

SUBMETIDO 02/02/2022

APROVADO 10/03/2022

PUBLICADO ON-LINE 01/04/2022

PUBLICADO 10/10/2023

EDITOR ASSOCIADO
Andre Luis Christoforo

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6637>

ARTIGO ORIGINAL

Análise das tensões nodais nos ensaios de Blévoet e Frémy

RESUMO: Para o cálculo e dimensionamento de blocos sobre estacas, são frequentemente adotados modelos de bielas e tirantes tridimensionais que possuem um amplo amparo experimental. As normatizações atuais, como a NBR 6118 (ABNT, 2014) e a ACI 318 (ACI, 2019), por exemplo, apresentam limites mais conservadores de resistência, em relação às formulações propostas pelos estudos de Blévoet e Frémy (1967). Dessa forma, com o intuito de analisar o comportamento das tensões nas regiões nodais, realizou-se um estudo analítico dos blocos sobre estacas ensaiados por Blévoet e Frémy, utilizando-se os limites apresentados pelos pesquisadores franceses e os recomendados pelas principais normatizações, além de outros limites propostos por outros pesquisadores. Por meio dos resultados, observaram-se divergências nos valores em relação às normas citadas.

Palavras-chave: blocos sobre estacas; modelo de bielas e tirantes; tensões nodais.

Nodal stress analysis in Blévoet and Frémy tests

ABSTRACT: *Strut-and-tie models have been frequently used for the design of pile caps and have received large experimental support. Current norms, such as NBR 6118 (ABNT, 2014) and ACI 318 (ACI, 2019), present resistance limits different from those proposed by Blévoet and Frémy, besides having conservative values. In order to investigate stress behavior in the nodal regions, an analytical analysis of the pile caps tested by Blévoet and Frémy (1967) was carried out by comparing the limits presented by the French researchers with those recommended by the main standard codes as well as with different limits proposed by other researchers. The results showed differences in the values in relation to the norms.*

Keywords: nodal stress; pile-caps; strut-and-tie model.

 Jean Carlos Gonçalves Silva ^[1]

 Igor Vargas de Oliveira ^[2]

 Rodrigo Gustavo Delalibera ^{[3]*}

[1] jeancarlos_gs@yahoo.com.br

[2] igorvargas.ce@gmail.com

[3] delalibera@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia (UFU),
Brasil

*Autor para correspondência.

1 Introdução

Para o cálculo e dimensionamento dos blocos sobre estacas, são adotados modelos tridimensionais lineares, não lineares e modelos de biela-tirante, sendo esse último o utilizado neste trabalho, pois tem um amplo amparo experimental e é mais recomendado pela literatura. Entre os ensaios utilizados para a análise dos blocos, citam-se os realizados por Blévet e Frémy (1967).

O modelo tridimensional de bielas e tirantes considera a existência de uma treliça no interior do bloco, composta por barras tracionadas e comprimidas, unidas por meio de nós, responsáveis pela transmissão dos esforços provenientes do pilar para as estacas. Com isso, as forças atuantes nas barras comprimidas da treliça (bielas ou escoras) são resistidas pelo concreto, enquanto as forças atuantes nas barras tracionadas (tirantes) são resistidas por barras de aço, cujos modelos de dimensionamento podem ser encontrados em Carvalho e Pinheiro (2009), Fusco (1995) e IBRACON (2015).

Blévet (1957) e Blévet e Frémy (1967) estudaram o comportamento dos blocos sobre estacas por meio da análise experimental de blocos sobre diferentes quantidades de estacas. Nos estudos realizados, os autores concluíram que os resultados dos modelos propostos constituíram um modelo consistente para a análise e para o dimensionamento de blocos, e propuseram limites de segurança para o ângulo de inclinação das bielas e para as tensões nas regiões nodais.

Desde então, a análise de blocos sobre estacas é amplamente estudada, e diversos pesquisadores propõem limites distintos e a consideração ou não da taxa de armadura longitudinal dos pilares, de acordo com a maneira como o método das bielas é aplicado.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma NBR 6118 de 2014 (ABNT, 2014), embora não defina um método específico para o dimensionamento de blocos sobre estacas, sugere a adoção do método das bielas em função da sua idealização do comportamento estrutural dos blocos.

A ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014), bem como normas internacionais como ACI 318 (ACI, 2019), CEB Model Code (CEB, 2010) e CPH EHE 08 (CPH, 2008), apresentam limites para as tensões nas regiões nodais que não concordam com os limites apresentados por Blévet e Frémy (1967). Assim, o presente trabalho se justifica pelo fato de que existem divergências sobre os limites de tensões e sobre a verificação dos blocos sobre estacas.

Este trabalho, que é um complemento do trabalho realizado por Tomaz *et al.* (2018), tem por objetivo avaliar as tensões nodais obtidas pelos ensaios de Blévet e Frémy (1967), comparando-as com os limites propostos por Schlaich e Schäfer (1991) assim como com os limites normativos existentes e, também, considerando o efeito multiaxial do concreto junto à zona nodal superior, realizando uma análise comparativa entre esses limites e os resultados experimentais.

O trabalho de Tomaz *et al.* (2018) analisou as tensões nos blocos ensaiados experimentalmente por outros pesquisadores, como Adebar, Kuchma e Collins (1990), Barros (2013), Chan e Poh (2000), Cao e Bloodworth (2007), Delalibera e Giongo (2008), Fusco (1985), Mautoni (1972), Mesquita (2015) e Munhoz (2014).

No projeto estrutural de blocos sobre estacas, não há consenso em relação às tensões limites junto à zona nodal superior (interface pilar/bloco) e à zona nodal inferior (interface estaca/bloco). Dessa forma, os trabalhos de Gonçalves, Delalibera e Oliveira Filho (2022), Gonçalves, Delalibera e Giongo (2021), Delalibera e Sousa (2021), Delalibera *et al.* (2020), Sivelli *et al.* (2019), Barros, Delalibera e Giongo (2016), Mesquita *et al.* (2016),

Delalibera e Giongo (2013) e Delalibera e Giongo (2009) foram importantes para o desenvolvimento do tema.

Na seção 2, são apresentados os critérios de cálculo utilizados por Blévet e Frémy (1967) como também os resultados das tensões nodais. Na seção 3, são apresentadas as discussões e as análises dos resultados e, por fim, na seção 4, seguem as conclusões deste trabalho.

2 Resultados experimentais utilizados

Blévet e Frémy (1967) propuseram um método para o cálculo dos esforços internos nos blocos sobre as estacas e realizaram ensaios com modelos reduzidos e com modelos em tamanho real. No total, foram ensaiados 116 blocos sobre estacas, sendo 51 modelos reduzidos de blocos sobre quatro estacas, 8 blocos sobre quatro estacas em tamanho real, 37 modelos reduzidos de blocos sobre três estacas, 8 blocos sobre três estacas em tamanho real, 6 modelos reduzidos de blocos sobre duas estacas e 6 blocos sobre duas estacas em tamanho real. Detalhes das propriedades geométricas e mecânicas dos blocos ensaiados por Blévet e Frémy (1967) bem como as características dos ensaios podem ser vistas em Prado *et al.* (2020).

Os primeiros ensaios foram realizados em modelos reduzidos de blocos com o objetivo de determinar quais coeficientes de segurança conduziam a aplicação do método das bielas proposto por Blevót (1957). Os modelos apresentaram rupturas por cisalhamento no centro do bloco e/ou junto às estacas. Além disso, analisaram-se as diversas configurações de armaduras.

Após os primeiros ensaios, Blévet e Frémy (1967) avançaram para os ensaios de modelos em tamanho real, adotando as observações realizadas nos modelos reduzidos e respostas quanto à eficácia de diferentes tipos de armaduras. Os resultados dos ensaios em tamanho real confirmaram, de maneira geral, os ensaios realizados sobre os modelos reduzidos.

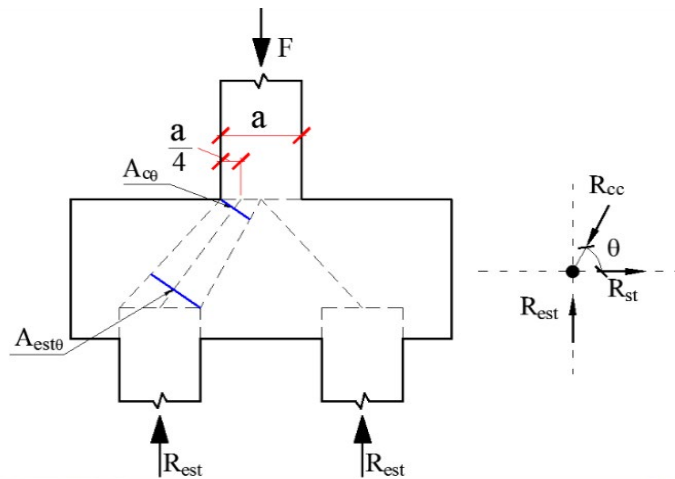
Para ambas as etapas de ensaios, foram verificadas: a altura dos blocos; a disposição das armaduras; e as propriedades das barras de aço. As características dos materiais utilizados também foram controladas, de modo que foram realizados os ensaios de corpos de prova para a determinação da resistência à compressão do concreto, assim como os ensaios de tração para as barras de aço utilizadas. Os resultados dos ensaios foram anotados, ressaltando-se os efeitos de utilização neste trabalho, as informações referentes à inclinação das bielas em relação ao plano horizontal, a carga de ruptura e os modos de ruptura.

O estudo desenvolvido teve como objetivo o cálculo das tensões e, para tal, o modelo utilizado foi o desenvolvido por Blévet e Frémy (1967). Para a utilização desse modelo, foram necessários o cálculo das forças atuantes nas bielas e as reações nas estacas, sendo realizado o equilíbrio de forças conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 ►

Equilíbrio das forças na região nodal inferior para cálculo de R_{st} (resultante da força de tração - tirante) e R_{cc} (resultante da força de compressão - biela)

Fonte: dados da pesquisa



Com o equilíbrio de forças nas direções x (horizontal) e y (vertical), as Equações 1 a 3 são obtidas, dadas por:

$$R_{est} = \frac{Q_u}{n} \quad (1)$$

$$R_{est} = R_{cc} \times \text{sen}(\theta) \quad (2)$$

$$R_{st} = R_{cc} \times \text{cos}(\theta) \quad (3)$$

onde: Q_u é a carga de ruptura; n é o número de estacas; R_{est} é a reação de Q_u em cada estaca; R_{cc} é a força resultante no concreto comprimido; R_{st} é a força resultante no aço tracionado; e θ é o ângulo de inclinação da biela em relação ao plano horizontal.

As Equações 1 a 3 foram utilizadas para determinar as tensões atuantes nas bielas e nos nós de acordo com o modelo de bielas proposto. A formulação de Blévyot e Frémy (1967) consiste na utilização dos valores da força aplicada no pilar, da área da seção transversal do pilar e da área da seção transversal da estaca, todas em relação à inclinação da biela, conforme a Figura 1.

A tensão nodal superior (Q_{zns}) pode ser calculada conforme a Equação 4, enquanto as tensões nodais inferiores – Q_{zni_j} , com $j = 2, 3, 4$ – são calculadas de acordo com as Equações 5 a 7 para os blocos sobre duas, três e quatro estacas, respectivamente.

$$Q_{zns} = \frac{Q_u}{A_c \times \text{sen}^2(\theta)} \quad (4)$$

$$Q_{zni2} = \frac{Q_u}{2 \times A_{est} \times \text{sen}^2(\theta)} \quad (5)$$

$$Q_{zni3} = \frac{Q_u}{3 \times A_{est} \times \text{sen}^2(\theta)} \quad (6)$$

$$Q_{zni4} = \frac{Q_u}{4 \times A_{est} \times \text{sen}^2(\theta)} \quad (7)$$

sendo A_c a área da seção transversal do pilar e A_{est} a área da seção transversal da estaca.

2.1 Limites utilizados para os valores das tensões

Como o objetivo do trabalho foi comparar os limites indicados pelas normas com os resultados experimentais obtidos por Blévet e Frémy (1967), consideraram-se os limites propostos pelos autores Blévet e Frémy (1967) e Schlaich e Schäfer (1991), bem como os limites estabelecidos pelas normas da ABNT – NBR 6118 (ABNT, 2014) –, da Comisión Permanente del Hormigón (CPH, 2008), da American Concrete Institute – ACI 318 (ACI, 2019) – e do Comité Euro-International du Béton (CEB, 2010).

Como os ensaios realizados foram de curta duração e como se pretendeu comparar os resultados experimentais normativos, não foram considerados os coeficientes de ponderação das ações, o coeficiente de minoração γ_c do concreto, o efeito Rüsç e o coeficiente α_{v2} .

A Tabela 1 indica os limites utilizados para a análise dos resultados de acordo com a zona nodal (superior e inferior), em função de f_c (resistência à compressão do concreto) e f_{ct} (resistência à tração do concreto).

Tabela 1 ►
Tensões nodais
limites sem
considerar γ_c ,
o efeito Rüsç e α_{v2} .
*Fonte: elaborada
pelos autores*

Zona nodal inferior			
Limite	Bloco sobre quatro estacas	Bloco sobre três estacas	Bloco sobre duas estacas
Blévet e Frémy (1967)	–	f_c	–
Schlaich e Schäfer (1991)	–	$0,8f_c$	–
NBR 6118 (ABNT, 2014)	$0,706f_c$	–	$0,847f_c$
CPH (2008)	$0,824f_c$	–	$0,824f_c$
ACI 318 (ACI, 2019)	$0,6f_c$	–	$0,8f_c$
CEB (2010)	–	$0,882f_c$	–
Zona nodal superior			
Limite	Bloco sobre quatro estacas	Bloco sobre três estacas	Bloco sobre duas estacas
Blévet e Frémy (1967)	$2,1 f_c$	$1,75f_c$	$1,4f_c$
Schlaich e Schäfer (1991)	–	$1,1f_c$	–
NBR 61118 (ABNT, 2014)	–	f_c	–
CPH (2008)	–	$3,882f_c$	–
ACI 318 (ACI, 2019)	–	f_c	–
CEB (2010)	–	$1,176f_c$	–
Estado triplo de tensão	–	$f_c + 4f_{ct}$	–

Segundo Tomaz *et al.* (2018), a região nodal superior (interface pilar/bloco) está submetida ao estado triplo de tensões. Assim, foi proposto que o limite de tensão para a zona nodal superior seja igual à resistência no estado triplo de tensões, de acordo com as indicações da ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014). Dessa forma, o limite considerado no estado triplo de tensões, ou seja, $\sigma_3 \geq \sigma_2 \geq \sigma_1$, é dado pela Equação 8:

$$\sigma_3 = f_c + 4 \times \sigma_1 \quad (8)$$

sendo que $\sigma_1 \geq -f_{ct}$. Caso as tensões de tração sejam consideradas negativas, não existindo dados experimentais, os valores de f_{ct} podem ser calculados por meio de $f_{ct} = 0,21 \times f_c^{2/3}$ sendo f_c a resistência à tração do concreto, descrita na ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014).

2 Resultados e discussões

Os blocos ensaiados por Blévet e Frémy (1967) apresentaram informações referentes à carga de ruptura e ao ângulo de inclinação das bielas. Com isso, utilizando-se as Equações 1 a 3, as forças de reação em cada estaca foram determinadas nas bielas e nos tirantes. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 ►
Forças e tensões atuantes para os ensaios de Blévet e Frémy (1967) para blocos sobre duas estacas.
Fonte: dados da pesquisa

Modelo reduzido						
Número de identificação do bloco	R_{est} (kgf)	R_{cc} (kgf)	R_{st} (kgf)	σ_{zni} (kgf/cm²)	σ_{zns} (kgf/cm²)	
5,a	19250,00	26733,63	18550,59	189,42	330,01	
5,b	16875,00	24510,47	17776,32	181,64	316,45	
5 bis,a	12375,00	20379,19	16191,68	171,23	298,32	
5 bis,b	9625,00	17982,68	15190,00	171,42	298,65	
5 bis,c	13750,00	21848,97	16979,84	177,13	308,61	
5 bis,d	10000,00	17772,70	14692,48	161,16	280,77	
Tamanho real						
2N1	105000,00	151153,44	108730,68	177,63	355,26	
2N1 bis	162500,00	233927,94	168273,68	274,90	549,80	
2N2	150000,00	185410,20	108981,38	187,09	374,17	
2N2 bis	260000,00	324280,24	193798,03	330,17	660,33	
2N3	225000,00	259807,62	129903,81	244,90	489,80	
2N3 bis	300000,00	346410,16	173205,08	326,53	653,06	

Tabela 3 ►

Forças e tensões atuantes para os ensaios de Blévoit e Frémy (1967) para blocos sobre três estacas.

Fonte: dados da pesquisa

Número de identificação do bloco	Modelo reduzido				
	R_{est} (kgf)	R_{cc} (kgf)	R_{st} (kgf)	σ_{zni} (kgf/cm ²)	σ_{zns} (kgf/cm ²)
4,1	19083,33	29087,83	21952,86	226,21	591,16
4,2	19000,00	30861,12	24318,89	255,75	668,36
4,3	18916,67	28833,79	21761,14	224,23	586,00
6,1	38000,00	46338,52	26519,03	288,30	753,42
6,2	37333,33	46418,79	27584,90	294,47	769,54
6,3	39333,33	49691,93	30367,37	320,30	837,05
6,3 bis	31916,67	40192,43	24428,63	258,23	674,85
7N1	13000,00	27690,71	24449,44	300,93	786,44
7N2	14916,67	29833,33	25836,42	304,42	795,56
7N3	19833,33	30855,19	23636,45	244,91	640,03
7N4	21583,33	32898,46	24828,78	255,84	668,61
7N5	30000,00	37416,95	22361,31	238,10	622,23
7N6	35000,00	43653,11	26088,20	277,78	725,94
8,1	19383,33	25567,15	16672,30	172,06	449,65
8,2	14666,67	19433,52	12749,54	131,38	343,33
8,3	15000,00	20184,49	13506,06	138,58	362,15
8 bis,1	25000,00	32975,69	21503,39	221,92	579,94
8 bis,2	18083,33	23960,65	15719,60	161,98	423,31
8 bis,3	22750,00	30613,14	20484,19	210,17	549,25
13,a	25000,00	35988,91	25888,26	264,33	690,77
13,b	17833,33	25220,14	17833,33	181,97	475,56
13,c	23083,33	32644,76	23083,33	235,54	615,56
13,d	21333,33	30169,89	21333,33	217,69	568,89
13,e	22250,00	31466,25	22250,00	227,04	593,33
13,f	16666,67	23570,23	16666,67	170,07	444,44
13,g	21000,00	29193,44	20279,46	207,06	541,12
13,h	15033,33	21524,92	15405,23	157,24	410,93
14,a	35583,33	43762,51	25475,16	274,60	717,62
14,b	30083,33	37569,82	22505,21	239,38	625,59
14,c	26666,67	32837,34	19161,94	206,31	539,15
14,d	26750,00	33064,82	19435,01	208,52	544,94
14,e	30083,33	37609,14	22570,79	239,89	626,90
14,f	28333,33	35324,45	21095,95	224,70	587,21
14,g	28416,67	35058,37	20532,47	220,68	576,70
14,h	27250,00	33480,25	19451,59	209,87	548,47
Tamanho real					
3N1	140000,00	227397,69	179191,83	301,51	547,19
3N1 bis	166666,67	254042,18	191728,07	316,10	573,67
3N2	126666,67	205740,77	162125,94	272,80	495,08
3N2 bis	150000,00	228637,96	172555,26	284,49	516,30
3N3	206666,67	265930,31	167355,37	279,34	506,95
3N3 bis	226666,67	283817,42	170805,58	290,10	526,49
3N4	173333,33	223038,32	140362,57	234,28	425,18
3N4 bis	240000,00	283002,82	149968,64	272,42	494,39

Tabela 4 ►

Forças e tensões atuantes para os ensaios de Blévo e Frémy (1967) para blocos sobre quatro estacas.

Fonte: dados da pesquisa

Número de identificação do bloco	Modelo reduzido				
	R _{est} (kgf)	R _{cc} (kgf)	R _{st} (kgf)	σ _{zni} (kgf/cm ²)	σ _{zns} (kgf/cm ²)
1,1	11850,00	16628,35	11665,31	119,05	414,82
1,2	15550,00	21124,93	14298,96	146,42	510,20
1,3	13812,50	18870,86	12857,85	131,54	458,34
1,4	6387,50	8658,10	5844,87	59,88	208,64
1,4	12525,00	17341,80	11994,27	122,51	426,86
2,1	14300,00	19108,01	12673,84	130,27	453,91
2,2	18125,00	24252,86	16114,77	165,57	576,93
2,3	15450,00	20955,48	14157,32	145,01	505,29
2,4	15575,00	20782,79	13760,22	141,49	493,01
3,1	11875,00	20058,68	16165,85	172,87	602,35
3,2	13500,00	23247,69	18926,30	204,25	711,71
3,3	12750,00	22118,82	18074,28	195,78	682,17
3,4	10875,00	20453,48	17322,80	196,27	683,88
1 A,1	28750,00	38036,47	24904,03	256,75	894,62
1 A,2	22500,00	29767,67	19490,11	200,93	700,14
1 A,2A	29437,50	38946,04	25499,56	262,89	916,02
1 A,3	29625,00	39194,10	25661,98	264,56	921,85
1 A,4	28937,50	38284,54	25066,45	258,42	900,46
3 A,1	20375,00	34664,02	28043,78	300,89	1048,43
3 A,2	22500,00	38279,29	30968,59	332,27	1157,77
3 A,3	16625,00	28149,07	22715,18	243,17	847,31
3 A,3 bis	21062,50	35662,54	28778,26	308,08	1073,48
3 A,4	21125,00	35940,00	29076,07	311,96	1087,02
Q,1	10200,00	17673,20	14432,67	156,23	544,39
Q,2	11250,00	14983,95	9897,29	101,82	354,80
Q,2 bis	12750,00	16981,81	11216,93	115,40	402,10
G,1	6250,00	15737,21	14442,90	202,17	704,45
G,2	7250,00	17686,25	16131,98	220,13	767,03
G,3	16250,00	25688,85	19896,09	207,20	721,96
G,4	46275,00	81616,43	67229,95	734,43	2559,09
G,5	21062,50	28729,30	19538,26	199,93	696,65
9 A,1	30000,00	65743,11	58499,20	735,06	2561,28
9 A,2	47500,00	103740,35	92226,95	1155,97	4027,91
9 A,3	42500,00	93041,09	82767,11	1039,21	3621,08
10, 1 a	21250,00	28999,14	19732,90	201,91	703,54
10, 1 b	20000,00	27126,83	18326,62	187,72	654,10
10, 2 a	18750,00	25171,36	16793,90	172,41	600,74
10, 2 b	20000,00	26912,65	18008,08	184,77	643,81
10, 3 a	19000,00	25832,55	17502,02	179,19	624,39
10, 3 b	18500,00	24754,65	16448,18	169,00	588,87
11, 1 a	14062,50	21193,32	15855,69	162,96	567,82
11, 1 b	12312,50	18249,15	13469,74	138,00	480,86
11, 2 a	13937,50	21443,01	16295,67	168,32	586,49
11, 2 b	14625,00	22132,66	16612,17	170,89	595,46

12, 1 a	21000,00	25636,27	14704,36	159,67	556,38
12, 2 b	17312,50	21119,19	12095,34	131,44	458,01
12, 2 a	18750,00	23045,48	13398,95	144,52	503,56
12, 2 b	16000,00	19503,83	11153,45	121,30	422,67
Tamanho real					
4N1	175000,00	246841,99	174086,09	284,23	557,08
4N1 bis	167500,00	235772,34	165928,74	270,92	531,00
4N2	164500,00	231549,55	162956,88	266,06	521,49
4N2 bis	184750,00	263399,13	187740,61	306,55	600,85
4N3	162500,00	200861,05	118063,16	202,68	397,24
4N3 bis	225000,00	277658,30	162693,36	279,71	548,22
4N4	188250,00	234244,00	139399,39	237,94	466,36
4N4 bis	218750,00	270287,09	158756,25	272,63	534,35

Tabela 5 ▼

Tensões limites consideradas para os ensaios de Blévet e Frémy (1967) para blocos sobre duas estacas nos modelos em escala reduzida (em kgf/cm²).

Fonte: dados da pesquisa

Com base nas forças encontradas e nas propriedades geométricas dos blocos, aplicou-se o método de bielas de Blévet e Frémy (1967) para o cálculo das tensões nodais. Tais tensões foram posteriormente comparadas com as tensões limites, apresentadas na Tabela 1. Os valores para essas tensões atuantes encontram-se nas Tabelas 2, 3 e 4.

Nota-se, assim como foi apresentado por Tomaz *et al.* (2018), que, quando desconsiderados os coeficientes de ponderações aplicados pelas normatizações, diversos limites tornaram-se iguais, verificando-se que uma das razões pelas quais os limites propostos por cada norma divergiram entre si vem da adoção de diferentes coeficientes de segurança. As tensões limites para os blocos ensaiados são apresentadas nas Tabelas 5 a 10.

Número de identificação do bloco	Limites zona nodal inferior						
	Blévet e Frémy (1967)	Schlaich e Schäfer (1991)	NBR 6118 (ABNT, 2014)	CPH (2008)	ACI 318 (ACI, 2019)	CEB (2010)	
5,a	376,00	300,80	318,47	309,82	300,80	331,63	
5,b	364,00	291,20	308,31	299,94	291,20	321,05	
5 bis,a	237,00	189,60	200,74	195,29	189,60	209,03	
5 bis,b	248,00	198,40	210,06	204,35	198,40	218,74	
5 bis,c	238,00	190,40	201,59	196,11	190,40	209,92	
5 bis,d	238,00	190,40	201,59	196,11	190,40	209,92	
Número de identificação do bloco	Limites zona nodal superior						
	Blévet e Frémy (1967)	Schlaich e Schäfer (1991)	NBR 6118 (ABNT, 2014)	CPH (2008)	ACI 318 (ACI, 2019)	CEB (2010)	Estado triplo de tensões
5,a	526,40	413,60	376,00	1459,63	376,00	442,18	438,51
5,b	509,60	400,40	364,00	1413,05	364,00	428,06	425,18
5 bis,a	331,80	260,70	237,00	920,03	237,00	278,71	282,96
5 bis,b	347,20	272,80	248,00	962,74	248,00	291,65	295,37
5 bis,c	333,20	261,80	238,00	923,92	238,00	279,89	284,09
5 bis,d	333,20	261,80	238,00	923,92	238,00	279,89	284,09

Tabela 6 ▼

Tensões limites consideradas para os ensaios de Blévyot e Frémy (1967) para blocos sobre duas estacas nos modelos em tamanho real (em kgf/cm²).

Fonte: dados da pesquisa

Número de identificação do bloco	Limites zona nodal inferior						
	Blévyot e Frémy (1967)	Schlaich e Schäfer (1991)	NBR 6118 (ABNT, 2014)	CPH (2008)	ACI 318 (ACI, 2019)	CEB (2010)	
2N1	235,50	188,40	199,47	194,05	188,40	207,71	
2N1 bis	440,00	352,00	372,68	362,56	352,00	388,08	
2N2	278,00	222,40	235,47	229,07	222,40	245,20	
2N2 bis	455,00	364,00	385,39	374,92	364,00	401,31	
2N3	327,00	261,60	276,97	269,45	261,60	288,41	
2N3 bis	470,00	376,00	398,09	387,28	376,00	414,54	
Número de identificação do bloco	Limites zona nodal superior						
	Blévyot e Frémy (1967)	Schlaich e Schäfer (1991)	NBR 6118 (ABNT, 2014)	CPH (2008)	ACI 318 (ACI, 2019)	CEB (2010)	Estado triplo de tensões
2N1	329,70	259,05	235,50	914,21	235,50	276,95	281,26
2N1 bis	616,00	484,00	440,00	1708,08	440,00	517,44	509,42
2N2	389,20	305,80	278,00	1079,20	278,00	326,93	329,11
2N2 bis	637,00	500,50	455,00	1766,31	455,00	535,08	525,99
2N3	457,80	359,70	327,00	1269,41	327,00	384,55	383,96
2N3 bis	658,00	517,00	470,00	1824,54	470,00	552,72	542,54

Tabela 7 ▼

Tensões limites consideradas para os ensaios de Blévoet e Frémy (1967) para blocos sobre três estacas nos modelos em escala reduzida (em kgf/cm²).

Fonte: dados da pesquisa

Número de identificação do bloco	Limites zona nodal inferior					
	Blévoet e Frémy (1967)	Schlaich e Schäfer (1991)	NBR 6118 (ABNT, 2014)	CPH (2008)	ACI 318 (ACI, 2019)	CEB (2010)
4,1	347,00	277,60	244,98	285,93	208,20	306,05
4,2	356,00	284,80	251,34	293,34	213,60	313,99
4,3	371,00	296,80	261,93	305,70	222,60	327,22
6,1	374,00	299,20	264,04	308,18	224,40	329,87
6,2	325,00	260,00	229,45	267,80	195,00	286,65
6,3	364,00	291,20	256,98	299,94	218,40	321,05
6,3 bis	250,00	200,00	176,50	206,00	150,00	220,50
7N1	283,00	226,40	199,80	233,19	169,80	249,61
7N2	235,00	188,00	165,91	193,64	141,00	207,27
7N3	220,00	176,00	155,32	181,28	132,00	194,04
7N4	177,00	141,60	124,96	145,85	106,20	156,11
7N5	238,00	190,40	168,03	196,11	142,80	209,92
7N6	238,00	190,40	168,03	196,11	142,80	209,92
8,1	232,00	185,60	163,79	191,17	139,20	204,62
8,2	232,00	185,60	163,79	191,17	139,20	204,62
8,3	275,00	220,00	194,15	226,60	165,00	242,55
8 bis,1	295,00	236,00	208,27	243,08	177,00	260,19
8 bis,2	291,00	232,80	205,45	239,78	174,60	256,66
8 bis,3	295,00	236,00	208,27	243,08	177,00	260,19
13,a	407,00	325,60	287,34	335,37	244,20	358,97
13,b	388,00	310,40	273,93	319,71	232,80	342,22
13,c	398,00	318,40	280,99	327,95	238,80	351,04
13,d	396,00	316,80	279,58	326,30	237,60	349,27
13,e	330,00	264,00	232,98	271,92	198,00	291,06
13,f	333,00	266,40	235,10	274,39	199,80	293,71
13,g	371,00	296,80	261,93	305,70	222,60	327,22
13,h	234,00	187,20	165,20	192,82	140,40	206,39
14,a	318,00	254,40	224,51	262,03	190,80	280,48
14,b	323,50	258,80	228,39	266,56	194,10	285,33
14,c	334,50	267,60	236,16	275,63	200,70	295,03
14,d	344,00	275,20	242,86	283,46	206,40	303,41
14,e	290,00	232,00	204,74	238,96	174,00	255,78

14,f	277,00	221,60	195,56	228,25	166,20	244,31
14,g	270,00	216,00	190,62	222,48	162,00	238,14
14,h	288,50	230,80	203,68	237,72	173,10	254,46

Limites zona nodal superior

Número de identificação do bloco	Limites zona nodal superior						Estado triplo de tensões
	Blévoet e Frémy (1967)	Schlaich e Schäfer (1991)	NBR 6118 (ABNT, 2014)	CPH (2008)	ACI 318 (ACI, 2019)	CEB (2010)	
4,1	607,25	381,70	347,00	1347,05	347,00	408,07	406,26
4,2	623,00	391,60	356,00	1381,99	356,00	418,66	416,28
4,3	649,25	408,10	371,00	1440,22	371,00	436,30	432,96
6,1	654,50	411,40	374,00	1451,87	374,00	439,82	436,29
6,2	568,75	357,50	325,00	1261,65	325,00	382,20	381,72
6,3	637,00	400,40	364,00	1413,05	364,00	428,06	425,18
6,3 bis	437,50	275,00	250,00	970,50	250,00	294,00	297,62
7N1	495,25	311,30	283,00	1098,61	283,00	332,81	334,73
7N2	411,25	258,50	235,00	912,27	235,00	276,36	280,70
7N3	385,00	242,00	220,00	854,04	220,00	258,72	263,73
7N4	309,75	194,70	177,00	687,11	177,00	208,15	214,83
7N5	416,50	261,80	238,00	923,92	238,00	279,89	284,09
7N6	416,50	261,80	238,00	923,92	238,00	279,89	284,09
8,1	406,00	255,20	232,00	900,62	232,00	272,83	277,31
8,2	406,00	255,20	232,00	900,62	232,00	272,83	277,31
8,3	481,25	302,50	275,00	1067,55	275,00	323,40	325,75
8 bis,1	516,25	324,50	295,00	1145,19	295,00	346,92	348,18
8 bis,2	509,25	320,10	291,00	1129,66	291,00	342,22	343,70
8 bis,3	516,25	324,50	295,00	1145,19	295,00	346,92	348,18
13,a	712,25	447,70	407,00	1579,97	407,00	478,63	472,90
13,b	679,00	426,80	388,00	1506,22	388,00	456,29	451,84
13,c	696,50	437,80	398,00	1545,04	398,00	468,05	462,93
13,d	693,00	435,60	396,00	1537,27	396,00	465,70	460,71
13,e	577,50	363,00	330,00	1281,06	330,00	388,08	387,30
13,f	582,75	366,30	333,00	1292,71	333,00	391,61	390,65
13,g	649,25	408,10	371,00	1440,22	371,00	436,30	432,96
13,h	409,50	257,40	234,00	908,39	234,00	275,18	279,57
14,a	556,50	349,80	318,00	1234,48	318,00	373,97	373,91
14,b	566,13	355,85	323,50	1255,83	323,50	380,44	380,05
14,c	585,38	367,95	334,50	1298,53	334,50	393,37	392,32
14,d	602,00	378,40	344,00	1335,41	344,00	404,54	402,91
14,e	507,50	319,00	290,00	1125,78	290,00	341,04	342,58
14,f	484,75	304,70	277,00	1075,31	277,00	325,75	327,99
14,g	472,50	297,00	270,00	1048,14	270,00	317,52	320,13
14,h	504,88	317,35	288,50	1119,96	288,50	339,28	340,89

Tabela 8 ▼

Tensões limites consideradas para os ensaios de Blévet e Frémy (1967) para blocos sobre três estacas nos modelos em tamanho real (em kgf/cm²).

Fonte: dados da pesquisa

Número de identificação do bloco	Limites zona nodal inferior					
	Blévet e Frémy (1967)	Schlaich e Schäfer (1991)	NBR 6118 (ABNT, 2014)	CPH (2008)	ACI 318 (ACI, 2019)	CEB (2010)
3N1	453,50	362,80	320,17	373,68	272,10	399,99
3N1 bis	453,50	362,80	320,17	373,68	272,10	399,99
3N2	376,50	301,20	265,81	310,24	225,90	332,07
3N2 bis	437,00	349,60	308,52	360,09	262,20	385,43
3N3	463,00	370,40	326,88	381,51	277,80	408,37
3N3 bis	409,00	327,20	288,75	337,02	245,40	360,74
3N4	326,50	261,20	230,51	269,04	195,90	287,97
3N4 bis	424,50	339,60	299,70	349,79	254,70	374,41

Número de identificação do bloco	Limites zona nodal superior						
	Blévet e Frémy (1967)	Schlaich e Schäfer (1991)	NBR 6118 (ABNT, 2014)	CPH (2008)	ACI 318 (ACI, 2019)	CEB (2010)	Estado triplo de tensões
3N1	793,63	498,85	453,50	1760,49	453,50	533,32	524,33
3N1 bis	793,63	498,85	453,50	1760,49	453,50	533,32	524,33
3N2	658,88	414,15	376,50	1461,57	376,50	442,76	439,07
3N2 bis	764,75	480,70	437,00	1696,43	437,00	513,91	506,10
3N3	810,25	509,30	463,00	1797,37	463,00	544,49	534,82
3N3 bis	715,75	449,90	409,00	1587,74	409,00	480,98	475,12
3N4	571,38	359,15	326,50	1267,47	326,50	383,96	383,40
3N4 bis	742,88	466,95	424,50	1647,91	424,50	499,21	492,28

Tabela 9 ▼

Tensões limites consideradas para os ensaios de Blévet e Frémy (1967) para blocos sobre quatro estacas nos modelos em escala reduzida (em kgf/cm²).

Fonte: dados da pesquisa

Número de identificação do bloco	Limites zona nodal inferior					
	Blévet e Frémy (1967)	Schlaich e Schäfer (1991)	NBR 6118 (ABNT, 2014)	CPH (2008)	ACI 318 (ACI, 2019)	CEB (2010)
1,1	291,00	232,80	205,45	239,78	174,60	256,66
1,2	278,50	222,80	196,62	229,48	167,10	245,64
1,3	313,00	250,40	220,98	257,91	187,80	276,07
1,4	318,50	254,80	224,86	262,44	191,10	280,92
1,4	291,00	232,80	205,45	239,78	174,60	256,66
2,1	326,00	260,80	230,16	268,62	195,60	287,53
2,2	328,20	262,56	231,71	270,44	196,92	289,47
2,3	380,50	304,40	268,63	313,53	228,30	335,60
2,4	373,30	298,64	263,55	307,60	223,98	329,25
3,1	321,00	256,80	226,63	264,50	192,60	283,12
3,2	372,00	297,60	262,63	306,53	223,20	328,10
3,3	309,00	247,20	218,15	254,62	185,40	272,54
3,4	325,50	260,40	229,80	268,21	195,30	287,09
1 A,1	266,00	212,80	187,80	219,18	159,60	234,61
1 A,2	368,00	294,40	259,81	303,23	220,80	324,58
1 A,2A	332,50	266,00	234,75	273,98	199,50	293,27
1 A,3	366,00	292,80	258,40	301,58	219,60	322,81
1 A,4	329,00	263,20	232,27	271,10	197,40	290,18
3 A,1	291,50	233,20	205,80	240,20	174,90	257,10
3 A,2	392,00	313,60	276,75	323,01	235,20	345,74
3 A,3	320,00	256,00	225,92	263,68	192,00	282,24
3 A,3 bis	461,00	368,80	325,47	379,86	276,60	406,60
3 A,4	324,00	259,20	228,74	266,98	194,40	285,77
Q,1	339,00	271,20	239,33	279,34	203,40	299,00
Q,2	307,50	246,00	217,10	253,38	184,50	271,22
Q,2 bis	210,00	168,00	148,26	173,04	126,00	185,22
G,1	131,50	105,20	92,84	108,36	78,90	115,98
G,2	131,50	105,20	92,84	108,36	78,90	115,98
G,3	220,50	176,40	155,67	181,69	132,30	194,48
G,4	306,00	244,80	216,04	252,14	183,60	269,89
G,5	184,00	147,20	129,90	151,62	110,40	162,29
9 A,1	272,70	218,16	192,53	224,70	163,62	240,52
9 A,2	408,10	326,48	288,12	336,27	244,86	359,94

9 A,3	344,00	275,20	242,86	283,46	206,40	303,41	
10, 1 a	346,00	276,80	244,28	285,10	207,60	305,17	
10, 1 b	431,10	344,88	304,36	355,23	258,66	380,23	
10, 2 a	339,30	271,44	239,55	279,58	203,58	299,26	
10, 2 b	314,30	251,44	221,90	258,98	188,58	277,21	
10, 3 a	283,80	227,04	200,36	233,85	170,28	250,31	
10, 3 b	333,80	267,04	235,66	275,05	200,28	294,41	
11, 1 a	268,80	215,04	189,77	221,49	161,28	237,08	
11, 1 b	194,80	155,84	137,53	160,52	116,88	171,81	
11, 2 a	308,60	246,88	217,87	254,29	185,16	272,19	
11, 2 b	300,00	240,00	211,80	247,20	180,00	264,60	
12, 1 a	207,80	166,24	146,71	171,23	124,68	183,28	
12, 2 b	218,80	175,04	154,47	180,29	131,28	192,98	
12, 2 a	324,30	259,44	228,96	267,22	194,58	286,03	
12, 2 b	261,00	208,80	184,27	215,06	156,60	230,20	
Número de identificação do bloco	Limites zona nodal superior						Estado triplo de tensões
	Blévo e Frémy (1967)	Schlaich e Schäfer (1991)	NBR 6118 (ABNT, 2014)	CPH (2008)	ACI 318 (ACI, 2019)	CEB (2010)	
1,1	611,10	320,10	291,00	1129,66	291,00	342,22	343,70
1,2	584,85	306,35	278,50	1081,14	278,50	327,52	329,68
1,3	657,30	344,30	313,00	1215,07	313,00	368,09	368,32
1,4	668,85	350,35	318,50	1236,42	318,50	374,56	374,47
1,4	611,10	320,10	291,00	1129,66	291,00	342,22	343,70
2,1	684,60	358,60	326,00	1265,53	326,00	383,38	382,84
2,2	689,22	361,02	328,20	1274,07	328,20	385,96	385,30
2,3	799,05	418,55	380,50	1477,10	380,50	447,47	443,51
2,4	783,93	410,63	373,30	1449,15	373,30	439,00	435,51
3,1	674,10	353,10	321,00	1246,12	321,00	377,50	377,26
3,2	781,20	409,20	372,00	1444,10	372,00	437,47	434,07
3,3	648,90	339,90	309,00	1199,54	309,00	363,38	363,85
3,4	683,55	358,05	325,50	1263,59	325,50	382,79	382,28
1 A,1	558,60	292,60	266,00	1032,61	266,00	312,82	315,63
1 A,2	772,80	404,80	368,00	1428,58	368,00	432,77	429,62
1 A,2A	698,25	365,75	332,50	1290,77	332,50	391,02	390,09
1 A,3	768,60	402,60	366,00	1420,81	366,00	430,42	427,40
1 A,4	690,90	361,90	329,00	1277,18	329,00	386,90	386,19
3 A,1	612,15	320,65	291,50	1131,60	291,50	342,80	344,26
3 A,2	823,20	431,20	392,00	1521,74	392,00	460,99	456,27
3 A,3	672,00	352,00	320,00	1242,24	320,00	376,32	376,14
3 A,3 bis	968,10	507,10	461,00	1789,60	461,00	542,14	532,61
3 A,4	680,40	356,40	324,00	1257,77	324,00	381,02	380,61
Q,1	711,90	372,90	339,00	1316,00	339,00	398,66	397,34
Q,2	645,75	338,25	307,50	1193,72	307,50	361,62	362,17
Q,2 bis	441,00	231,00	210,00	815,22	210,00	246,96	252,40
G,1	276,15	144,65	131,50	510,48	131,50	154,64	162,53
G,2	276,15	144,65	131,50	510,48	131,50	154,64	162,53

G,3	463,05	242,55	220,50	855,98	220,50	259,31	264,30
G,4	642,60	336,60	306,00	1187,89	306,00	359,86	360,49
G,5	386,40	202,40	184,00	714,29	184,00	216,38	222,82
9 A,1	572,67	299,97	272,70	1058,62	272,70	320,70	323,16
9 A,2	857,01	448,91	408,10	1584,24	408,10	479,93	474,12
9 A,3	722,40	378,40	344,00	1335,41	344,00	404,54	402,91
10, 1 a	726,60	380,60	346,00	1343,17	346,00	406,90	405,14
10, 1 b	905,31	474,21	431,10	1673,53	431,10	506,97	499,58
10, 2 a	712,53	373,23	339,30	1317,16	339,30	399,02	397,68
10, 2 b	660,03	345,73	314,30	1220,11	314,30	369,62	369,77
10, 3 a	595,98	312,18	283,80	1101,71	283,80	333,75	335,62
10, 3 b	700,98	367,18	333,80	1295,81	333,80	392,55	391,54
11, 1 a	564,48	295,68	268,80	1043,48	268,80	316,11	318,78
11, 1 b	409,08	214,28	194,80	756,21	194,80	229,08	235,12
11, 2 a	648,06	339,46	308,60	1197,99	308,60	362,91	363,40
11, 2 b	630,00	330,00	300,00	1164,60	300,00	352,80	353,78
12, 1 a	436,38	228,58	207,80	806,68	207,80	244,37	249,90
12, 2 b	459,48	240,68	218,80	849,38	218,80	257,31	262,37
12, 2 a	681,03	356,73	324,30	1258,93	324,30	381,38	380,94
12, 2 b	548,10	287,10	261,00	1013,20	261,00	306,94	310,01

Tabela 10 ▼

Tensões limites consideradas para os ensaios de Blévet e Frémy (1967) para blocos sobre quatro estacas nos modelos em tamanho real (em kgf/cm²).

Fonte: dados da pesquisa

Número de identificação do bloco	Limites zona nodal inferior					
	Blévet e Frémy (1967)	Schlaich e Schäfer (1991)	NBR 6118 (ABNT, 2014)	CPH (2008)	ACI 318 (ACI, 2019)	CEB (2010)
4N1	372,50	298,00	262,99	306,94	223,50	328,55
4N1 bis	408,00	326,40	288,05	336,19	244,80	359,86
4N2	371,00	296,80	261,93	305,70	222,60	327,22
4N2 bis	341,50	273,20	241,10	281,40	204,90	301,20
4N3	341,50	273,20	241,10	281,40	204,90	301,20
4N3 bis	393,00	314,40	277,46	323,83	235,80	346,63
4N4	353,50	282,80	249,57	291,28	212,10	311,79
4N4 bis	423,00	338,40	298,64	348,55	253,80	373,09

Número de identificação do bloco	Limites zona nodal superior						
	Blévo e Frémy (1967)	Schlaich e Schäfer (1991)	NBR 6118 (ABNT, 2014)	CPH (2008)	ACI 318 (ACI, 2019)	CEB (2010)	Estado triplo de tensões
4N1	782,25	409,75	372,50	1446,05	372,50	438,06	434,62
4N1 bis	856,80	448,80	408,00	1583,86	408,00	479,81	474,01
4N2	779,10	408,10	371,00	1440,22	371,00	436,30	432,96
4N2 bis	717,15	375,65	341,50	1325,70	341,50	401,60	400,13
4N3	717,15	375,65	341,50	1325,70	341,50	401,60	400,13
4N3 bis	825,30	432,30	393,00	1525,63	393,00	462,17	457,38
4N4	742,35	388,85	353,50	1372,29	353,50	415,72	413,49
4N4 bis	888,30	465,30	423,00	1642,09	423,00	497,45	490,62

Para a análise das correlações entre as tensões atuantes e os limites apresentados, a razão entre a tensão atuante e a tensão limite foi analisada. Conhecendo-se o valor da tensão de ruptura de cada bloco, constatou-se que, quanto mais próximo de 1 for essa razão, mais próximo da ruptura real será o limite adotado. Essas relações são ilustradas nas Figuras 2 a 7.

Figura 2 ►
Relação entre a tensão atuante e a tensão limite na zona nodal inferior para os blocos sobre duas estacas ensaiados por Blévo e Frémy (1967).
(a) Modelo em escala reduzida. (b) Blocos em tamanho real.
Fonte: dados da pesquisa

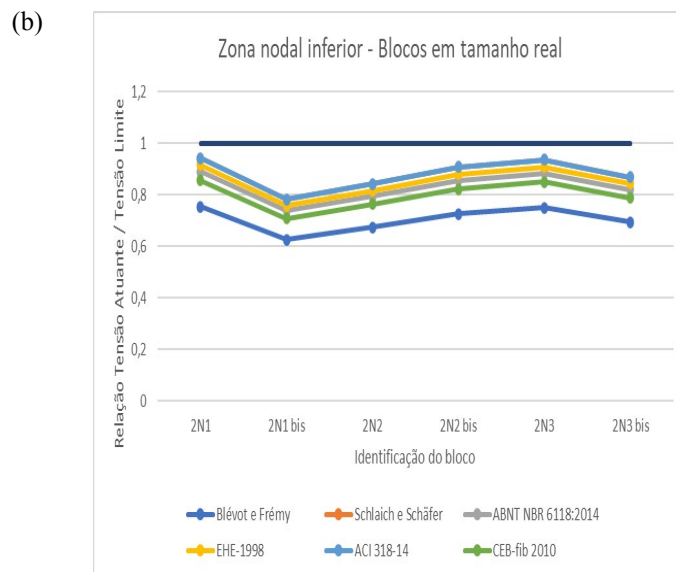
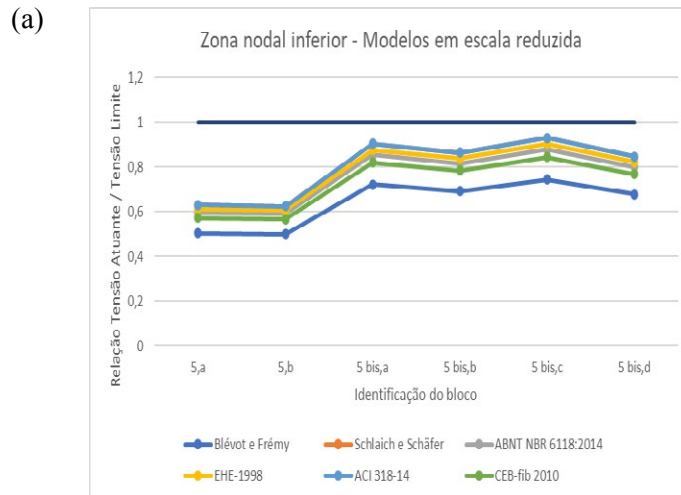


Figura 3 ►

Relação entre a tensão atuante e a tensão limite na zona nodal inferior para os blocos sobre três estacas ensaiados por Blévet e Frémy (1967).

(a) Modelo em escala reduzida. (b) Blocos em tamanho real.

Fonte: dados da pesquisa

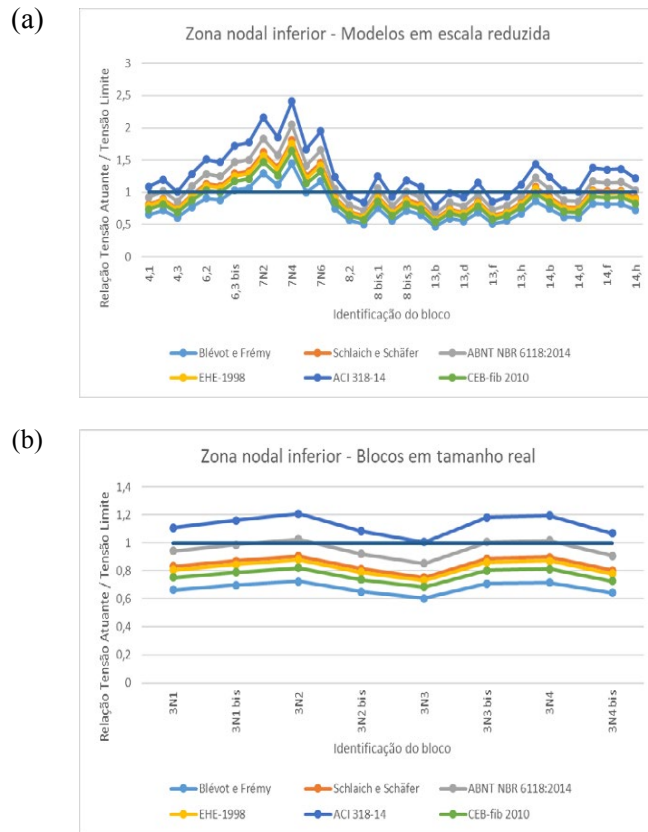


Figura 4 ►

Relação entre a tensão atuante e a tensão limite na zona nodal inferior para os blocos sobre quatro estacas ensaiados por Blévet e Frémy (1967).

(a) Modelo em escala reduzida. (b) Blocos em tamanho real.

Fonte: dados da pesquisa

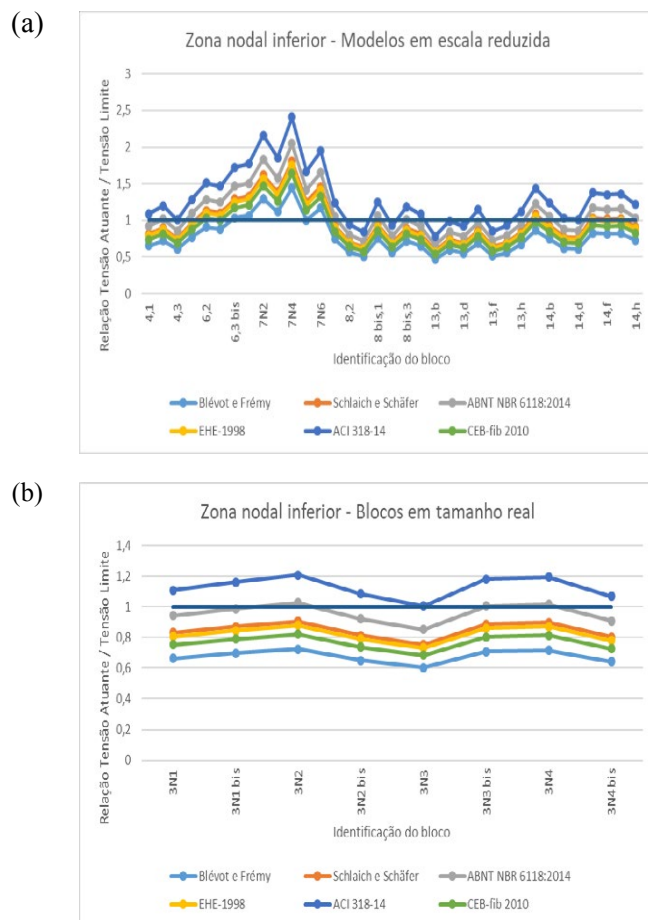


Figura 5 ►

Relação entre a tensão atuante e a tensão limite na zona nodal superior para os blocos sobre duas estacas ensaiados por Blévet e Frémy (1967).

(a) Modelo em escala reduzida. (b) Blocos em tamanho real.
 Fonte: dados da pesquisa

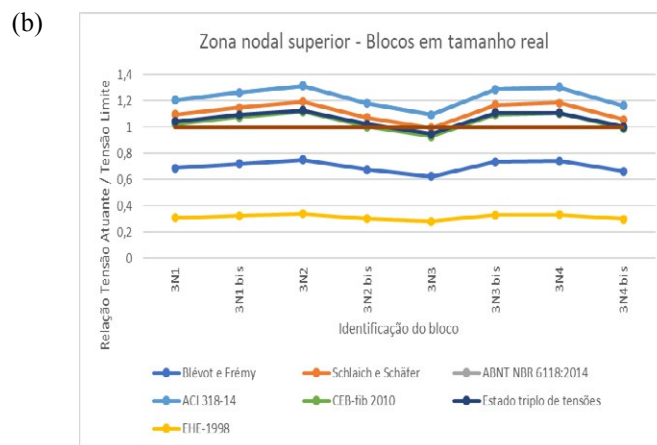
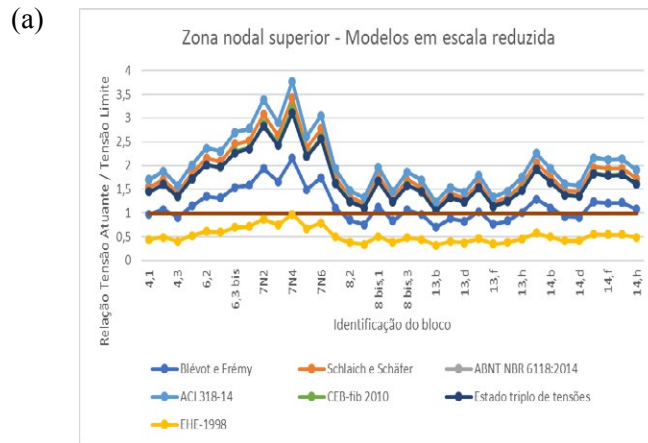


Figura 6 ►

Relação entre a tensão atuante e a tensão limite na zona nodal superior para os blocos sobre três estacas ensaiados por Blévet e Frémy (1967).

(a) Modelo em escala reduzida. (b) Blocos em tamanho real.
 Fonte: dados da pesquisa

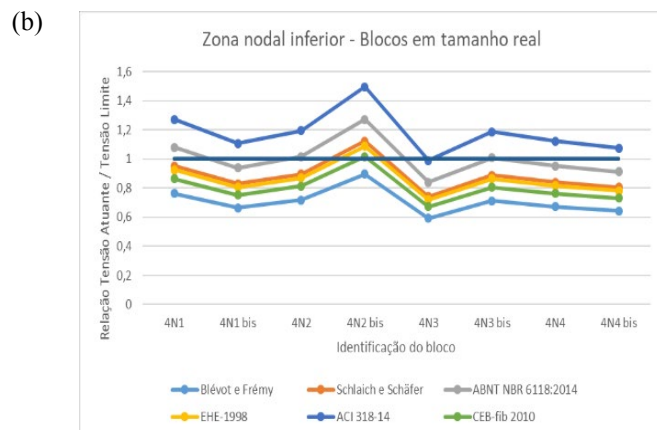
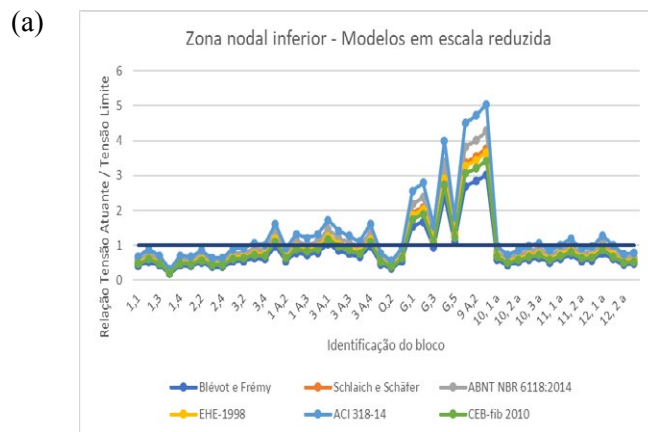
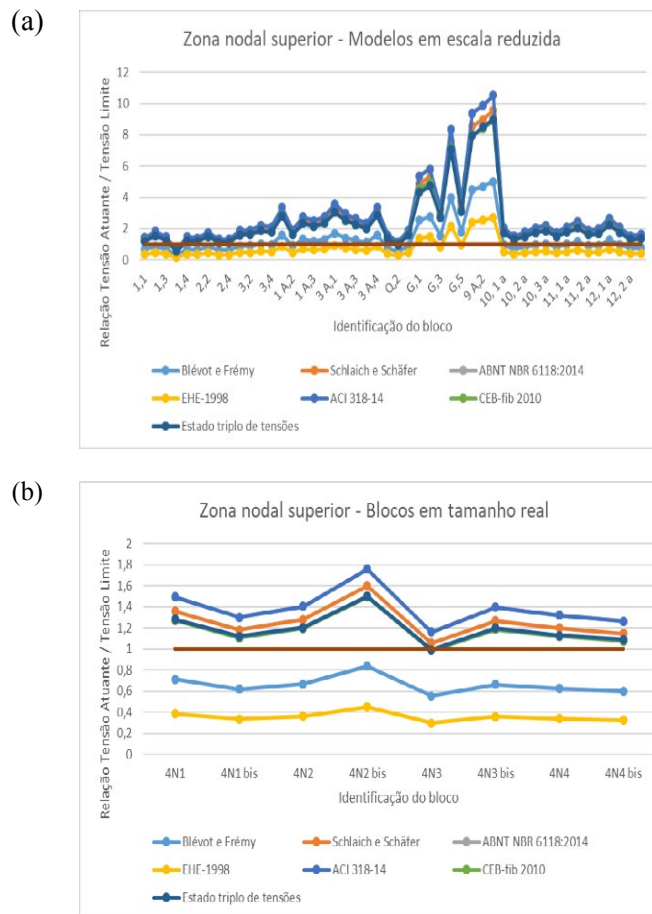


Figura 7 ►

Relação entre a tensão atuante e a tensão limite na zona nodal superior para os blocos sobre quatro estacas ensaiados por Blévoet e Frémy (1967).

(a) Modelo em escala reduzida. (b) Blocos em tamanho real.

Fonte: dados da pesquisa



A análise dos gráficos aponta a discrepância entre os limites adotados. Percebe-se que, entre os modelos em escala reduzida e em tamanho real, há diferenças significativas.

Para os blocos sobre duas estacas, segundo as observações de Blévoet e Frémy (1967), os ensaios de modelos em escala reduzida apresentaram, predominantemente, rupturas por fissuras inclinadas na parte superior (tração diagonal da biela) e após o esmagamento das bielas. Diante disso, analisando-se os gráficos, nota-se que todos os limites para as zonas nodais inferiores ficaram acima das tensões atuantes nos blocos, apresentando valores de limites próximos entre si, sendo os limites propostos pela norma ACI 318 (ACI, 2019) os mais próximos das tensões atuantes.

Quanto à zona nodal superior, os limites propostos pela norma EHE 08 (CPH, 2008) são discrepantes do comportamento experimental, apresentando valores 50% maiores do que as tensões atuantes nos blocos no momento da ruptura, fato que pode ser ampliado para os demais modelos e blocos. Já os limites propostos pela ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) e pela ACI 318 (ACI, 2019) apresentaram valores iguais devido às considerações realizadas quanto aos coeficientes, fato que também pode ser expandido para os demais modelos. O estado triplo de tensões e o limite proposto pelo CEB (CEB, 2010) apresentaram os valores de limites muito próximos ao comportamento das tensões atuantes no bloco.

Nos blocos sobre duas estacas em tamanho real, praticamente todas as rupturas foram na zona nodal superior (interface pilar/bloco), apresentando, assim como nos ensaios em escala reduzida, valores limites nas zonas nodais inferiores (interface estaca/bloco) maiores que as tensões atuantes nos blocos, sendo que os valores propostos pela norma ACI 318 (ACI, 2019) foram os mais próximos das tensões atuantes. Com relação à zona

nodal superior, nota-se que os limites propostos por Blévet e Frémy (1967) apresentaram valores mais próximos aos valores das tensões atuantes nos blocos.

Para os blocos sobre três estacas, os ensaios com modelos em escala reduzida apresentaram, em geral, rupturas por fissuras inclinadas (tração diagonal) ou na face inferior do bloco. Entre os limites utilizados, os propostos pela norma ACI 318 (ACI, 2019) apresentaram os menores valores de limites junto à zona nodal inferior. Para essa mesma zona, os limites da norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) apresentaram valores mais próximos das tensões atuantes. Na zona nodal superior, observou-se que os limites propostos por Blévet e Frémy (1967) apresentaram os valores que mais se aproximaram às tensões atuantes nos blocos.

Nos blocos sobre três estacas em tamanho real, a maioria das rupturas ocorreu por fissuras inclinadas, apresentando-se fissuras na face inferior e nas faces laterais, de acordo com Blévet e Frémy (1967). Na zona nodal inferior, assim como no modelo em escala reduzida, os limites propostos pela norma ABNT NBR 6118 (2014) apresentaram valores mais próximos das tensões atuantes. Já para a zona nodal superior, percebeu-se que o estado triplo de tensões e o limite proposto pelo CEB (2010) apresentaram os valores limites muito próximos entre si e próximos dos valores das tensões atuantes nos blocos.

Com relação aos blocos sobre quatro estacas nos modelos em escala reduzida, Blévet e Frémy (1967) observaram que a maioria das rupturas ocorreu na face inferior, partindo de uma ou mais estacas, formando fissuras inclinadas. Na zona nodal inferior, os limites propostos pela norma ACI 318 (ACI, 2019) resultaram em valores mais próximos das tensões atuantes no bloco. Junto à zona nodal superior, os limites propostos por Blévet e Frémy (1967) apresentaram valores próximos das tensões atuantes.

Por fim, nos blocos sobre quatro estacas em tamanho real, assim como nos modelos em escala reduzida, Blévet e Frémy (1967) observaram que a maioria das rupturas foi ocasionada por fissuras inclinadas (tração diagonal), iniciando-se em uma ou em mais estacas. Na zona nodal inferior, os limites propostos pela norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) apresentaram valores próximos das tensões atuantes nos blocos. Já na zona nodal superior, nenhum limite adotado apresentou valores relativamente próximos aos valores das tensões atuantes, sendo o estado triplo de tensões e o limite proposto pelo CEB (2010) aqueles com valores mais aproximados dessas tensões.

Observou-se, também, que os limites propostos por Schlaich e Schäfer (1991) apresentaram valores consistentes em todos os ensaios realizados e que estão apresentados neste trabalho.

4 Conclusões

Analisando os diversos valores de limites adotados, verificou-se que há discrepância entre eles. Isso demonstra que, dependendo do limite adotado, pode-se considerar que o bloco esteja ou não verificado em relação à força de ruptura.

Com a análise dos resultados e as observações relacionadas aos ensaios realizados por Blévet e Frémy (1967), além dos valores limites adotados, nota-se que alguns limites apresentam valores muito superiores às tensões atuantes nos blocos. Dessa forma, caso esses limites fossem adotados para o dimensionamento, embora atendam aos critérios de segurança definidos pelas normas, verificou-se que as tensões atuantes para a ruptura do bloco seriam inferiores a eles. Assim, ainda que atenda ao critério de segurança, a ruptura do bloco aconteceria com tensões inferiores àquelas tensões limites.

Os valores limites adotados devem ser analisados de acordo com o tipo de bloco. Algumas conclusões que podem ser inferidas dos resultados das tensões limites são:

- O limite proposto pela norma espanhola da CPH (2008) para a zona nodal superior apresenta valores elevados. Desse modo, é necessário ter cautela ao considerar esse limite, pois os blocos ensaiados por Blévet e Frémy (1967) apresentavam rupturas com tensões nodais aproximadamente 50% menores que os valores admitidos por essa norma;
- Quando desconsiderados os coeficientes de ponderação das ações de longa duração e para o dimensionamento no estado limite último, os limites propostos pela ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) e pela ACI 318 (ACI, 2019) para a zona nodal superior tornam-se iguais. Esses limites apresentam valores relativamente menores que os demais limites e as tensões atuantes nos blocos;
- Na zona nodal inferior, para todos os casos, os limites propostos pela ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) e pela ACI 318 (ACI, 2019) apresentam melhores resultados, com valores que se aproximaram mais das tensões atuantes nos blocos, adequando-se para uma análise que atenda segurança, eficiência e economia;
- Na zona nodal superior, três limites propostos apresentam melhores resultados: Blévet e Frémy (1967), CEB (2010) e a consideração do estado triplo de tensões.

Por fim, sugere-se, para a continuação desta linha pesquisa, que sejam realizadas análises como estas nos demais ensaios experimentais disponibilizados no meio técnico nacional e internacional, como em Silva (2021) e em Xiao e Chen (2013).

Financiamento

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG – processo APQ-02184-17), à CAPES (bolsa de mestrado do primeiro autor) e ao Programa de Mestrado em Engenharia Civil, vinculado à Universidade Federal de Uberlândia.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

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

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19)**. Farmington Hills: ACI, 2019.

ADEBAR, P.; KUCHMA, D.; COLLINS, M. P. Strut-and-tie models for design of pile caps: an experimental study. **ACI Structural Journal**, v. 87, n. 1, p. 81-91, 1990. Disponível em: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/19662>. Acesso em: 30 mar. 2022.

BARROS, R. **Análise numérica e experimental de blocos de concreto armado sobre duas estacas com cálice externo, parcialmente embutido e embutido utilizado na ligação pilar-fundação**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.11606/T.18.2013.tde-07012014-143424>.

BARROS, R.; DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J. S. Avaliação experimental e numérica de blocos de concreto armado sobre duas estacas. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, v. III, n. 1, p. 43-54, 2016. Disponível em: http://rpee.lnec.pt/Ficheiros/rpee_serieIII_n01/rpee_sIII_n01_Pg43_54.pdf. Acesso em: 1 abr. 2022.

BLÉVOT, J. **Semelles en béton armé sur pieux**. Paris: Institut de Recherches Appliquées du Béton Armé, 1957. p. 111-112.

BLÉVOT, J.; FRÉMY, R. Semelles sur pieux. **Anales d'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics**, Paris, v. 20, n. 230, p. 223-295, 1967.

CAO, J.; BLOODWORTH, A. G. Shear capacity of reinforced concrete pile caps. *In: IABSE SYMPOSIUM: IMPROVING INFRASTRUCTURE WORLDWIDE, 2007, Weimar. Proceedings* [...]. Weimar: IABSE, 2007. p. 448-449. DOI: <https://doi.org/10.2749/weimar.2007.0438>.

CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. São Paulo: Pini, 2009. v. 2.

CEB – COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **Model code, bulletin 55**. Paris: Comité Euro-Internacional du Béton, 2010.

CHAN, T. K.; POH, C. K. Behavior of precast reinforced concrete pile caps. **Construction and Building Materials**, v. 14, n. 2, p. 73-78, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00006-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00006-4).

CPH – COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. **Instrucción de Hormigón Estructural: EHE 08**. Madrid: CPH, 2008. Disponível em: <https://www.mitma.gob.es/organos-colegiados/mas-organos-colegiados/comision-permanente-del-hormigon/cph/instrucciones/ehe-08-version-en-castellano>. Acesso em: 26 mar. 2022.

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, p. 121-157, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952008000200002>.

DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J. S. Influência das dimensões da seção transversal do pilar e da excentricidade da força de compressão no comportamento estrutural de blocos sobre duas estacas. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 2, n. 4, p. 306-325, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952009000400002>.

DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J. S. Numerical analysis of two pile caps with sockets embedded, subject the eccentric compression load. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 6, n. 3, p. 436-474, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952013000300007>.

DELALIBERA, R. G.; SOUSA, G. F. Numerical analyses of two-pile caps considering lateral friction between the piles and soil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, n. 6, p. 1-19, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000600004>.

DELALIBERA, R. G.; TOMAZ, M. A.; GONÇALVES, V. F.; GIONGO, J. S. Analysis of nodal stress on reinforced concrete two-pile caps supported on steel piles. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 6, p. 1-16, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000600012>.

FUSCO, P. B. **Investigação experimental sobre o valor limite das tensões de cisalhamento no concreto estrutural**. São Paulo: Ed. Grêmio Politécnico, 1985.

FUSCO, P. B. **Técnicas de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1995.

GONÇALVES, V. F.; DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J. S. Análise numérica de blocos sobre duas estacas metálicas com diferentes tipos de ligação entre estaca e bloco. **Revista da Estrutura de Aço**, v. 10, n. 1, p. 80-99, 2021. Disponível em: https://www.cbca-acobrasil.org.br/lib/php/visualizacao-revista-cientifica.php?arq=arq_20210323171458_rea-5---goncalves-et-al.pdf. Acesso em: 1 abr. 2022.

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**, v. 252, 113629, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113629>.

IBRACON – INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **ABNT 6188:2014: Comentários e exemplos de aplicação**. São Paulo: Ibracon, 2015.

MAUTONI, M. **Blocos sobre dois apoios**. São Paulo: Ed. Grêmio Politécnico, 1972.

MESQUITA, A. C. **A influência da ligação pilar-bloco nos mecanismos de ruptura de blocos de fundação sobre duas estacas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/5317>. Acesso em: 30 mar. 2022.

MESQUITA, A. C.; ROCHA, A. S.; DELALIBERA, R. G.; SILVA, W. A. The influence of connecting pile cap-column in the mechanisms of break in the two pile caps. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 6, p. 856-882, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000600004>.

MUNHOZ, F. S. **Análise experimental e numérica de blocos rígidos sobre duas estacas com pilares de seções quadradas e retangulares e diferentes taxas de armadura**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.11606/T.18.2014.tde-30102014-084828>.

PRADO, A. B.; DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J. S.; GONÇALVES, V. F. Blocos sobre estacas, de Blévoit & Frémy (1967) – tradução para o português – Parte A. **Revista Estrutura - ABECE**, v. 9, p. 46-48, 2020. Disponível em: http://www.abece.com.br/pdf/1967_Blevot_e_Fremy.pdf. Acesso em: 30 mar. 2022.

SCHLAICH, J.; SCHÄFER, K. Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models. **The Structural Engineer**, v. 69, n. 6, p. 113-125, 1991.

SILVA, J. C. G. **Análise experimental da influência da armadura principal de tração em blocos sobre estacas constituídas de perfis metálicos**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.495>.

SIVELLI, M. G.; DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J. S.; GONÇALVES, V. F.; OLIVEIRA FILHO, M. A. Behavior of pile caps on one steel pile. **Material Science & Engineering International Journal**, v. 3, n. 1, p. 24-31, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15406/mseij.2019.03.00084>.

TOMAZ, M. A.; DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J. S.; GONÇALVES, V. F. Analysis of the nodal stresses in pile caps. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 6, p. 1208-1257, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000600005>.

XIAO, Y.; CHEN, L. Behavior of model steel H-pile-to-pile-cap connections. **Journal of Construction Steel Research**, v. 80, p. 153-162, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.09.008>.