

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 <sup>[1]</sup>

 Igor Vargas de Oliveira <sup>[2]</sup>

 Rodrigo Gustavo Delalibera <sup>[3]\*</sup>

[1] [jeancarlos\\_gs@yahoo.com.br](mailto:jeancarlos_gs@yahoo.com.br)

[2] [igorvargas.ce@gmail.com](mailto:igorvargas.ce@gmail.com)

[3] [delalibera@ufu.br](mailto: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 Blévo 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**

Blévo 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 Blévo 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, Blévo 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.

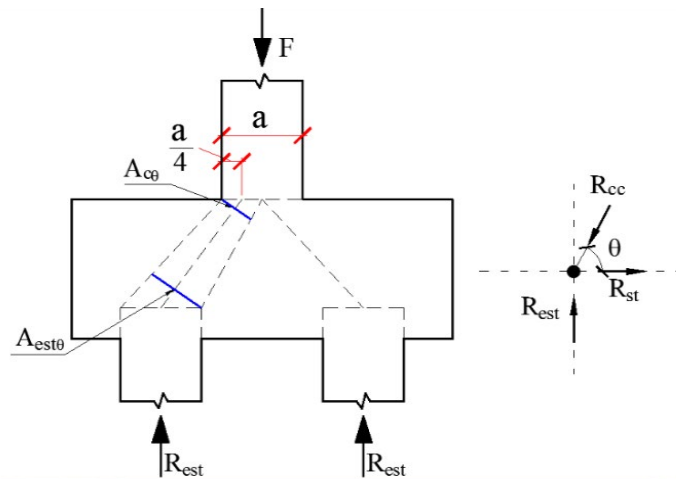
Para ambas as etapas de ensaios, foram verificadas: a altura dos blocos; a disposição das armaduras; e as propriedades das barras de aço. As características dos materiais utilizados também foram controladas, de modo que foram realizados os ensaios de corpos de prova para a determinação da resistência 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 Blévo 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  $\theta$  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.

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

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

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

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

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  $\gamma_c$  do concreto, o efeito Rüsç e o coeficiente  $\alpha_{v2}$ .

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  $\gamma_c$ ,  
o efeito Rüsç e  $\alpha_{v2}$ .  
*Fonte: elaborada  
pelos autores*

| <b>Zona nodal inferior</b> |                                   |                                 |                                 |
|----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>Limite</b>              | <b>Bloco sobre quatro estacas</b> | <b>Bloco sobre três estacas</b> | <b>Bloco sobre duas estacas</b> |
| 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)                 | –                                 | $0,882f_c$                      | –                               |
| <b>Zona nodal superior</b> |                                   |                                 |                                 |
| <b>Limite</b>              | <b>Bloco sobre quatro estacas</b> | <b>Bloco sobre três estacas</b> | <b>Bloco sobre duas estacas</b> |
| 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*

| <b>Modelo reduzido</b>                  |                              |                             |                             |   |   |  |
|---|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|---|--|
| <b>Número de identificação do bloco</b> | <b>R<sub>est</sub> (kgf)</b> | <b>R<sub>cc</sub> (kgf)</b> | <b>R<sub>st</sub> (kgf)</b> | <b>σ<sub>zni</sub> (kgf/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>σ<sub>zns</sub> (kgf/cm<sup>2</sup>)</b> |  |
| 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                                      |  |
| <b>Tamanho real</b>                     |                              |                             |                             |   |   |  |
| 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) | $\sigma_{zni}$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{zns}$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| 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 <sub>est</sub> (kgf) | R <sub>cc</sub> (kgf) | R <sub>st</sub> (kgf) | σ <sub>zni</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> ) | σ <sub>zns</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| 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 |
| <b>Tamanho real</b> |           |           |           |        |        |
| 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/cm<sup>2</sup>).

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 Blévoet e Frémy (1967) para blocos sobre duas estacas nos modelos em tamanho real (em kgf/cm<sup>2</sup>).

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) |                          |
| 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 |                           |                       |            |                     |            |                          |
|                                  | Blévoet 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/cm<sup>2</sup>).

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 Blévoet e Frémy (1967) para blocos sobre três estacas nos modelos em tamanho real (em kgf/cm<sup>2</sup>).

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) |
| 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 |                           |                       |            |                     |            |                          |
|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|------------|---------------------|------------|--------------------------|
|                                  | Blévoet 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/cm<sup>2</sup>).

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            |                                 |
| <b>Número de identificação do bloco</b> | <b>Limites zona nodal superior</b> |                                  |                              |                   |                            |                   | <b>Estado triplo de tensões</b> |
|   | <b>Blévo e Frémy (1967)</b>        | <b>Schlaich e Schäfer (1991)</b> | <b>NBR 6118 (ABNT, 2014)</b> | <b>CPH (2008)</b> | <b>ACI 318 (ACI, 2019)</b> | <b>CEB (2010)</b> |                                 |
| 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/cm<sup>2</sup>).

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 |                           |                       |            |                     |            |                          |
|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|------------|---------------------|------------|--------------------------|
|                                  | Blévot 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.

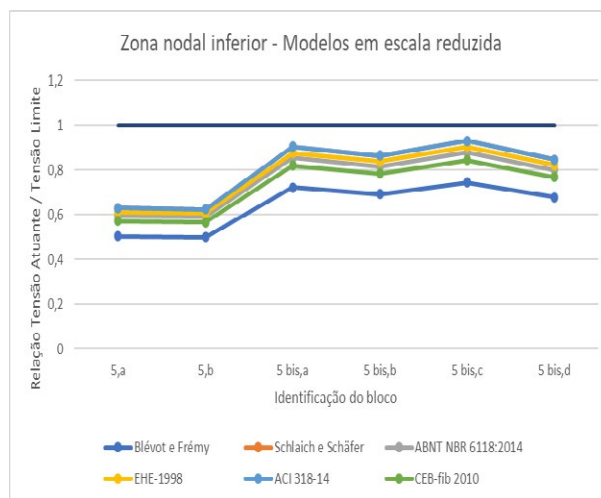
**Figura 2** ►

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

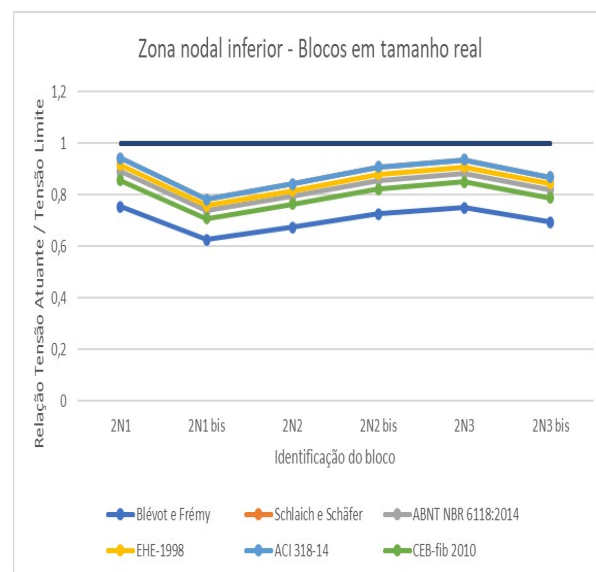
(a) Modelo em escala reduzida. (b) Blocos em tamanho real.

Fonte: dados da pesquisa

(a)



(b)



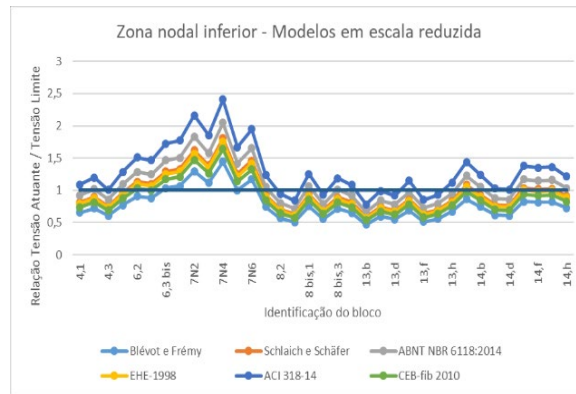
**Figura 3** ►

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).

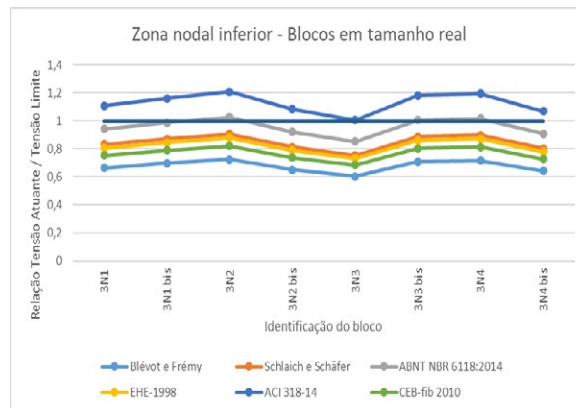
(a) Modelo em escala reduzida. (b) Blocos em tamanho real.

Fonte: dados da pesquisa

(a)



(b)



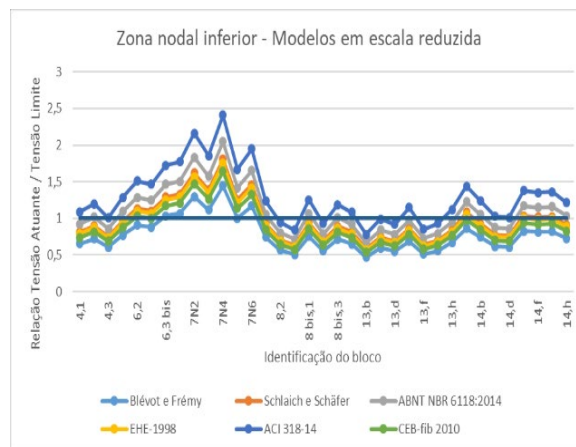
**Figura 4** ►

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).

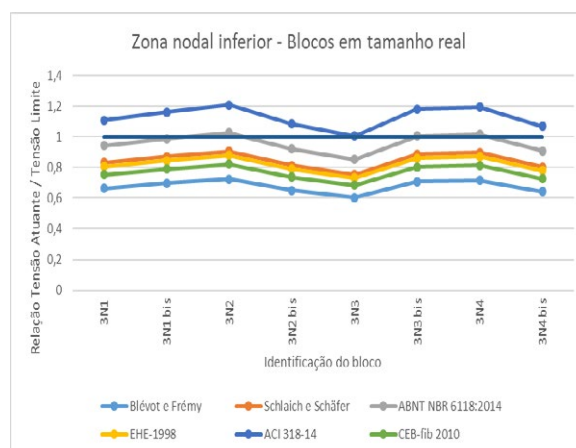
(a) Modelo em escala reduzida. (b) Blocos em tamanho real.

Fonte: dados da pesquisa

(a)



(b)



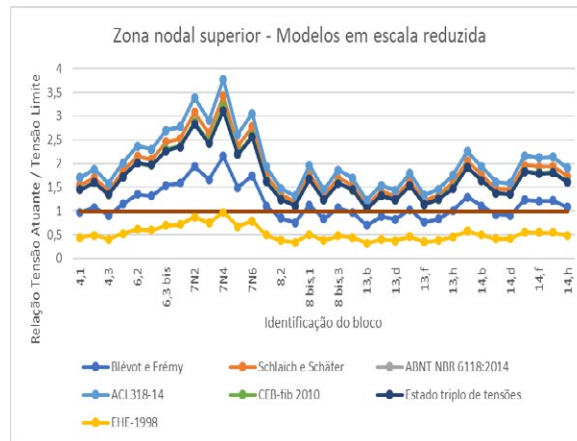
**Figura 5** ►

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).

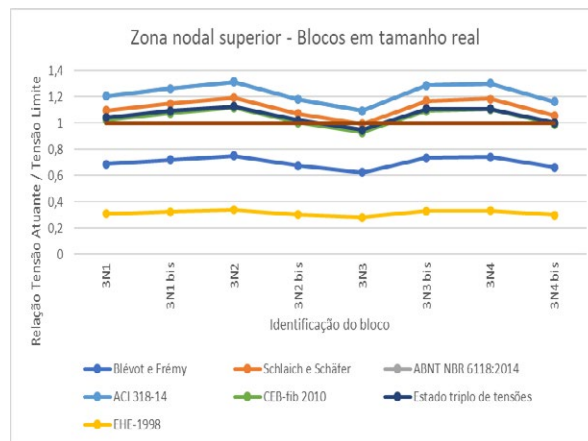
(a) Modelo em escala reduzida. (b) Blocos em tamanho real.

Fonte: dados da pesquisa

(a)



(b)



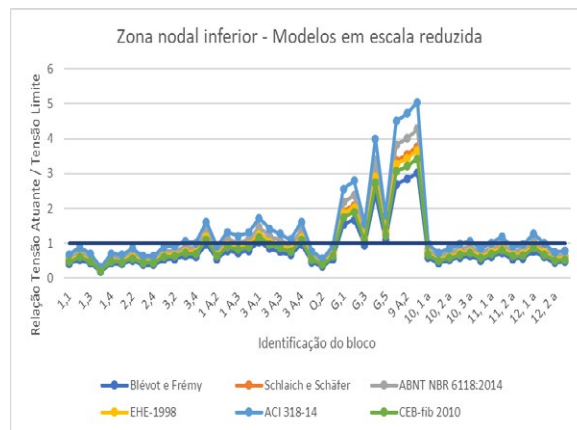
**Figura 6** ►

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).

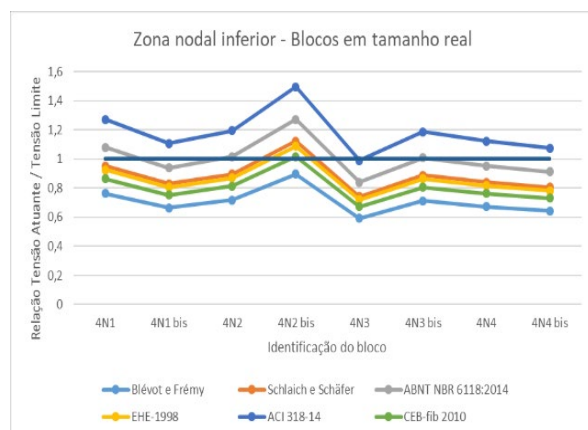
(a) Modelo em escala reduzida. (b) Blocos em tamanho real.

Fonte: dados da pesquisa

(a)



(b)

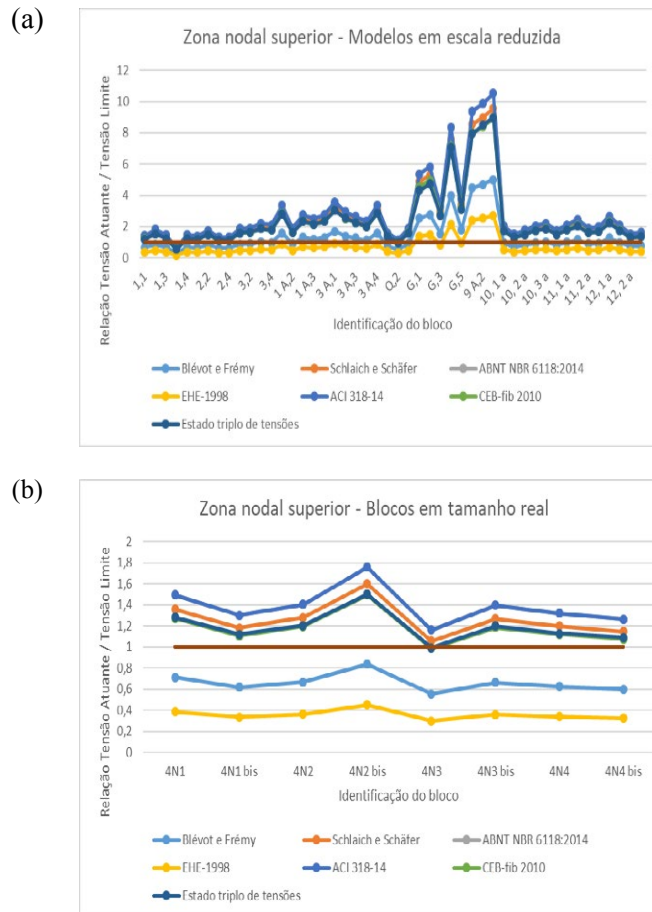


**Figura 7** ►

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 Blévo 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 Blévo 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 Blévo 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, Blévo 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 Blévo 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, Blévo 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 Blévo 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](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](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](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>.