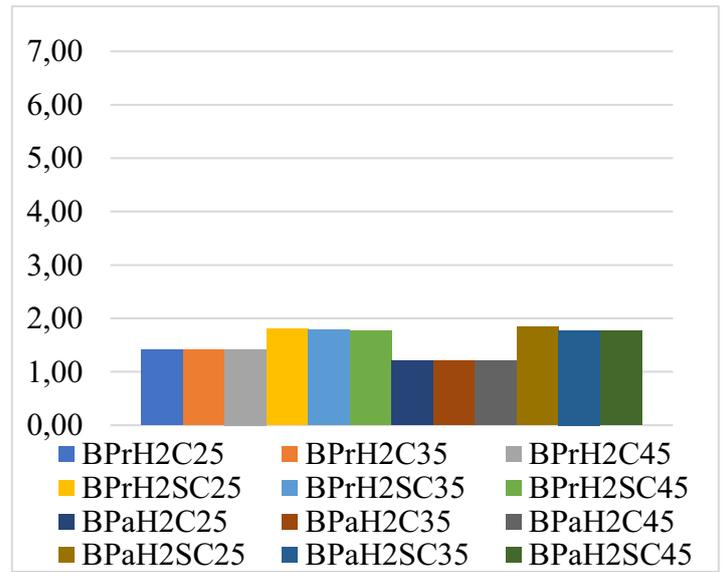
As Figuras 170 a 172 representam a influência da altura nos valores de tensões de tração na direção Z.

Figura 170 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com altura de 54 cm (MPa)



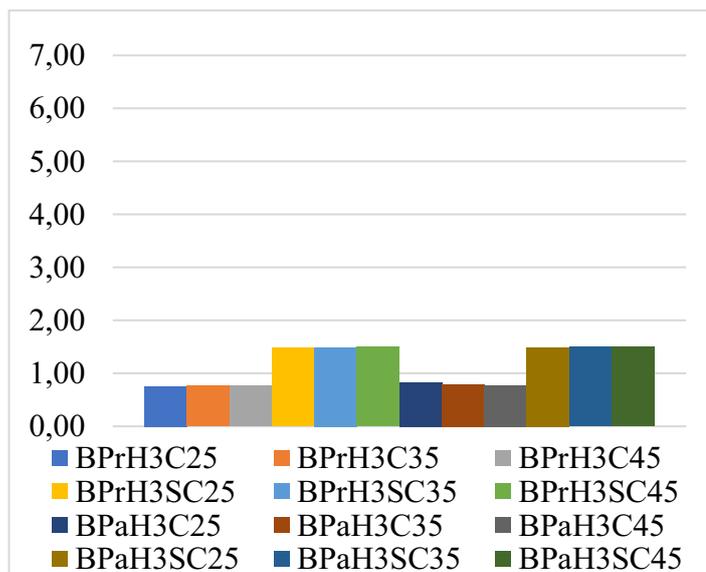
Fonte: Autor (2022)

Figura 171 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com altura de 110 cm (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 172 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com altura de 165 cm (MPa)



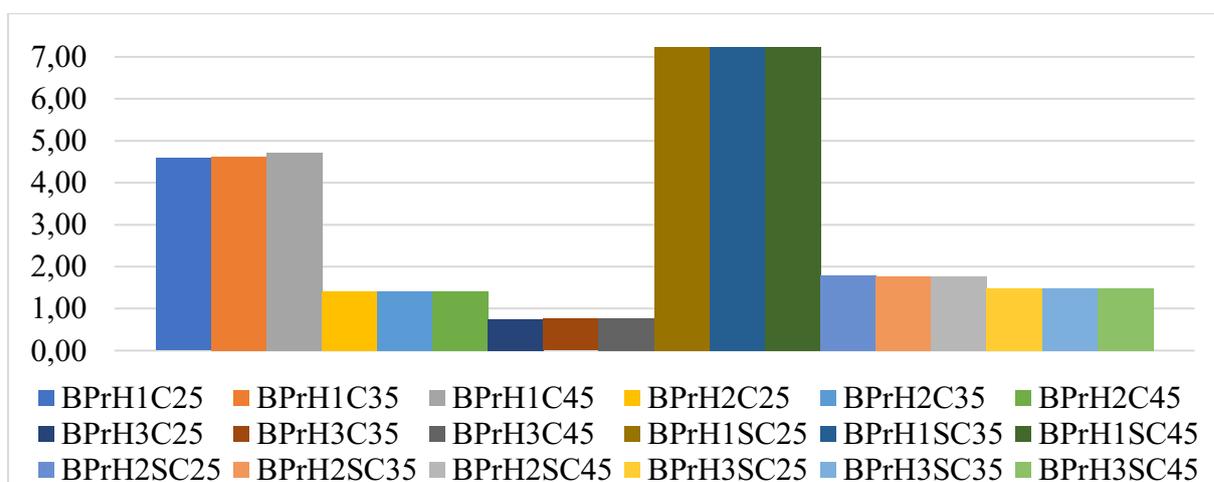
Fonte: Autor (2022)

É possível perceber que ao aumentar a altura do bloco os valores das tensões de tração na direção Z diminuem, demonstrando que a tensão de tração e a altura são inversamente proporcionais.

### 5.12.3 Influência da geometria do pilar

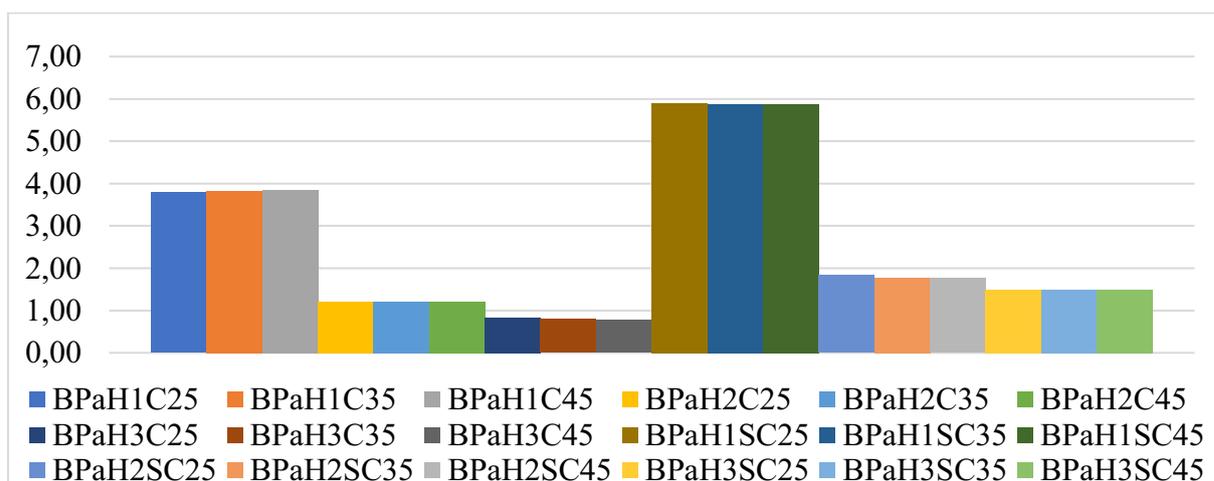
As Figuras 173 e 174 representam a influência da geometria do pilar nos valores de tensões de tração na direção Z.

Figura 173 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com pilar retangular (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 174 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com pilares associados (MPa)



Fonte: Autor (2022)

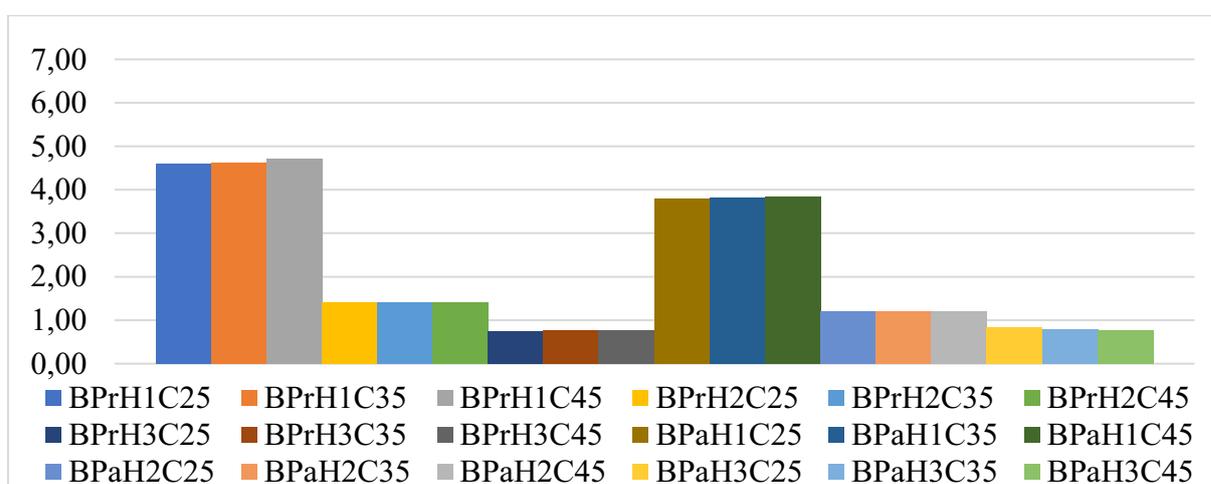
As Figuras mostram que nos modelos sem presença do solo e altura mínima e média os valores de tensões de tração na direção Z são maiores quando se utiliza pilar retangular. Nos modelos sem presença de solo e altura máxima, os valores de tração são um pouco maiores ao

se considerar pilares associados. Já nos blocos que tem 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 são para os modelos de pilares associados.

#### 5.12.4 Influência da presença ou não do solo

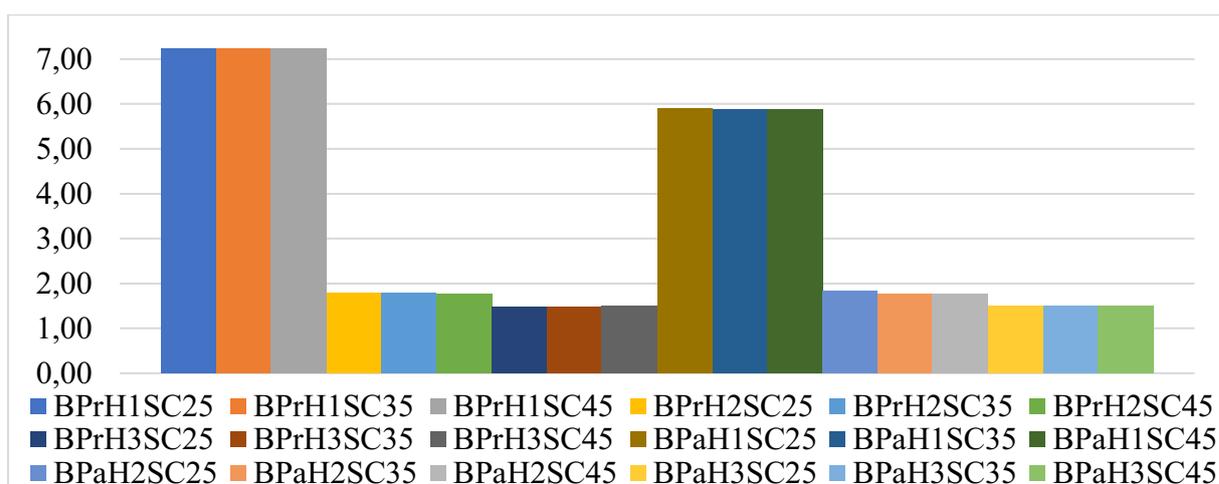
As Figuras 175 e 176 representam a influência da presença ou não do solo nos valores de tensões de tração na direção Z.

Figura 175 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos sem presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 176 – Tensões de Tração na Direção Z – Blocos com presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

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.

### 5.13 TENSÕES DE TRAÇÃO LONGITUDINAL NA DIREÇÃO Z

A Tabela 23 apresenta os resultados das tensões de tração no corte longitudinal na direção Z que foi considerado nos modelos.

Tabela 23 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z (MPa)

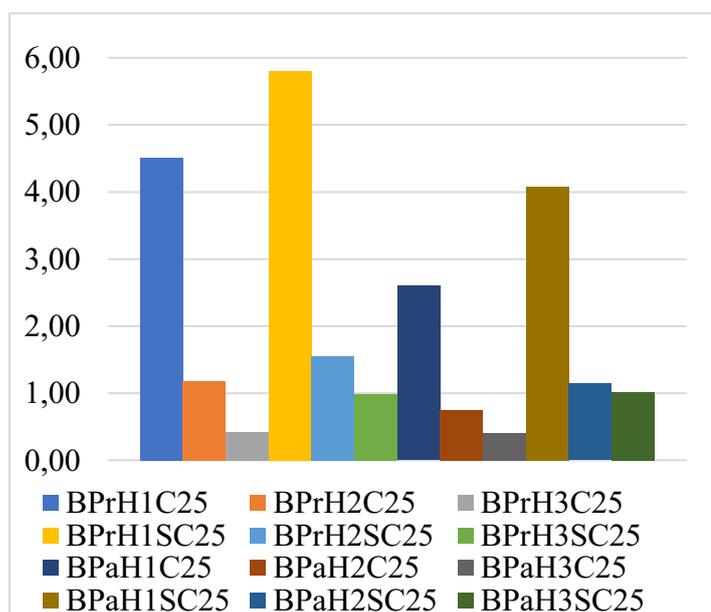
Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração
BPrH1C25	4,5088	BPrH1SC25	5,8037	BPaH1C25	2,5992	BPaH1SC25	4,0764
BPrH1C35	4,6273	BPrH1SC35	5,9277	BPaH1C35	2,6712	BPaH1SC35	4,1524
BPrH1C45	4,7163	BPrH1SC45	6,0237	BPaH1C45	2,7232	BPaH1SC45	4,2084
BPrH2C25	1,1827	BPrH2SC25	1,5522	BPaH2C25	0,7518	BPaH2SC25	1,1443
BPrH2C35	1,193	BPrH2SC35	1,5632	BPaH2C35	0,75389	BPaH2SC35	1,1504
BPrH2C45	1,2006	BPrH2SC45	1,5716	BPaH2C45	0,7552	BPaH2SC45	1,1547
BPrH3C25	0,42271	BPrH3SC25	0,99075	BPaH3C25	0,409	BPaH3SC25	1,0152
BPrH3C35	0,42398	BPrH3SC35	0,99652	BPaH3C35	0,4091	BPaH3SC35	1,0224
BPrH3C45	0,42454	BPrH3SC45	1,0003	BPaH3C45	0,40899	BPaH3SC45	1,0272

Fonte: Autor (2022)

#### 5.13.1 Influência do $f_{ck}$

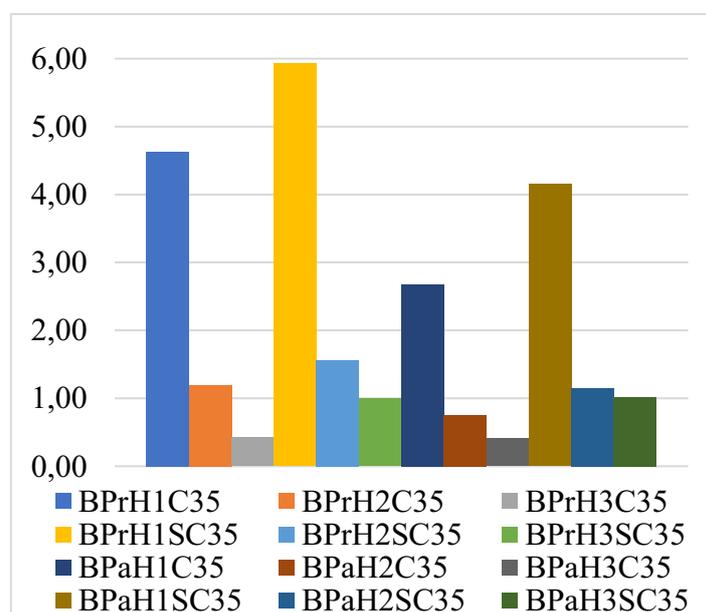
As Figuras 177 a 179 representam a influência do parâmetro  $f_{ck}$  nos valores de tensões de tração longitudinal na direção Z.

Figura 177 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa (MPa)



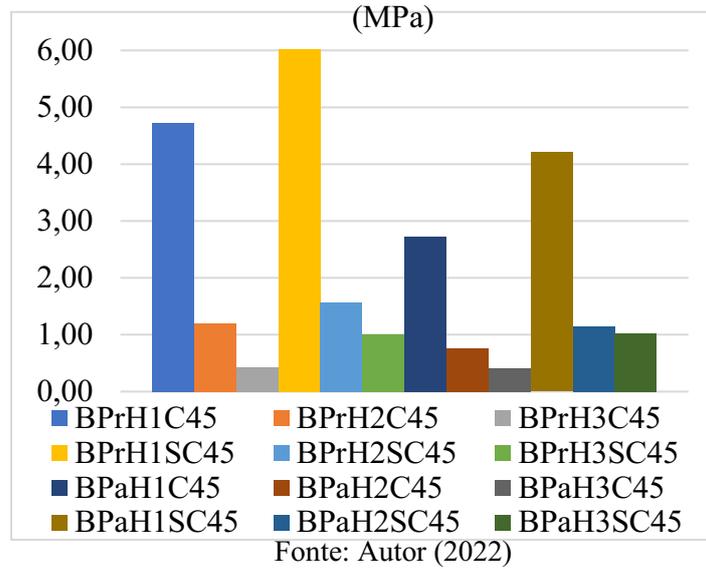
Fonte: Autor (2022)

Figura 178 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com  $f_{ck}$  de 35 MPa (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 179 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com  $f_{ck}$  de 45 MPa



As figuras demonstram que há uma pequena influência nas tensões de tração longitudinal na direção Z ao se aumentar os valores de  $f_{ck}$ . Quando ocorre um aumento nesse parâmetro, há um aumento nos valores de tensão de tração longitudinal.

5.13.2 Influência da altura

As Figuras 180 a 182 representam a influência do parâmetro altura nos valores de tensões de tração longitudinal na direção Z.

Figura 180 - Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z - Blocos com altura de 54 cm (MPa)

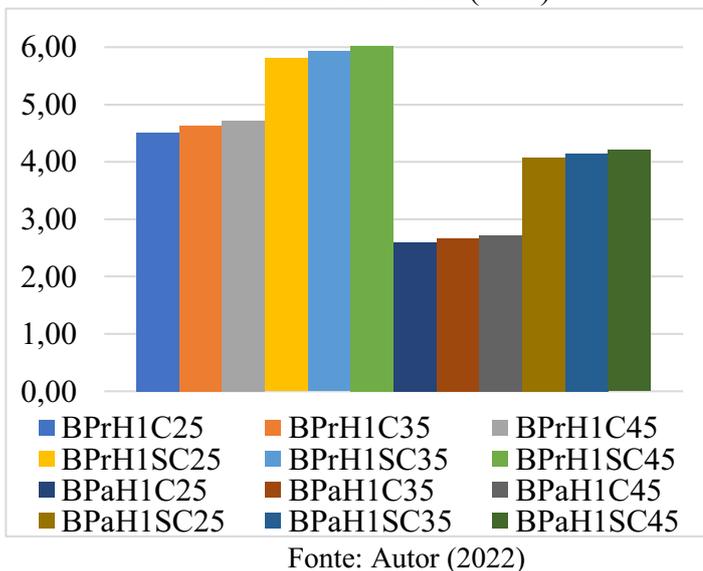


Figura 181 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com altura de 110 cm (MPa)

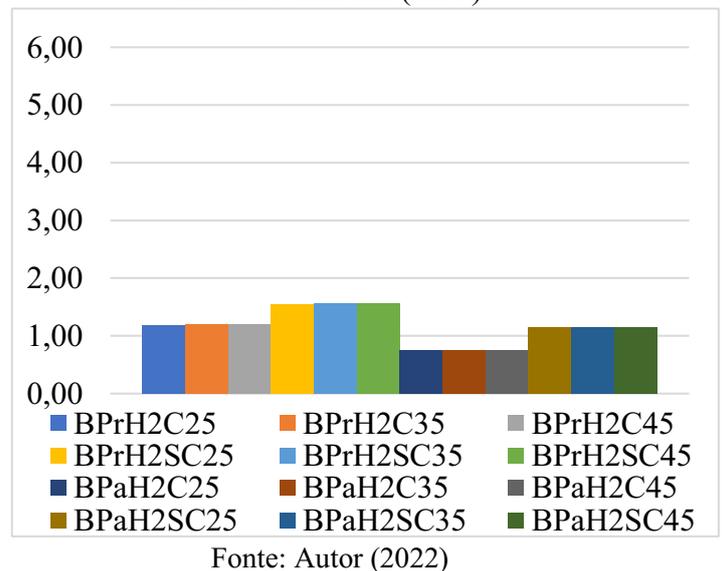
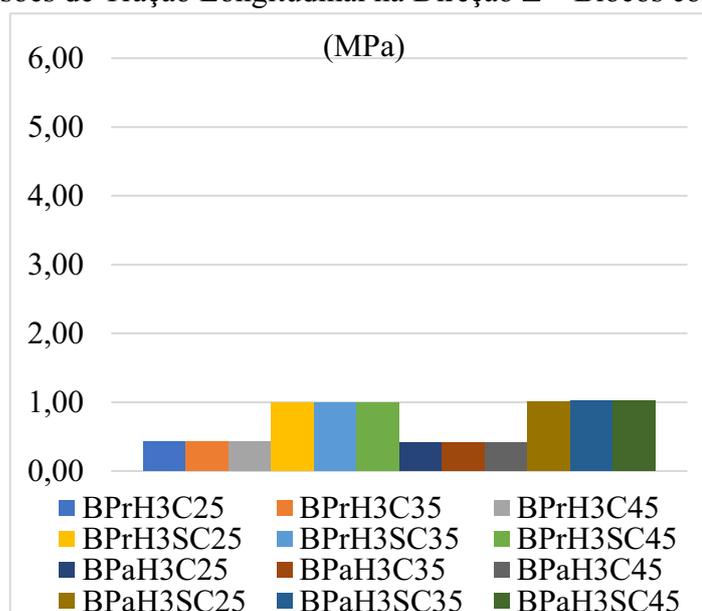


Figura 182 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com altura de 165 cm



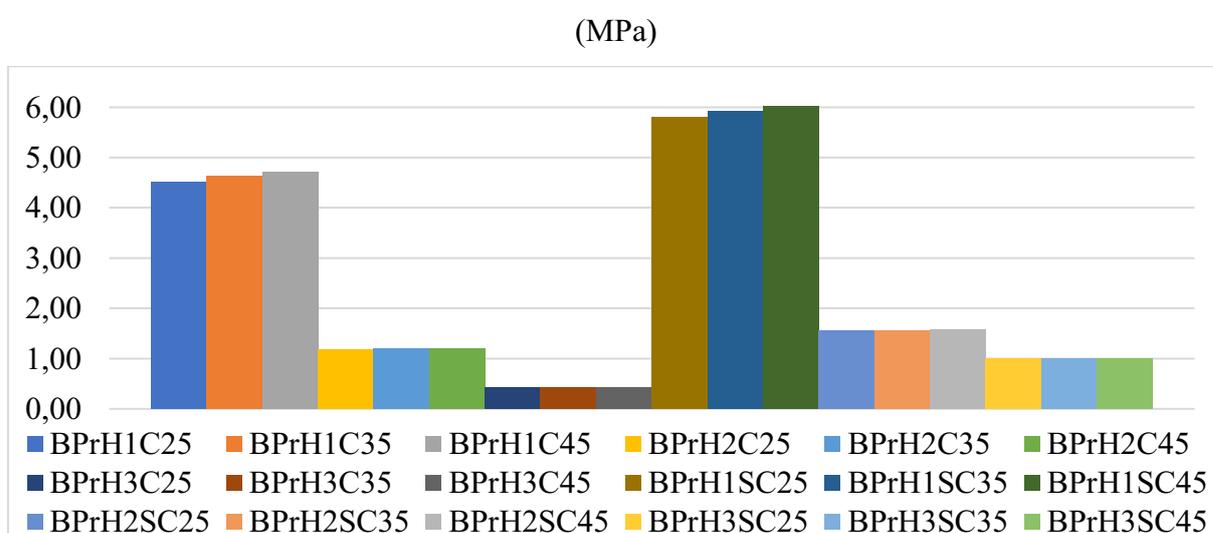
Fonte: Autor (2022)

Pode-se perceber que em todos os modelos, ao aumentar a altura do bloco, os valores de tração longitudinal diminuem, sendo que o parâmetro altura tem bastante influência nesses resultados.

### 5.13.3 Influência da geometria do pilar

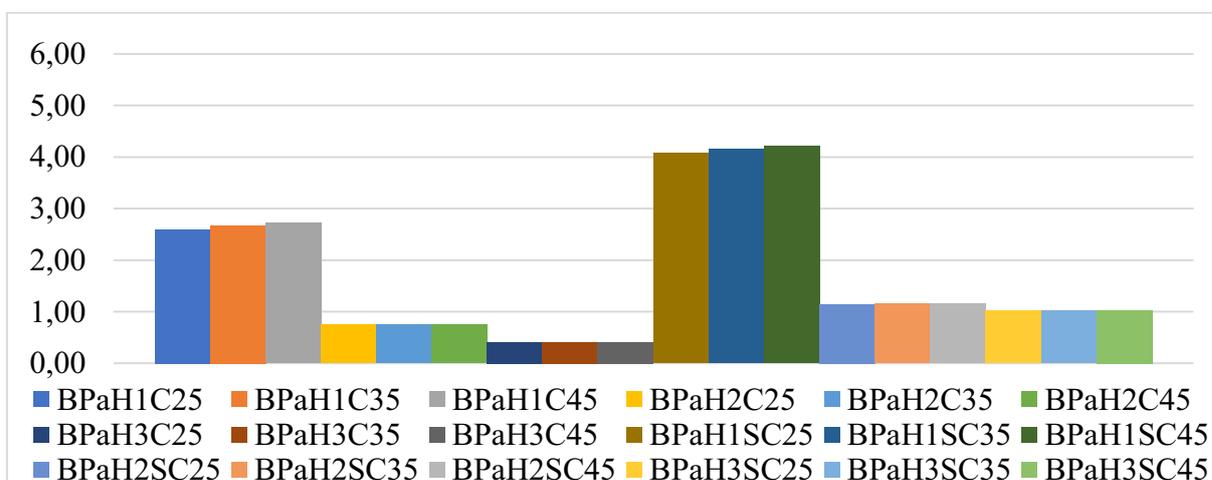
As Figuras 183 e 184 representam a influência da geometria do pilar nos valores de tensões de tração longitudinal na direção Z.

Figura 183 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com pilar retangular



Fonte: Autor (2022)

Figura 184 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com pilares associados (MPa)



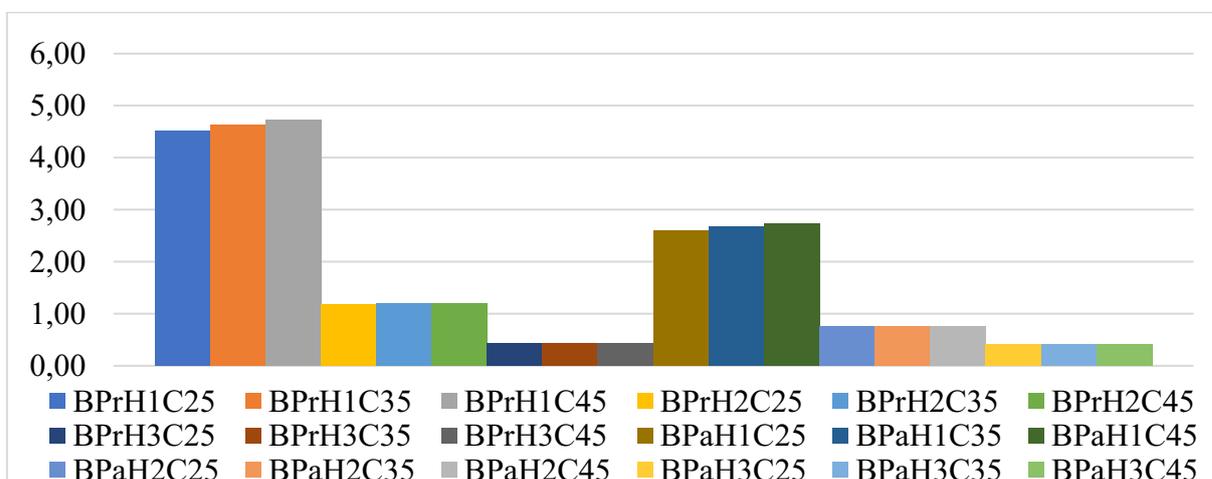
Fonte: Autor (2022)

Podemos observar que, em todos os modelos, ao alterar a geometria do pilar de pilar retangular para pilares associados, o valor das tensões de tração longitudinal diminui. Os modelos em que essa redução da tração foi menor foram os modelos com a maior altura, 165 cm.

#### 5.13.4 Influência da presença ou não do solo

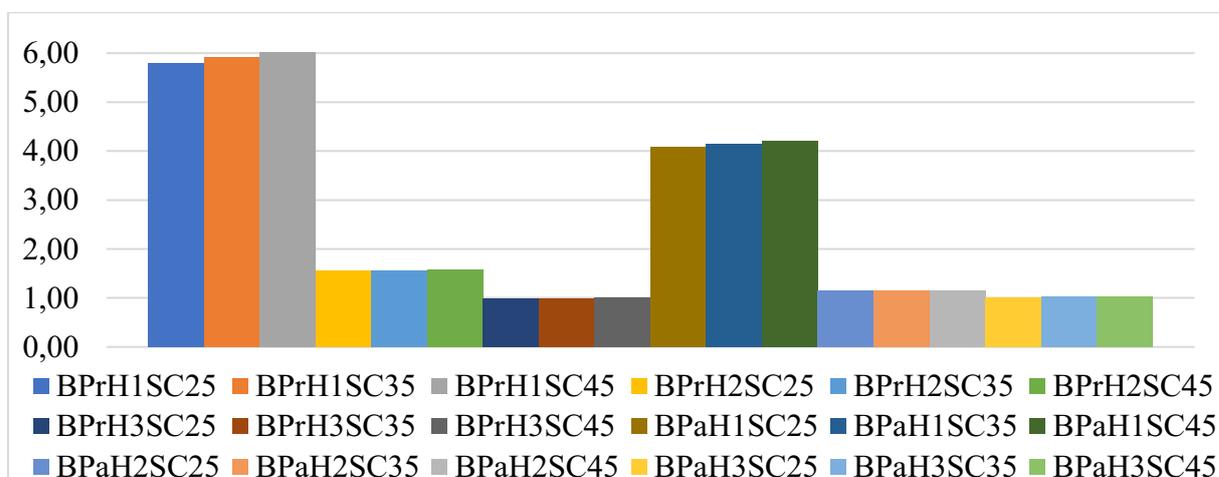
As Figuras 185 e 186 representam a influência da presença ou não do solo nos valores de tensões de tração longitudinal na direção Z.

Figura 185 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos sem presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 186 – Tensões de Tração Longitudinal na Direção Z – Blocos com presença do solo (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Observando os resultados, pode-se perceber que ao considerar o solo nos modelos, os valores das tensões de tração longitudinal são maiores do que quando não considera a presença do solo.

#### 5.14 TENSÕES DE TRAÇÃO TRANSVERSAL NA DIREÇÃO Z

A Tabela 23 apresenta os resultados das tensões de tração no corte transversal na direção Z que foi considerado nos modelos.

Tabela 24 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z (MPa)

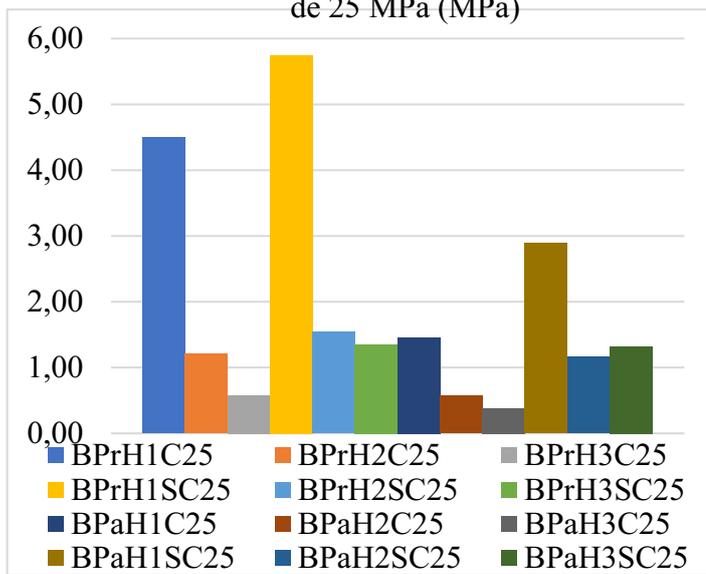
Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração	Blocos	Tração
BPrH1C25	4,4928	BPrH1SC25	5,7459	BPaH1C25	1,4563	BPaH1SC25	2,8865
BPrH1C35	4,62	BPrH1SC35	5,8846	BPaH1C35	1,5012	BPaH1SC35	2,9336
BPrH1C45	4,7154	BPrH1SC45	5,99	BPaH1C45	1,5332	BPaH1SC45	2,9679
BPrH2C25	1,2053	BPrH2SC25	1,5446	BPaH2C25	0,57494	BPaH2SC25	1,166
BPrH2C35	1,2144	BPrH2SC35	1,5578	BPaH2C35	0,57869	BPaH2SC35	1,1728
BPrH2C45	1,221	BPrH2SC45	1,5674	BPaH2C45	0,58159	BPaH2SC45	1,1777
BPrH3C25	0,58008	BPrH3SC25	1,35	BPaH3C25	0,37977	BPaH3SC25	1,3217
BPrH3C35	0,53892	BPrH3SC35	1,3561	BPaH3C35	0,38096	BPaH3SC35	1,328
BPrH3C45	0,53431	BPrH3SC45	1,3606	BPaH3C45	0,38179	BPaH3SC45	1,3325

Fonte: Autor (2022)

5.14.1 Influência do  $f_{ck}$

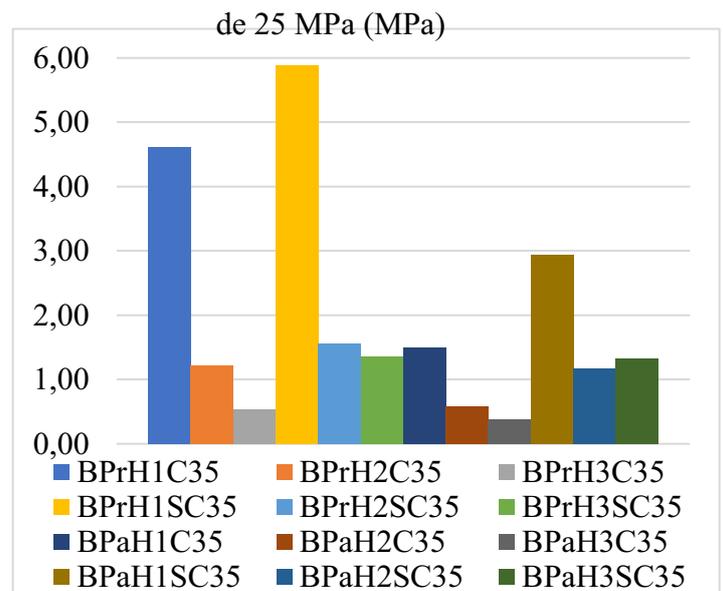
As Figuras 187 a 189 representam a influência do  $f_{ck}$  nos valores de tensões de tração transversal na direção Z.

Figura 187 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa (MPa)



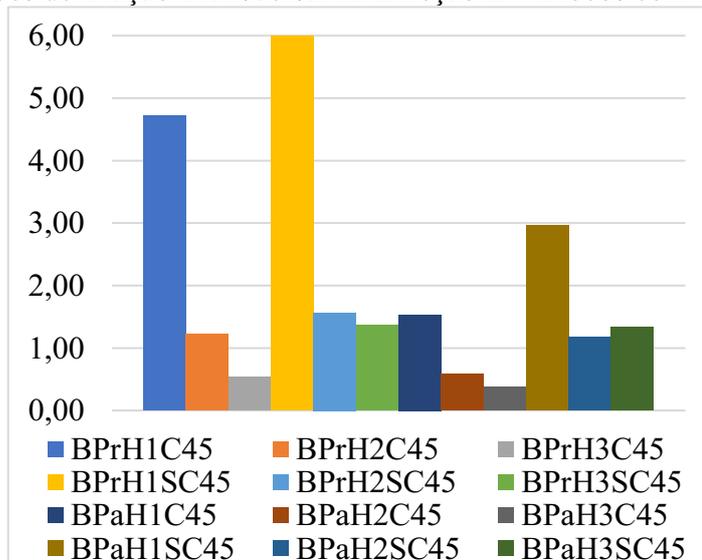
Fonte: Autor (2022)

Figura 188 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com  $f_{ck}$  de 25 MPa (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 189 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com  $f_{ck}$  de 45 MPa (MPa)



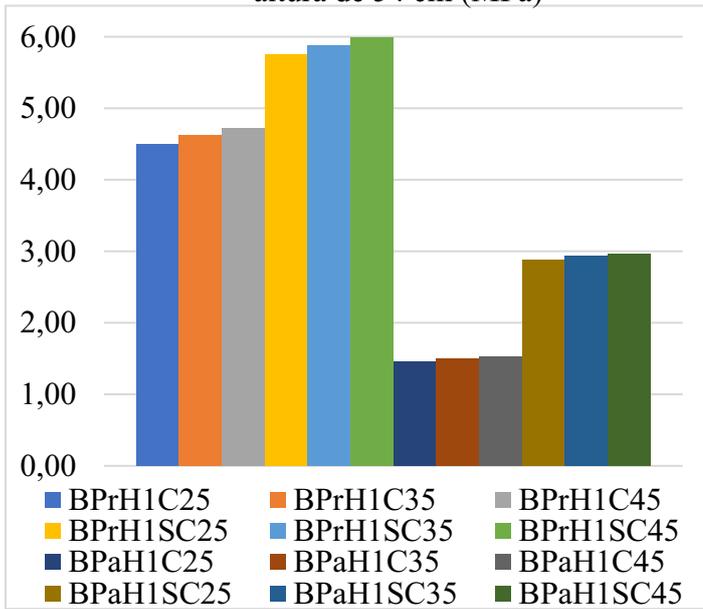
Fonte: Autor (2022)

Pode-se perceber que ao aumentar o  $f_{ck}$ , o valor das tensões de tração também aumentou, sendo assim grandezas diretamente proporcionais, mas não de uma forma muito significativa.

5.14.2 Influência da altura

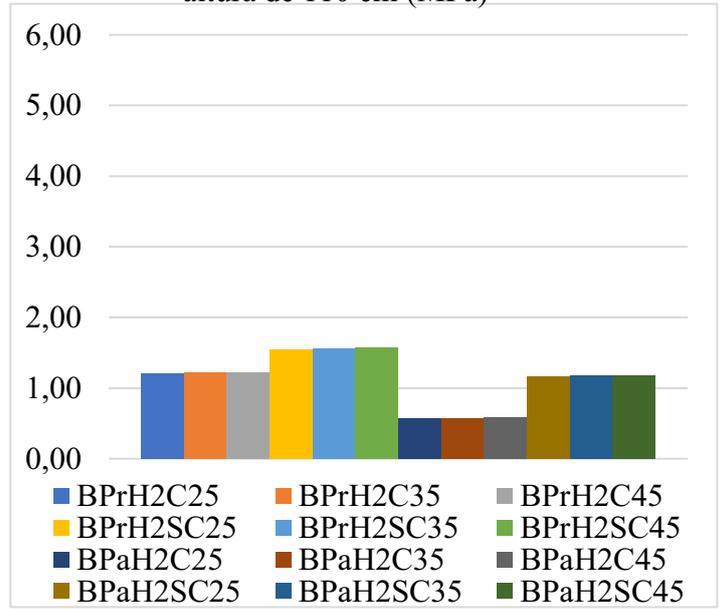
As Figuras 190 e 192 representam a influência da altura do bloco nos valores de tensões de tração transversal na direção Z.

Figura 190 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com altura de 54 cm (MPa)



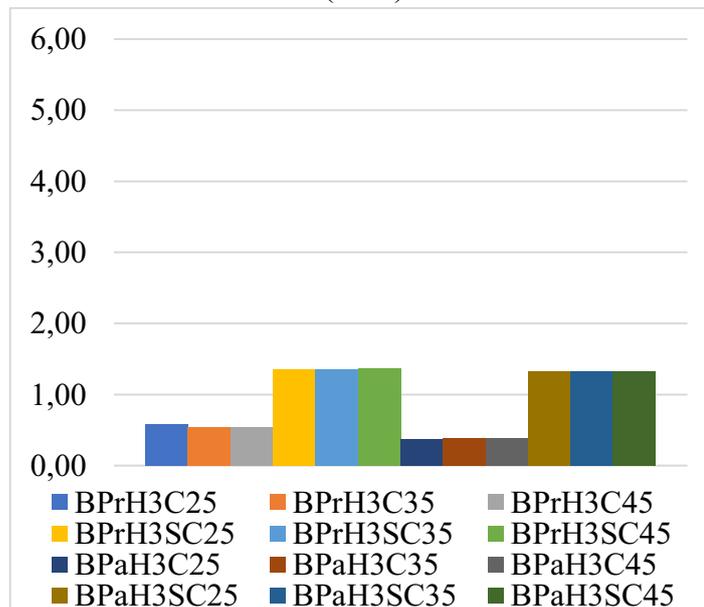
Fonte: Autor (2022)

Figura 191 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com altura de 110 cm (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 192 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com altura de 165 cm (MPa)



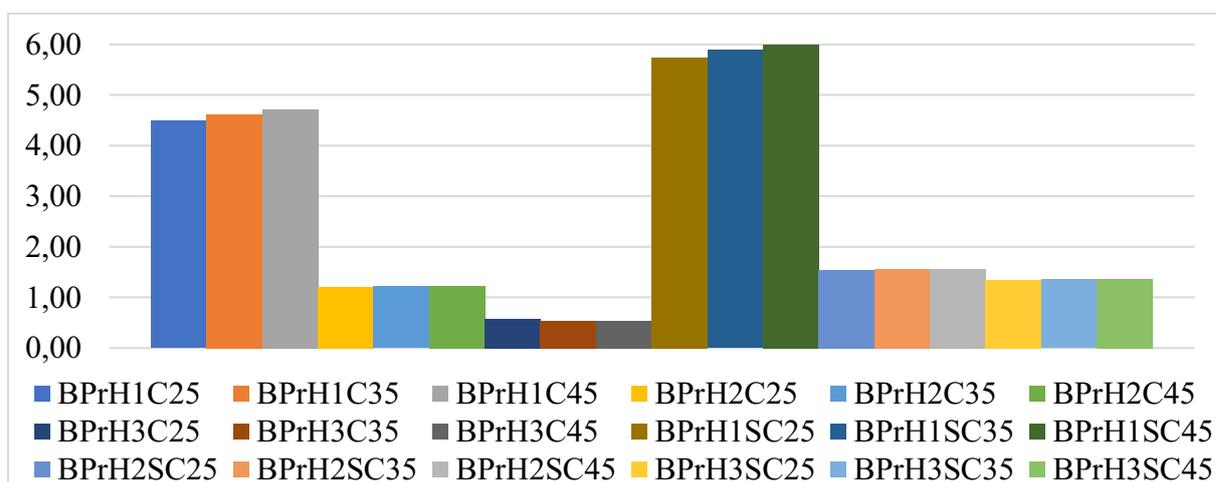
Fonte: Autor (2022)

Pode-se observar que ao aumentar a altura do bloco, o valor de tensões de tração transversal na direção Z diminuem. Portanto, são grandezas inversamente proporcionais. Exceto nos modelos com pilares associados e presença de solo, que o valor máximo de tensões se dá nos modelos com a altura média, que é de 110 cm.

#### 5.14.3 Influência da geometria do pilar

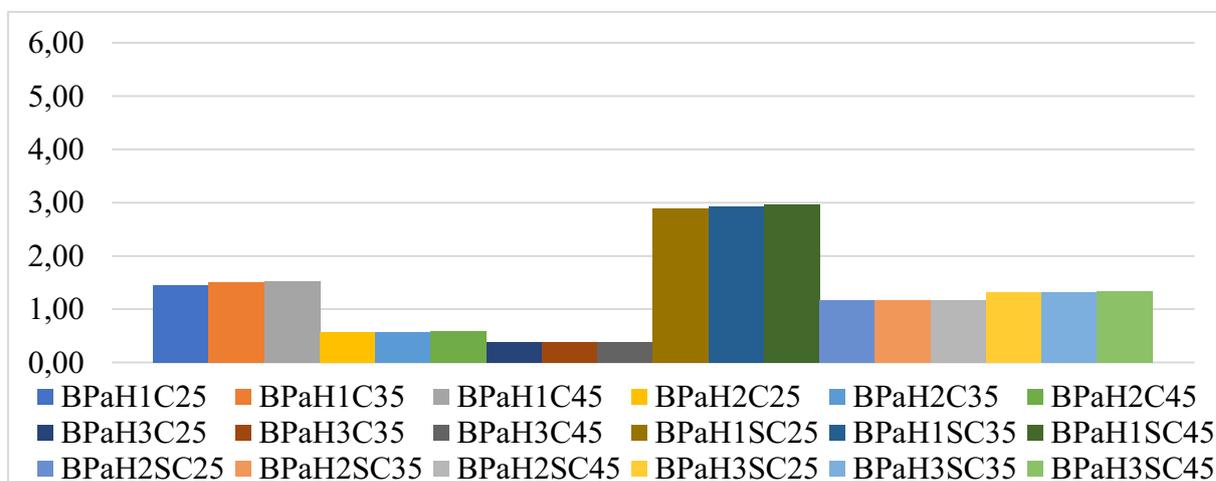
As Figuras 193 e 194 representam a influência da geometria do pilar nos valores de tensões de tração transversal na direção Z.

Figura 193 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com pilar retangular (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Figura 194 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com pilares associados (MPa)



Fonte: Autor (2022)

Observa-se que os blocos com pilares retangulares possuem resultados maiores de tensões de tração, portanto os blocos com pilares associados têm resultados menores. Os blocos com menor altura possuem maiores diferenças quando comparados os resultados dos blocos com os dois tipos de geometria do pilar.

#### 5.14.4 Influência da presença ou não do solo

As Figuras 195 e 196 representam a influência da presença ou não do solo nos valores de tensões de tração transversal na direção Z.

Figura 195 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos sem presença do solo

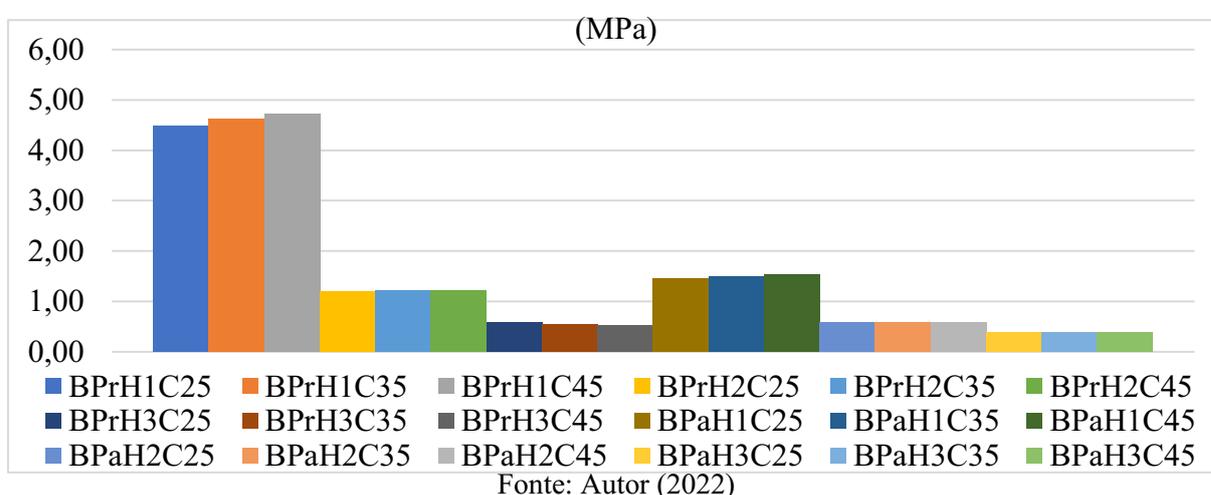
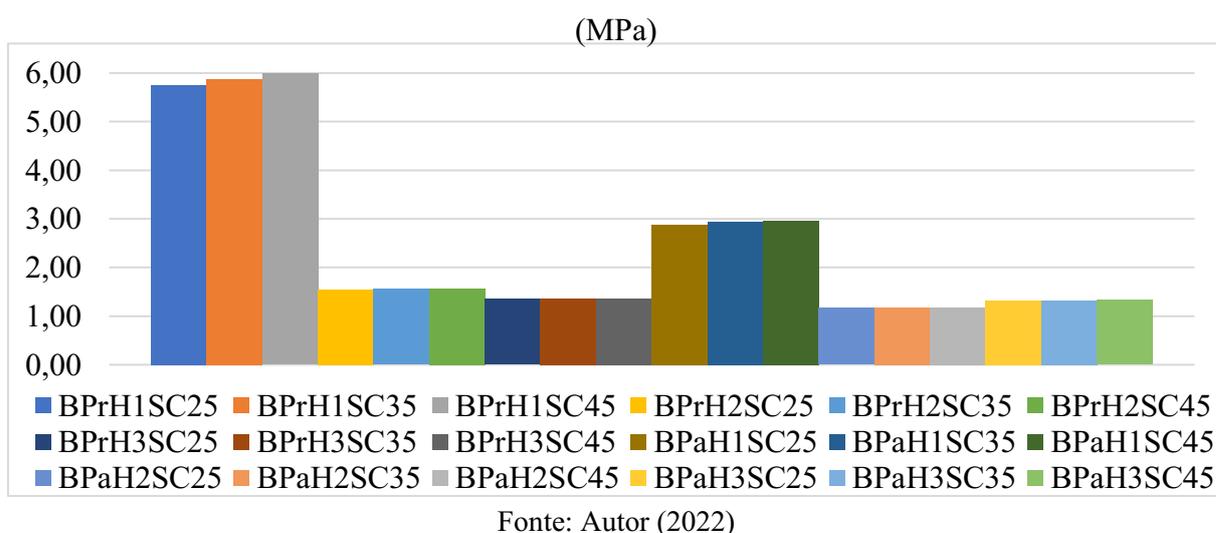


Figura 196 – Tensões de Tração Transversal na Direção Z – Blocos com presença do solo



Os blocos com a presença do solo possuem maiores valores de tensões de tração transversal na direção Z em comparação aos blocos sem a presença do solo.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÕES

Foi realizado um estudo de um caso de bloco sobre 12 estacas protendidas. Por meio do programa computacional ANSYS<sup>®</sup>, foi realizada uma análise elástico linear e foram encontrados os resultados que se desejava estudar. Realizou-se a análise dos resultados de reações das estacas, deslocamento nas estacas centrais, no pilar e na face inferior do bloco, e tensões de compressão e tração em todos os 36 modelos de blocos sobre 12 estacas.

Com essas análises, foi possível tirar as seguintes conclusões. Sobre as reações das estacas, percebe-se que ao alterar o  $f_{ck}$ , ocorre maior reações nas estacas centrais nos modelos com pilar retangular e altura mínima. Já nos outros modelos, a reação é dividida de forma mais 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 mais homogêneos 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 influenciou mais 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 muda a 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 influencia nos valores desse resultado.

A respeito do deslocamento das estacas centrais, o  $f_{ck}$  não influencia significativamente. O aumento da altura dos blocos provoca uma diminuição dos deslocamentos. Alterando a geometria do pilar, apenas nos blocos com a altura de 54 cm que houve uma variação maior nesses resultados, tendo deslocamento maiores nos modelos com pilar retangular.

O deslocamento do pilar não sofreu muitas alterações nos seus valores ao se alterar o  $f_{ck}$ . Ao aumentar a altura, o deslocamento do pilar diminuiu. Os resultados do deslocamento no pilar foram maiores nos modelos com pilar retangular. A consideração do solo influencia muito 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 é inversamente proporcional ao deslocamento, pois conforme aumenta a altura, os valores de deslocamento do bloco diminuem. Alterando a geometria do pilar, ocorre 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 do bloco, sendo o parâmetro que influencia mais nesses 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 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 dão nos modelos com pilares associados. Já nos cortes longitudinais e transversais, os maiores valores de compressão se dão nos blocos com pilares retangulares. Isso devido ao lugar em que é feito o corte, que é situado no meio do bloco, então despreza as tensões máximas em alguns lugares dos blocos com pilares associados. As tensões de compressão são maiores nos modelos com a consideração do solo, exceto no corte longitudinal em alguns modelos, que os modelos sem solo possuem valores de compressão maiores.

Sobre as tensões de tração, ao aumentar o  $f_{ck}$ , não há uma grande influência nos valores de tração. Ao aumentar a altura, os valores dessa tensão diminuem. Os blocos com pilar retangular têm valores maiores de tração que os blocos com pilares associados. E na maioria dos modelos, os blocos que têm a consideração do solo possuem 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.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a realização desse mesmo estudo, porém considerando mais variações nos parâmetros, de modo a verificar maior o comportamento dos modelos. Também é interessante realizar o estudo através da consideração de um comportamento não linear, para analisar sua deformabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEBAR, P.; KUCHMA, D.; COLLINS, M. P. Strut-and-Tie Models for the Design of Pile Caps: An Experimental Study. **ACI Structural Journal**, v.87, n. 01, p. 81-92, Jan-Feb. 1990. <https://doi.org/10.14359/2945>

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, 2014.

ANSYS User's Manual. **Theory Manual**. ANSYS revision 18. 2018.

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

BAVARESCO, D. **Análise e dimensionamento de blocos de fundação destinados ao apoio de pilares de geometria complexa**. Dissertação (mestrado), Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016.

BLÉVOT, J.; FRÉMY, R. Semelles sur pieux. **Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics**, v. 20, n. 230, p. 223-295, 1967.

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

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.

DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J. S. Deformação nas diagonais comprimidas em blocos sobre duas estacas. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**. v.1, n.2 (Junho 2008), p. 121-157. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952008000200002>

DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J. S. Análise numérica de blocos sobre duas estacas com cálice embutido, submetido à ação de força de compressão excêntrica. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**. v.6, n.3 (Junho 2013), p. 436-474. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952013000300007>

FRIAS, P. H. A. et al. 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. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n1-111>

GONÇALVES, V. F.; DELALIBERA, R. G. **Análise numérica de bloco sobre duas estacas metálicas**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 16, nº 1, p. 91–104, 2020. <https://doi.org/10.5216/reec.v16i1.54220>

GONÇALVES, V. F.; DELALIBERA, R. G.; OLIVEIRA FILHO, M. A. Analysis of the pile-to-cap connection of pile caps on two steel piles - An experimental and numerical study, **Engineering Structures**, Volume 252, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113629>

MENDONÇA, F. C. **Dimensionamento de blocos de coroamento sobre estacas metálicas**. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017.

MIGUEL, M. G. **Análises experimental e numérica de blocos sobre três estacas**. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MUNHOZ, F. S. **Análise do comportamento de blocos de concreto armado sobre estacas submetidos à ação de força centrada**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

MUNHOZ, F. S.; GIONGO, J. S. Análise dos efeitos da variação da seção de pilares quadrados e retangulares com diferentes taxas de armadura longitudinal na armadura principal de tração de blocos sobre duas estacas. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**. Volume 10, Number 3 (June 2017) p. 760 – 787. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000300011>

OLIVEIRA, D. S. **Análise do comportamento estrutural de blocos de concreto armado sobre cinco e seis estacas**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

TOMAZ, M. A. et al. **Análise das tensões nodais em blocos sobre estacas**. *Ibracon Structures and Materials Journal*, v. 11, n° 6, p. 1233–1257, 2018.

RASI, J. R. **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. <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**. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2019.

SAKAI, E. **Análise de blocos de concreto armado sobre estacas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Goiás, Goiânia, 2010.

SOUSA, G. F. **Análise numérica de blocos sobre duas estacas considerando o atrito lateral entre as estacas e solo**. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2019.