

Study of design methodologies of steel column bases

Estudo de metodologias para o dimensionamento de bases de pilares de aço



I. PIANA^a
piana.iza@gmail.com

A. F. G. CALENZANI^a
afcalenzani@gmail.com

Abstract

The behavior of a steel structure is directly related to the type of base used in the columns, which is essential to the stability and security of the structural system. The Brazilian standard ABNT NBR 8800:2008 does not directly covers this subject. Another Brazilian standard, ABNT NBR 16239:2013, presents a limited design procedure to hollow columns. In this paper, two design methodologies are presented considering the uniform and triangular pressure distribution between the base plate and the concrete surface. A computational program has been developed to design steel column bases considering both methodologies mentioned. The program has been validated with manually solved design examples and conclusions about the pressure distribution design procedures were made from the 200 bases designed by the program. It was noted that, for the triangular pressure distribution, there is an interval in which the procedure is not completely applicable. Apart from this interval, there was no significant difference in the results.

Keywords: steel column base plates, design methodologies, computational program.

Resumo

O comportamento de uma estrutura em aço está diretamente relacionado ao tipo de base utilizada nos pilares, sendo esta essencial à estabilidade e segurança do sistema estrutural. A ABNT NBR 8800:2008 não aborda diretamente esse assunto e a ABNT NBR 16239:2013 apresenta formulações somente para bases de pilares tubulares. Neste trabalho, são apresentadas duas metodologias para o dimensionamento de bases de pilares que consideram as hipóteses de distribuição de tensões de contato uniforme e linear entre a placa de base e o concreto. Um programa computacional foi desenvolvido para dimensionar bases de pilares de aço considerando essas duas hipóteses. O programa foi validado com exemplos resolvidos manualmente e 200 bases foram dimensionadas para análise das metodologias. Foi detectada a existência de um intervalo para o qual a metodologia que considera a distribuição linear de tensões não é apropriada. Fora deste intervalo, observou-se pouca divergência entre os resultados.

Palavras-chave: bases de pilares de aço, metodologias para o dimensionamento, programa computacional.

^a Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

1. Introdução

As bases de pilares são utilizadas na interface aço-concreto entre pilares de aço e suas fundações. Sua principal função é transmitir os esforços da estrutura à superfície do bloco de concreto e fixar a extremidade inferior do pilar à fundação. Além da placa de base, as bases de pilares são constituídas por chumbadores e dispositivos de resistência ao cisalhamento, como por exemplo, barras de cisalhamento, Figura 1.

As ligações metálicas em geral são extremamente importantes para a estrutura de aço. São as ligações que vão garantir a estabilidade do conjunto e devem representar o tipo de vínculo interno considerado no cálculo de forma mais próxima possível à real. A ABNT NBR 8800:2008 [1] não aborda diretamente a ligação de bases de pilares de aço e direciona o leitor para o guia de projeto de Fisher e Kloiber [2]. A ABNT NBR 16239:2013 [3] aborda o assunto, porém se limita a bases de pilares tubulares. Outros autores como Bellei [4] e Baião Filho e Silva [5] não abordam o caso de solicitação de tração com momento. Além dessas questões, a maioria dos trabalhos sobre esse tipo de ligação considera uma distribuição linear de tensões de contato entre o concreto e a placa de base. Porém, a ABNT NBR 16239:2013[3] considera o método de distribuição uniforme de tensões. Portanto, a literatura científica carece de artigos que abordem o dimensionamento de bases de pilares de aço nos padrões das normas mais recentes e de forma mais abrangente em relação às solicitações na placa. Este trabalho teve como objetivo automatizar o dimensionamento de bases de pilares de aço conforme prescrições das normas brasileiras, considerando as hipóteses de distribuição de tensões de contato linear e uniforme. Adicionalmente, comparou-se o dimensionamento de uma base de pilar que utiliza uma distribuição uniforme de tensões com o que utiliza uma distribuição linear.

Cinco tipos de bases de pilares de aço foram considerados, a saber: bases de pilares I ou H onde não se deseja transferência de momento fletor para a fundação (Figura 2a); bases de pilares I ou H onde se deseja transferência de momento fletor para a fundação (Figura 2b); base de pilares tubulares retangulares(Figura 2c); base de pilares

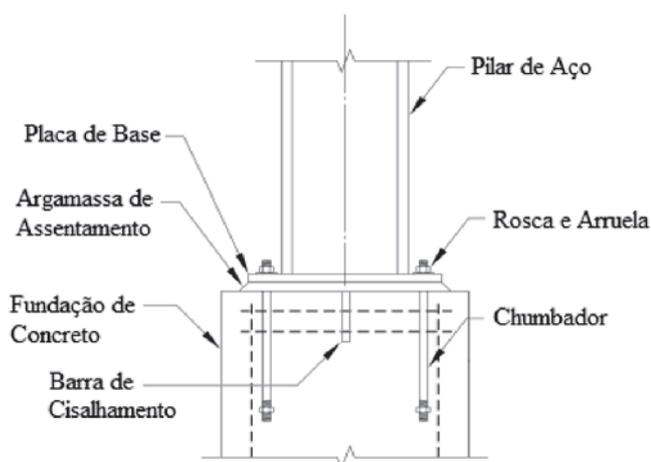


Figura 1

Componentes de uma base de pilar de aço

Adaptado: Fisher e Kloiber [2]

tubulares circulares com placa de base retangular (Figura 2d); base de pilares tubulares circulares com placa de base circular(Figura 2e). De maneira geral, as bases de pilares estão sujeitas a esforços de compressão ou tração, de momento fletor e de força cortante, que podem induzir os seguintes estados limites últimos: esmagamento do concreto na região de contato com a placa de base, formação de charneira plástica na placa de base, ruptura por tração nos chumbadores, deslizamento da base, arrancamento dos chumbadores, dentre outros que não serão abordados neste texto.

Para o dimensionamento de bases de pilares de perfil I e H, a formulação utilizada nesse trabalho tem como base o guia de projeto de Fisher e Kloiber [2], uma vez que a ABNT NBR 8800:2008 [1] não apresenta diretamente as formulações. Para o dimensionamento de bases de pilares tubulares, foi utilizada a formulação da ABNT NBR 16239:2013 [3].

2. Dimensionamento de bases de pilares de aço

2.1 Dimensionamento de placas de base submetidas a esforço axial

Para comportar os elementos de uma base, como os chumbadores e o próprio pilar, inicialmente são calculadas as dimensões mínimas em planta da placa de base levando em conta as dimensões do perfil do pilar e as distâncias mínimas de locação de chumbadores, como a distância de centro de furo à borda da placa e a de furo a furo.

2.1.1 Placas de base submetidas a esforço de compressão

No procedimento de cálculo de uma placa de base solicitada por esforço axial de compressão, a tensão resistente de cálculo do concreto à pressão de contato na área entre a placa de base e a superfície do elemento de fundação de concreto é dada pela equação (1).

$$\sigma_{c,Rd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c \gamma_n} \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq f_{ck} \quad (1)$$

A variável f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão, γ_n é um coeficiente de comportamento com valor de 1,40, γ_c é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto, A_1 é a área da placa de base e A_2 é a área da superfície de concreto homotética a A_1 . A tensão resistente de cálculo do concreto à pressão de contato pode ter o acréscimo de $\sqrt{A_2/A_1}$ quando a superfície de concreto é maior que a da placa devido ao efeito do confinamento no concreto. Entretanto, esse acréscimo na resistência do concreto atinge um valor máximo quando $A_2 \geq 4A_1$.

Como as tensões de contato entre a placa e a superfície de concreto são uniformemente distribuídas, pode-se determinar a área mínima necessária de uma placa pela equação (2),

$$A_{1,min} = \frac{N_{sd} \gamma_c \gamma_n}{f_{ck}} \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \leq \frac{N_{sd} \gamma_c \gamma_n}{2f_{ck}} \quad (2)$$

A variável N_{sd} é a força de compressão solicitante de cálculo. A placa de base é tratada como um console para o dimensionamento

de sua espessura. A placa de base deve ter espessura suficiente para resistir à flexão nas suas seções críticas da Figura 2 (distâncias m e n) e, nas bases de perfis I ou H, adicionalmente na região entre as mesas do pilar (distância $\lambda n'$). O momento solicitante de cálculo para uma faixa de largura unitária da placa é dado por:

$$M_{p,Sd} = \sigma_{c,Sd} \frac{l_{máx}^2}{2} \quad (3)$$

A variável $l_{máx}$ é o maior valor entre as distâncias m , n e $\lambda n'$ (equação (4)). O multiplicador λ pode ser conservadoramente adotada como 1.

$$\lambda n' = \lambda \frac{\sqrt{db_f}}{4} \quad (4)$$

Utilizando como momento resistente da placa, o momento de plastificação de cálculo para uma faixa de largura unitária, obtém-se a equação que fornece a espessura mínima $t_{(p,min)}$ necessária para a placa (equação (5)).

$$t_{p,min} = l_{máx} \sqrt{\frac{2\sigma_{c,Sd}}{(f_y/\gamma_{a1})}} \quad (5)$$

A variável f_y é a resistência ao escoamento do aço e γ_{a1} o coeficiente de ponderação da resistência do aço relativo ao estado limite último de escoamento.

2.1.2 Placas de base submetidas a esforço de tração

Em placas de base solicitadas por esforço de tração, os chumbadores recebem solicitação de tração com mesma intensidade e provocam momento fletor (equação (6)) em relação à alma do perfil.

$$M_{p,Sd} = F_{t,Sd} \left(\frac{g - t_w}{2} \right) \quad (6)$$

A variável g é a distância entre chumbadores na direção perpendicular à alma do perfil (Figura 3) e t_w a espessura da alma do perfil. A largura efetiva l_{ef} da placa de base para resistir ao momento solicitante pode, aproximadamente, ser calculada utilizando uma distribuição de 45° da linha de centro dos chumbadores, representadas pelas linhas tracejadas na Figura 3, até a face da alma do pilar (equação (7)). Obtém-se a espessura mínima necessária da placa pela equação(8) para perfis I e H e pela equação (9) para perfis tubulares.

$$l_{ef} = 2 \left(\frac{g - t_w}{2} \right) \quad (7)$$

$$t_{p,min} = \sqrt{\frac{2F_{t,Sd}}{(f_y/\gamma_{a1})}} \quad (8)$$

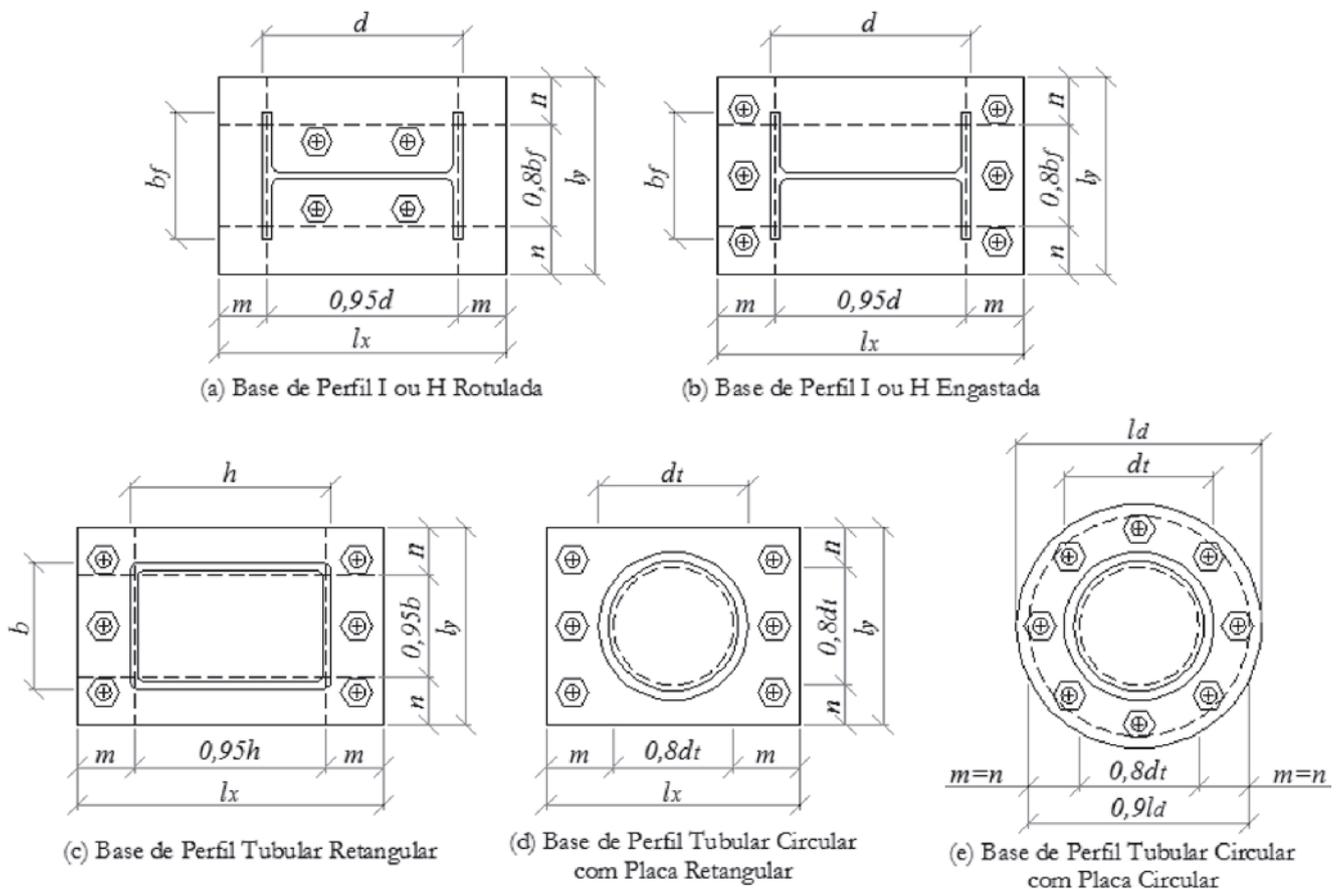


Figura 2
Tipos de bases de pilares de aço

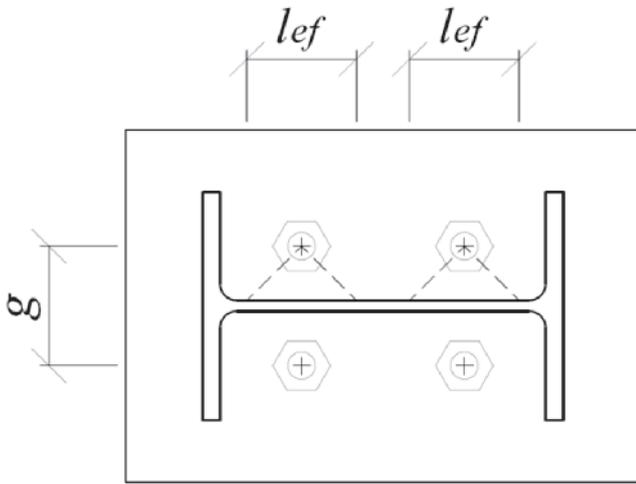


Figura 3
Largura efetiva de flexão para chumbadores entre as mesas do pilar
Adaptado: Fisher e Kloiber [2]

$$t_{p,min} = \sqrt{\frac{2n_b F_{t,Sd}(m_{eq} - a_1)}{l_{y,eq}(f_y/\gamma_{a1})}} \quad (9)$$

A variável $l_{(y,eq)}$ é definida pela equações (10) e (11) para pilares tubulares com placas de base retangulares e circulares, respectivamente.

$$l_{y,eq} = n_b(d_b + m - a_1) \leq l_y \quad (10)$$

$$l_{y,eq} = n_b(d_b + m_{eq} - a_1) \leq 0.9l_d \quad (11)$$

A variável m_{eq} é definida pelas equações (12) e (13) para placas de base retangulares e circulares, respectivamente.

$$m_{eq} = m \quad (12)$$

$$m_{eq} = \frac{l_d - 0.8d_t}{2} \quad (13)$$

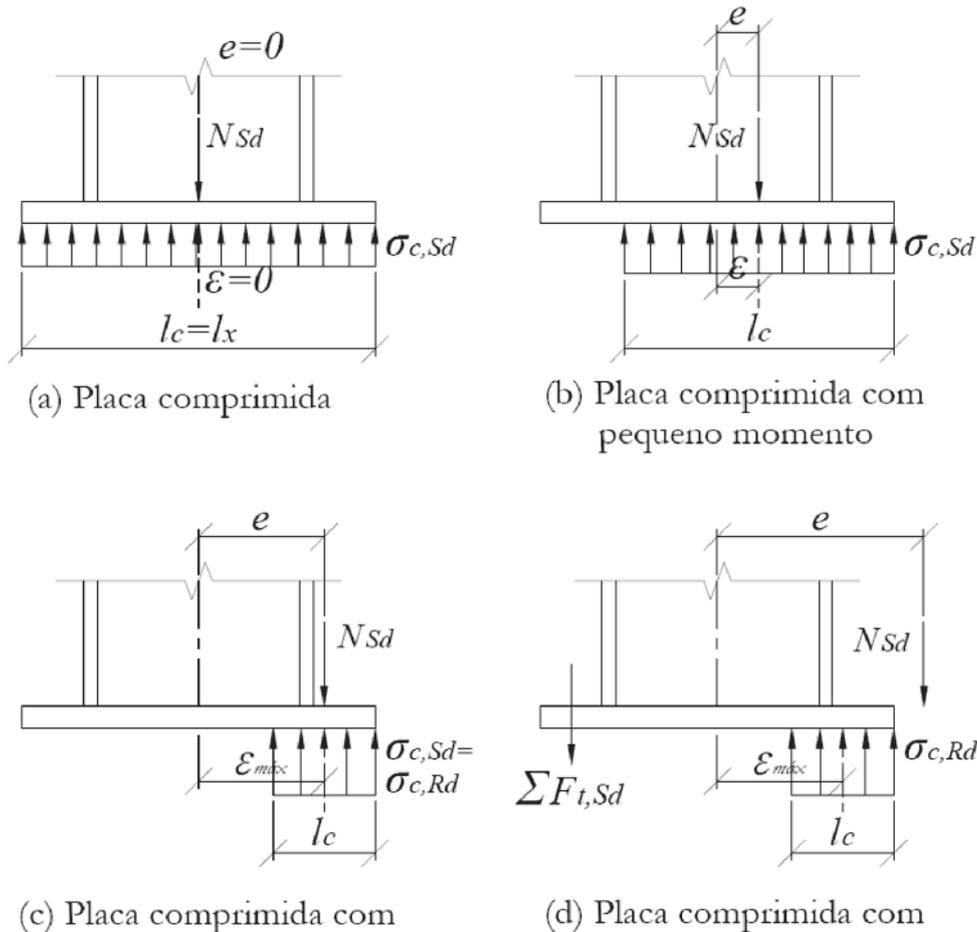


Figura 4
Comportamento de placas solicitadas por esforço axial de compressão e momento fletor pela hipótese de distribuição uniforme de tensões de contato

2.2 Dimensionamento de placas de base submetidas a esforço axial com momento

Segundo Fisher e Kloiber [2], as placas de base solicitadas simultaneamente por esforço axial e por momento fletor podem ser dimensionadas tanto assumindo que há uma distribuição uniforme de tensões, quanto que há uma distribuição linear de tensões de contato entre a placa de base e a superfície de concreto.

As placas de base são tratadas de forma diferente dependendo da magnitude do momento fletor. Por isso, classificam-se as placas em solicitadas por pequeno e grande momento de acordo com o valor da excentricidade e .

$$e = \frac{M_{Sd}}{N_{Sd}} \quad (14)$$

2.2.1 Hipótese de distribuição uniforme de tensões de contato

Considera-se que uma placa é solicitada por compressão com pequeno momento quando $e \leq \varepsilon_{m\acute{a}x}$, Figura 4 (b), e por grande momento quando $e > \varepsilon_{m\acute{a}x}$, Figura 4 (d), sendo $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ calculado por:

$$\varepsilon_{m\acute{a}x} = \frac{l_x}{2} - \frac{N_{Sd}}{2\sigma_{c,Rd}l_y} \quad (15)$$

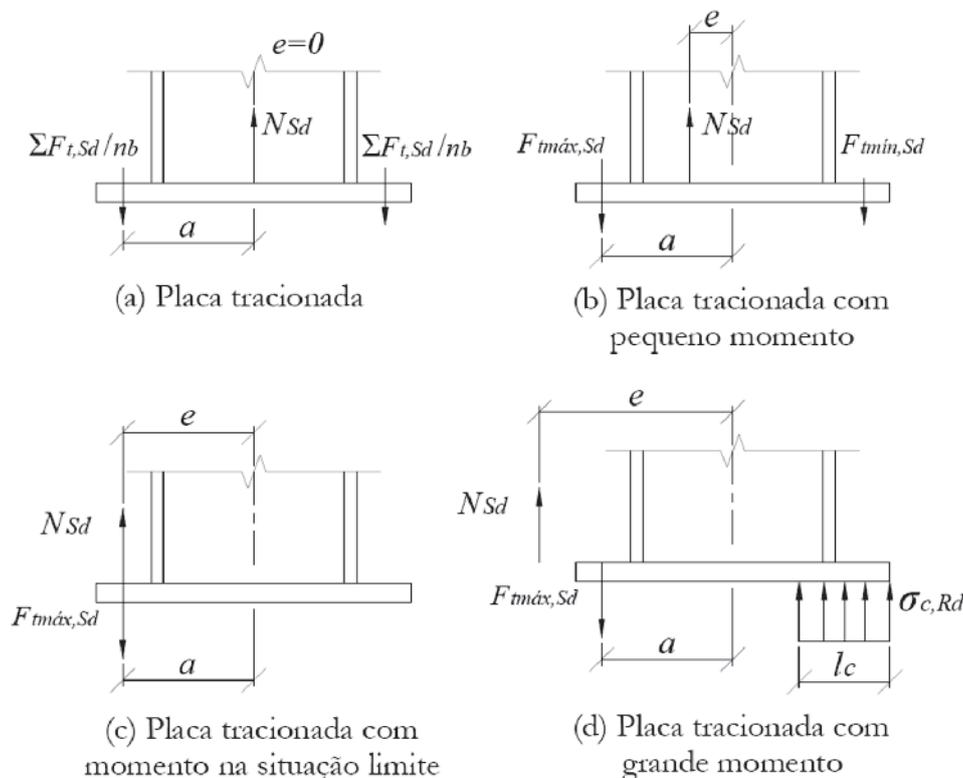


Figura 5

Comportamento de placas solicitadas por esforço axial de tração e momento fletor pela hipótese de distribuição uniforme de tensões de contato

2.2.1.1 Placas de base submetidas a esforço de compressão com pequeno momento

Nas placas de base solicitadas por pequeno momento, o comprimento do contato da placa de base com o concreto é dado pela equação (16). Se $l_c \geq l_{m\acute{a}x}$, a espessura da placa é calculada pela equação (17), caso contrário, pela equação (18). A tensão solicitante de cálculo na placa é dada pela equação (19).

$$l_c = l_x - 2e \quad (16)$$

$$t_{p,min} = l_{m\acute{a}x} \sqrt{\frac{2\sigma_{c,Sd}}{(f_y/\gamma_{a1})}} \quad (17)$$

$$t_{p,min} = \sqrt{\frac{4\sigma_{c,Sd}l_c(l_{m\acute{a}x} - l_c/2)}{(f_y/\gamma_{a1})}} \quad (18)$$

$$\sigma_{c,Sd} = \frac{N_{Sd}}{l_y l_c} \quad (19)$$

2.2.1.2 Placas de base submetidas a esforço de compressão com grande momento

Nas placas de base solicitadas por grande momento, o comprimento de contato é obtido a partir da condição de equilíbrio de

momentos em relação à linha de ação da força de tração desenvolvida nos chumbadores (equação (20)).

$$l_c = \left(a + \frac{l_x}{2}\right) \pm \sqrt{\left(a + \frac{l_x}{2}\right)^2 - \frac{2N_{c,Sd}(e + a)}{\sigma_{c,Rd}l_y}} \quad (20)$$

Sendo a a distância do centro dos chumbadores ao centro da placa. As dimensões em planta da placa de base devem ser aumentadas quando não for possível a solução real da equação (20) para perfis I ou H ou quando as equações (21) e (22) para perfis tubulares com placas de base retangular e circular, respectivamente, não forem atendidas.

$$\left(a + \frac{l_x}{2}\right)^2 \geq \frac{2.25N_{c,Sd}(e + a)}{\sigma_{c,Rd}l_y} \quad (21)$$

$$\left(a + \frac{l_x}{2}\right)^2 \geq \frac{3.125N_{c,Sd}(e + a)}{\sigma_{c,Rd}l_y} \quad (22)$$

O cálculo da espessura mínima é feita da mesma forma que para placas de base solicitadas por pequeno momento (equações (17) e (18)). Porém, deve ser feita uma verificação adicional

devido à presença da força de tração $F_{t,Sd}$ (equação (23)) dos chumbadores.

$$F_{t,Sd} = \frac{2(\sigma_{c,Rd}l_y l_c - N_{c,Sd})}{n_{b,eq}} \quad (23)$$

O número equivalente de chumbadores da placa, $n_{b,eq}$, é igual ao número total de chumbadores da placa n_b para pilares I, H ou tubulares com placa de base retangular e igual a $2n_b/3$ para pilares tubulares circulares com placas de base circulares. A espessura mínima $t_{p,min}$ é dada pela equação (24).

$$t_{p,min} = \sqrt{\frac{4 \sum F_{t,Sd} x}{l_{y,eq}(f_y/\gamma_{a1})}} \quad (24)$$

O comprimento x para perfis I ou H é considerado como a distância entre o centro do chumbador ao centro da mesa do pilar e como a distância do centro dos chumbadores à seção crítica do perfil para perfis tubulares. $l_{y,eq}$ é igual a l_y para perfis I ou H e calculado pelas equações (10) e (11) para pilares tubulares com placas de base retangulares e circulares, respectivamente.

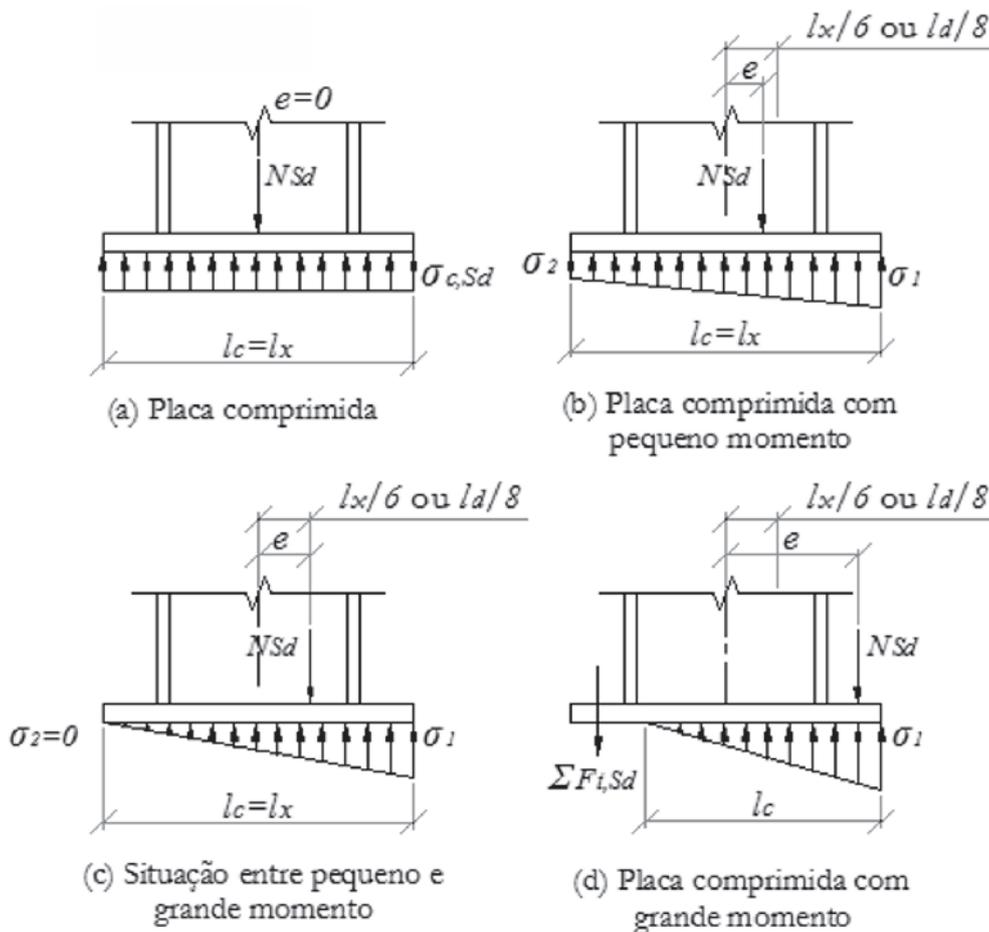


Figura 6

Comportamento de placas solicitadas por esforço axial de compressão e momento fletor pela hipótese de distribuição linear de tensões de contato para placas retangulares

2.2.1.3 Placas de base submetidas a esforço de tração com pequeno momento

Em relação às bases tracionadas com momento, considera-se que uma placa de base é solicitada por pequeno momento quando $e \leq a$, Figura 5(b), e por grande momento quando $e > a$, Figura 5(d). No caso de placas tracionadas como pequeno momento, calcula-se a força nos chumbadores mais solicitados da placa de acordo com a equação (25).

$$F_{t,Sd} = \frac{N_{Sd}}{n_b} + \frac{M_{Sd}}{a n_{b,eq}} \quad (25)$$

O cálculo da espessura mínima da placa de base é feito da mesma forma que para placas de base puramente tracionadas (item 2.1.2): no caso de perfis I ou H, utiliza-se a equação (8) e no caso de perfis tubulares, a equação (9). Entretanto, deve-se utilizar para $F_{t,Sd}$ a equação (25).

2.2.1.4 Placas de base submetidas a esforço de tração com grande momento

O procedimento de cálculo de bases solicitadas por tração e grande momento é similar ao caso de compressão com grande momento. Para o cálculo do comprimento l_c , devem-se utilizar as equações (20), (21) e (22), porém substituindo o termo $(e + a)$ por $(e - a)$. A força de tração $F_{t,Sd}$ dos chumbadores é dada pela equação (26) e a espessura da placa é calculada da mesma forma que para placas comprimidas com grande momento, equações (17), (18) e (24).

$$\Sigma F_{t,Sd} = (\sigma_{c,Rd} l_y l_c + N_{Sd}) \quad (26)$$

2.2.2 Hipótese de distribuição linear de tensões de contato

2.2.2.1 Placas de base submetidas a esforço de compressão com pequeno momento

No método que considera a distribuição linear de tensões de contato entre a placa e a superfície de concreto, classifica-se a placa de base em comprimida por pequeno momento se $e \leq l_x/6$ para placas retangulares e $e \leq l_x/8$ para placas circulares, Figura 6(b), e em comprimida por grande momento se $e > l_x/6$ para placas retangulares e $e > l_x/8$ para placas circulares, Figura 6(d).

No caso de placas comprimidas com pequeno momento, determinam-se as pressões de contato σ_1 e σ_2 entre a placa e o concreto (equação (27) para placas retangulares e equação (28) para placas circulares). Caso $\sigma_1 > \sigma_{c,Rd}$, redimensiona-se a área da placa.

$$\sigma_{1,2} = \frac{N_{Sd}}{l_x l_y} \pm \frac{6M_{Sd}}{l_y l_x^2} \quad (27)$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{4N_{Sd}}{\pi l_d^2} \pm \frac{32M_{Sd}}{\pi l_d^3} \quad (28)$$

O momento solicitante da placa na seção crítica m para uma faixa de largura unitária é definido pela equação (29), sendo σ_m a tensão na seção m dada pela equação (30) para placas de base retangulares e pela equação (31) para placas de base circulares.

$$M_{p,Sd} = \sigma_m \left(\frac{m^2}{2} \right) + (\sigma_1 - \sigma_m) \left(\frac{m^2}{3} \right) \quad (29)$$

$$\sigma_m = \sigma_1 - \frac{12M_{Sd}m}{l_y l_x^3} \quad (30)$$

$$\sigma_m = \sigma_1 \left(1 - \frac{m}{l_d} \right) \quad (31)$$

O momento solicitante na seção crítica n para placas retangulares é dado pela equação (32). O maior momento entre as equações (29) e (32) deve ser tomado como o momento crítico e utilizado para calcular a espessura na equação (33).

$$M_{p,Sd} = \frac{N_{Sd}}{l_x l_y} \left(\frac{n^2}{2} \right) \quad (32)$$

$$t_{p,min} = \sqrt{\frac{4M_{p,Sd}}{l_{y,eq}(f_y/\gamma_{a1})}} \quad (33)$$

2.2.2.2 Placas de base submetidas a esforço de compressão com grande momento

No dimensionamento de placas de base solicitadas por compressão com grande momento na hipótese de distribuição linear de tensões, calcula-se primeiramente o comprimento de contato l_c (equação (34)). Caso a solução de l_c não seja real, deve-se aumentar a área da placa.

$$l_c = \frac{3 \left(a + \frac{l_x}{2} \right) \pm \sqrt{\left[3 \left(a + \frac{l_x}{2} \right) \right]^2 - \frac{24(N_{Sd} a + M_{Sd})}{\sigma_{c,Rd} l_y}}}{2} \quad (34)$$

A espessura (equação (35)) é calculada considerando flexão na placa provocada pelas tensões de contato. Se $l_c \geq l_{máx}$, o momento solicitante por unidade de comprimento na seção crítica será dado pela equação (36), sendo σ_m dada pela equação (37). Caso $l_c < l_{máx}$, o momento solicitante por unidade de comprimento na seção crítica será dado pela equação (38).

$$t_{p,min} = \sqrt{\frac{4M_{p,Sd}}{(f_y/\gamma_{a1})}} \quad (35)$$

$$M_{p,Sd} = \frac{\sigma_m l_{máx}^2}{2} + \frac{(\sigma_{c,Rd} - \sigma_m) l_{máx}^2}{3} \quad (36)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{c,Rd}(l_c - l_{máx})}{l_c} \quad (37)$$

$$M_{p,Sd} = \frac{\sigma_{c,Rd} l_c}{2} \left(l_{máx} - \frac{l_c}{3} \right) \quad (38)$$

Adicionalmente, calcula-se a espessura para que a placa resista à flexão gerada pelos chumbadores na seção crítica do pilar. O somatório das forças de tração $\Sigma F_{t,Sd}$ dos chumbadores solicitados é dada pela equação (39).

$$\Sigma F_{t,Sd} = \frac{\sigma_{c,Rd} l_c l_y}{2} - N_{Sd} \quad (39)$$

A força de tração por chumbador é igual ao somatório das forças dividido por metade do número de chumbadores equivalentes da placa de base. A espessura da placa é calculada da mesma forma que para placas comprimidas com grande momento para uma distribuição uniforme de tensões de contato (equação (24), item 2.2.1.2).

2.2.2.3 Placas de base submetidas a esforço de tração com pequeno momento

Em relação às bases tracionadas, considera-se que uma placa de base é tracionada por pequeno momento se $e \leq l_x/6$ para placas retangulares e $e \leq l_d/8$ para placas circulares e que é tracionada, Figura 7(b), por grande momento se $e > l_x/6$ para placas retangulares e $e > l_d/8$ para placas circulares, Figura 7(d). Ao se observar as Figura 7(b) e Figura 5(b) que ilustram bases solicitadas por tração com pequeno momento considerando a hipótese linear e uniforme de distribuição de tensões, respectivamente, nota-se a semelhança nas solicitações na placa de base. Portanto, considera-se o mesmo procedimento de cálculo para a força de tração nos chumbadores (equação (25)) e para a espessura (equação (8)) para perfis I ou H e no caso de perfis tubulares, a equação (9)).

2.2.2.4 Placas de base submetidas a esforço de tração com grande momento

Nota-se nas Figuras 6(d) e 7(d), a semelhança de solicitação em placas de base comprimidas e tracionadas com grande momento. Em ambos casos há tração nos chumbadores apenas em um lado da placa e há tensão de contato entre placa e bloco de concreto com tensão igual à resistente de compressão do concreto. Portanto, o cálculo é feito de forma similar ao caso de compressão com grande momento, exceto pelo comprimento de contato l_c que pode ser calculado pela equação (40) e da força de tração $F_{t,Sd}$ dos chumbadores que é dada pela equação (41).

$$l_c = \frac{3 \left(a + \frac{l_x}{2} \right) \pm \sqrt{\left[3 \left(a + \frac{l_x}{2} \right) \right]^2 - \frac{24(M_{Sd} - N_{Sd} a)}{\sigma_{c,Rd} l_y}}}{2} \tag{40}$$

$$\Sigma F_{t,Sd} = \frac{\sigma_{c,Rd} l_c l_y}{2} + N_{sd} \tag{41}$$

2.3 Dimensionamento de placas de base submetidas a esforço cisalhante

Os meios de dissipação da força de cisalhamento solicitante de

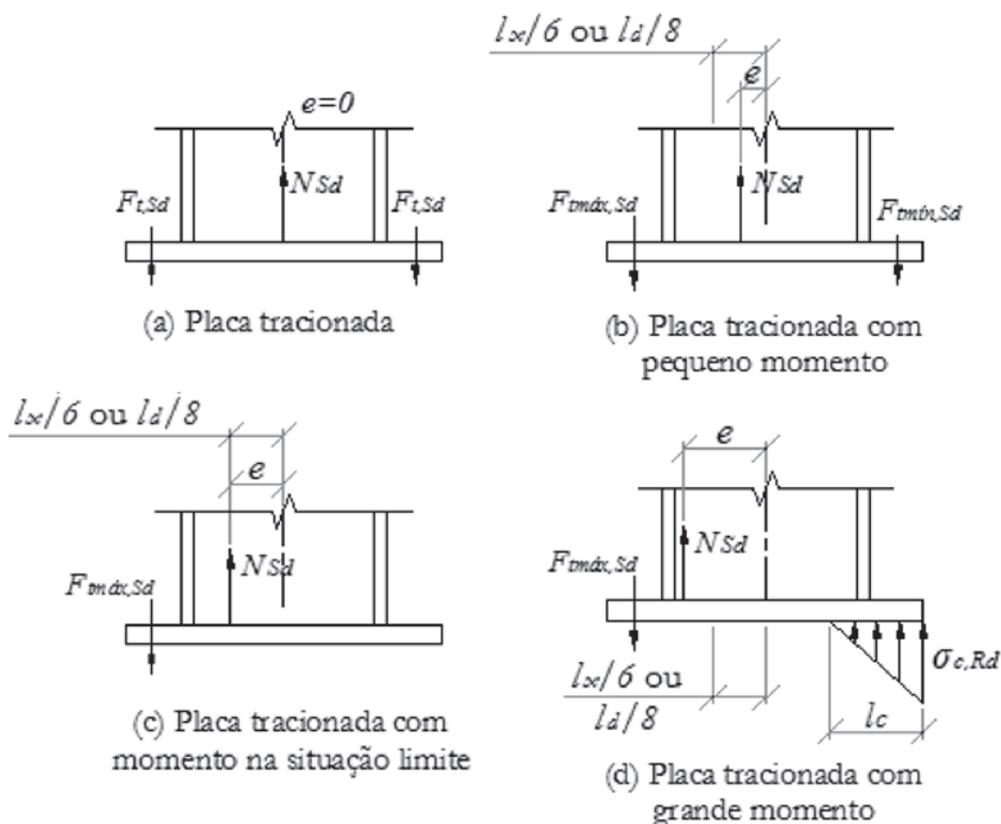


Figura 7

Comportamento de placas solicitadas por esforço axial de tração e momento fletor pela hipótese de distribuição linear de tensões de contato para placas de base retangulares

cálculo V_{Sd} da base mais comuns e abordados neste trabalho são: o atrito, o uso de barras de cisalhamento e o uso de chumbadores. Em relação à resistência ao cisalhamento do concreto, a ABNT NBR 16239:2013 [3] prescreve uma tensão resistente de cálculo $\sigma_{c,Rd}$ conforme a equação (42).

$$\tau_{c,Rd} = 0.2 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \leq 4 \text{ MPa} \quad (42)$$

A força de atrito/cisalhamento resistente de cálculo $V_{at,Rd}$ numa placa de base é calculada pela equação (43). Considera-se o coeficiente μ de atrito igual a 0,90 para placas de bases embutidas no concreto, 0,70 para placas assentadas diretamente na fundação e 0,55 para placas de base assentadas por meio de groute. Caso o atrito não seja suficiente para resistir totalmente aos esforços horizontais, deve-se utilizar outro mecanismo de transferência para esses esforços.

$$V_{at,Rd} = \mu \sigma_{c,Sd} l_c l_y \leq \tau_{c,Rd} l_x l_y \quad (43)$$

2.4 Dimensionamento de chumbadores

A força de tração resistente de cálculo $F_{t,Rd}$ de um chumbador é dada pela equação (44), onde f_{ub} é a resistência à ruptura referente ao material do chumbador, A_b é a área bruta do chumbador e γ_{a2} é o coeficiente de ponderação relativo ao estado limite último de ruptura do aço. Calcula-se o diâmetro d_b mínimo do chumbador tracionado pela equação (45).

$$F_{t,Rd} = 0.75 \frac{f_{ub} A_b}{\gamma_{a2}} \quad (44)$$

$$d_{b,min} = 1.3 \sqrt{\frac{F_{t,Sd}}{(f_{ub}/\gamma_{a2})}} \quad (45)$$

A força de cisalhamento solicitante de cálculo em cada chumbador é dada pela equação (46). O número de chumbadores n_v pode ser considerado como metade dos chumbadores da placa ou, caso se utilize arruelas soldadas à placa, como o total de chumbadores da placa de base. A força de cisalhamento resistente de cálculo $F_{v,Rd}$ de um chumbador é dada pela equação (47). Calcula-se o mínimo diâmetro d_b do chumbador necessário para resistir ao cisalhamento pela equação (48).

$$F_{v,Sd} = \frac{V_{Sd}}{n_v} \quad (46)$$

$$F_{v,Rd} = 0.4 \frac{f_{ub} A_b}{\gamma_{a2}} \quad (47)$$

$$d_{b,min} = 1.76 \sqrt{\frac{F_{v,Sd}}{(f_{ub}/\gamma_{a2})}} \quad (48)$$

Chumbadores sujeitos aos efeitos combinados de tração e cisalhamento devem obedecer à equação (49).

$$\left(\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1 \quad (49)$$

2.5 Dimensionamento de barras de cisalhamento

A transferência de esforço cisalhante se dá pela distribuição dessa força sobre a área da barra de cisalhamento em pressão de contato com o concreto. A força de cisalhamento resistente de projeto $V_{bc,Rd}$ na barra de cisalhamento é calculada pela equação (50). As variáveis são definidas na Figura 8. Calcula-se a área mínima da placa ($A_{bc,min} = b_v b_h$) pela equação (51).

$$V_{bc,Rd} = \sigma_{c,Rd} (b_v - e_n) b_h \quad (50)$$

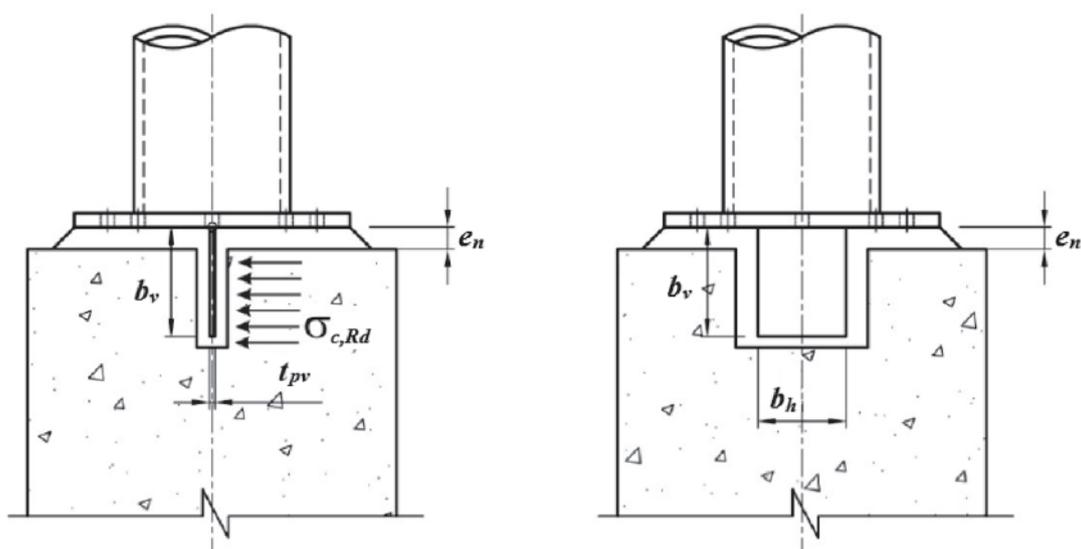


Figura 8
Base de pilar de aço com barra de cisalhamento

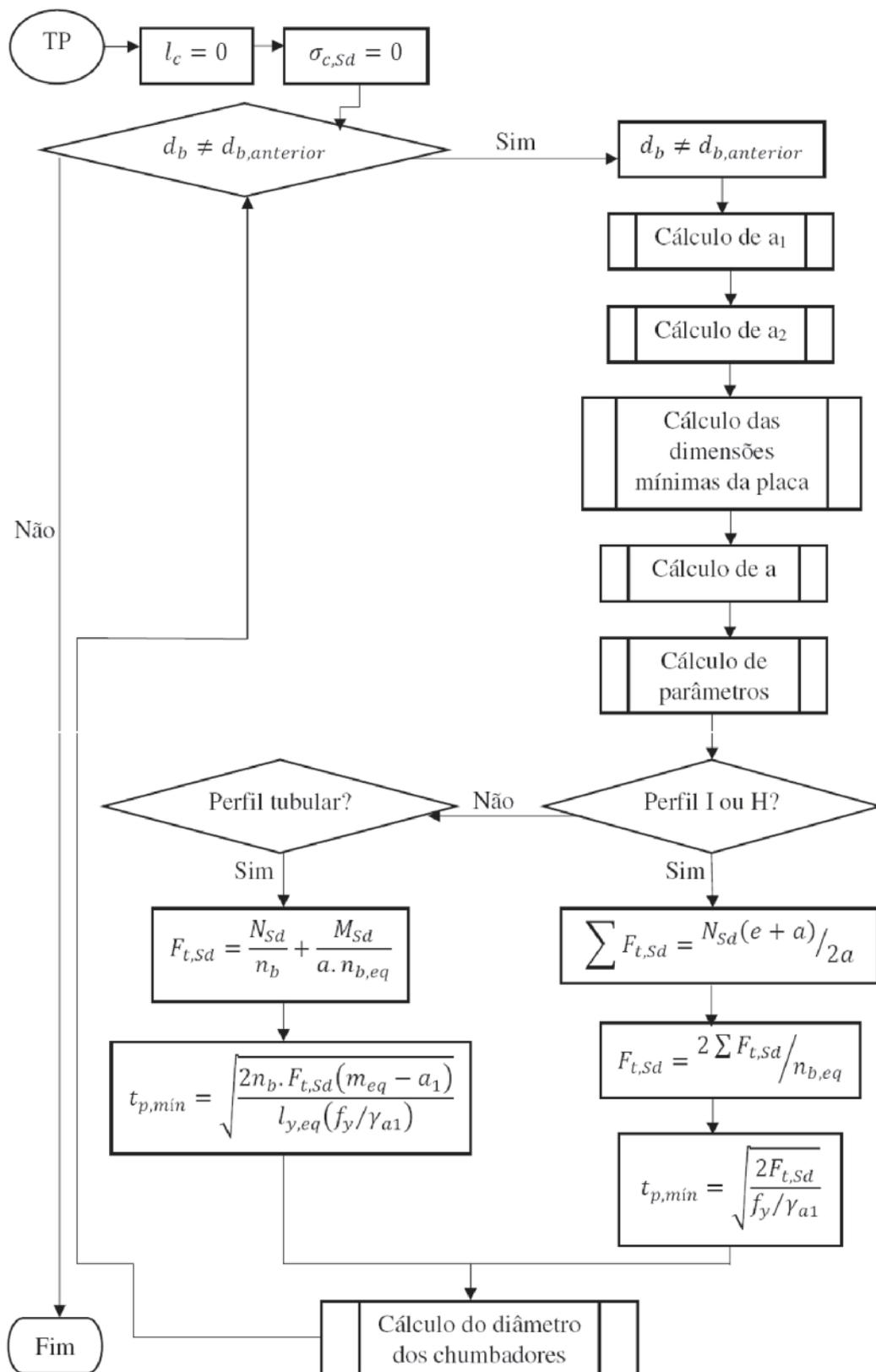


Figura 9
Fluxograma de bases tracionadas com pequeno momento

$$A_{bc,min} = \frac{V_{Sd}}{\sigma_{c,Rd}} \quad (51)$$

Calcula-se a espessura mínima da barra de cisalhamento pela equação (53). Para prevenir a flexão na placa de base devido à barra de cisalhamento, é recomendado que a placa de base tenha a espessura maior ou igual a barra de cisalhamento ($t_{bc,min} \leq t_{p,min}$).

$$t_{bc,min} = \sqrt{\frac{2 V_{Sd} (b_v + e_n)}{b_h (f_y / \gamma_{a1})}} \quad (52)$$

3. Metodologia

3.1 Implementação computacional

Para facilitar a implementação computacional, oito fluxogramas foram desenvolvidos, um abordando o arranjo da estrutura do programa e os outros contemplando o cálculo das bases: tracionadas, comprimidas, comprimidas com pequeno momento, tracionadas com pequeno momento, comprimidas ou tracionadas com grande momento, solicitadas por esforço cisalhante e por fim um fluxograma de cálculo dos chumbadores. O objetivo foi apresentar a sequência e a ordem dos principais cálculos necessários à implementação dos códigos. A título de ilustração, a Figura 9 apresenta o fluxograma de bases tracionadas com pequeno momento. A implementação computacional dos fluxogramas de cálculo foi realizada com a linguagem Visual Basic [6]. A ferramenta utilizada para o desenvolvimento do programa foi escolhida pela facilidade de elaborar a interface, de implementar os códigos e depurar er-

ros. Além disso, objetivou-se fornecer à comunidade acadêmica e profissional um programa de fácil acesso e entendimento.

3.2 Sobre o programa desenvolvido

O programa desenvolvido, denominado *BASE*, calcula placa de base, chumbadores e suas disposições na placa de base, barra de cisalhamento e dimensões mínimas para o elemento de concreto que receberá o pilar de aço. O programa desenvolvido possibilita a consideração das hipóteses de distribuição de tensões de contato tanto uniforme quanto linear e, de posse dos dados de entrada, o programa permite o dimensionamento das bases para casos de solicitação de: tração pura, compressão pura, tração com momento fletor e compressão com momento fletor. Adicionalmente, o programa inclui o dimensionamento de dispositivos de resistência ao cisalhamento.

Os dados de entrada do programa são:

- A geometria da placa de base (tipo de base, (a) e (e) da Figura 10 deve ser selecionado);
- Dimensões do perfil I, H ou tubular (o usuário pode escolher dentre os perfis cadastrados ou entrar com as dimensões, Figura 11);
- Esforços solicitantes de cálculo, Figura 12;
- Tipo do dispositivo de cisalhamento: barra de cisalhamento ou chumbador, Figura 12;
- A posição do plano de contato entre a placa e a superfície de concreto: abaixo (placas embutidas), coincidente (placas assentadas diretamente na fundação) ou acima da superfície de concreto (placas assentadas sobre groute), Figura 12;
- A resistência ao escoamento dos aços da placa de base e da barra de cisalhamento, a resistência à ruptura do aço dos

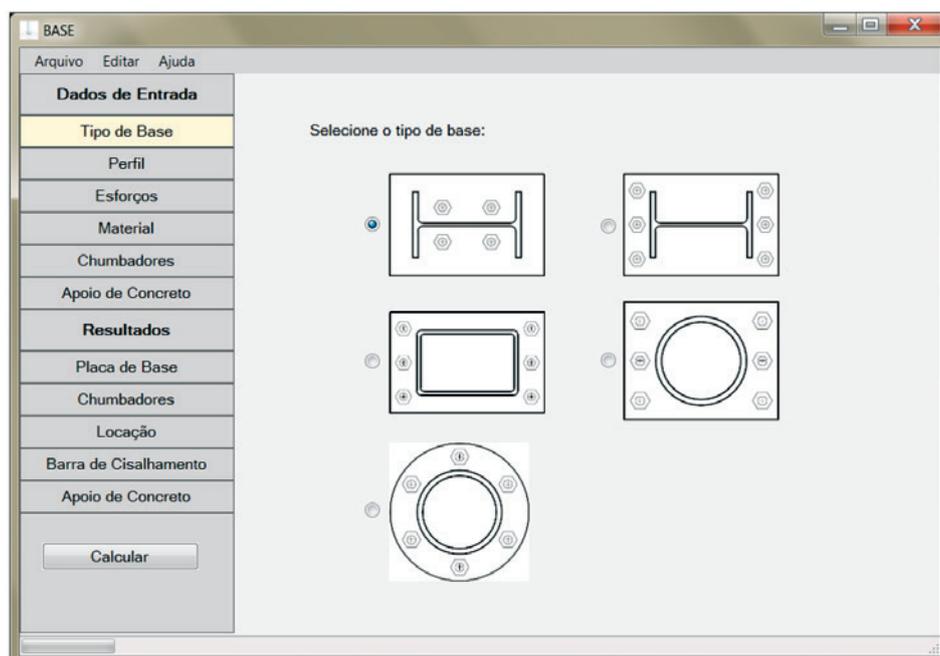


Figura 10
Janela de dados de entrada de escolha do tipo de base

- chumbadores e a resistência característica do concreto (pode-se escolher dentre os materiais cadastrados ou informar o valor da propriedade);
 - O número de chumbadores instalados e o tipo de chumbador (com dobra a 90° ou com placa de ancoragem na extremidade);
 - Grau do efeito de confinamento do concreto a ser considerado: ignorar o efeito, dimensionar a área de concreto considerando efeito máximo de confinamento ou entrar com as dimensões já existentes da área de concreto, Figura 13.
- Os dados de saída do programa são:

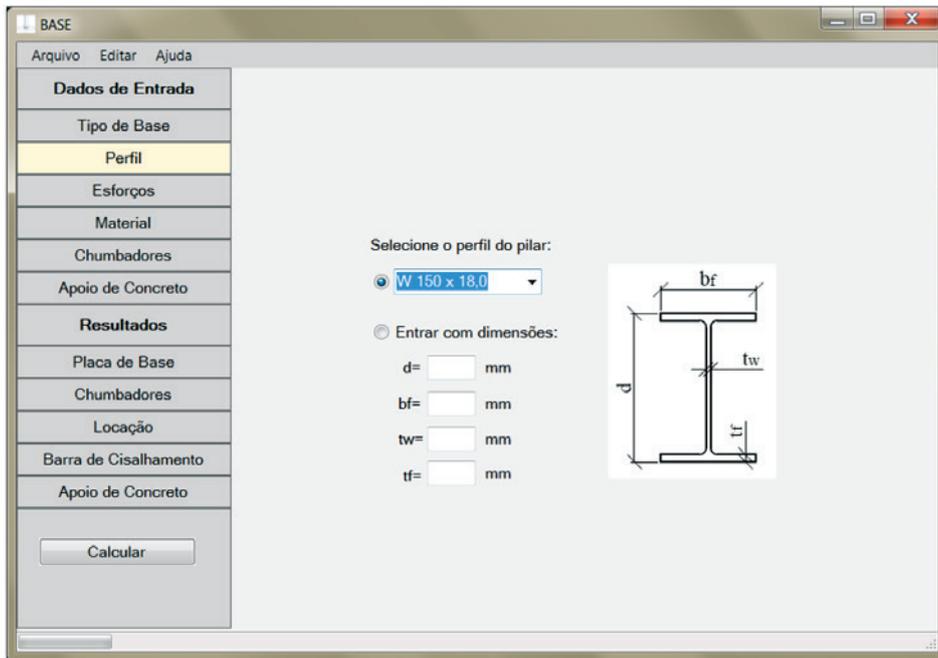


Figura 11
Janela de dados de entrada de escolha do perfil

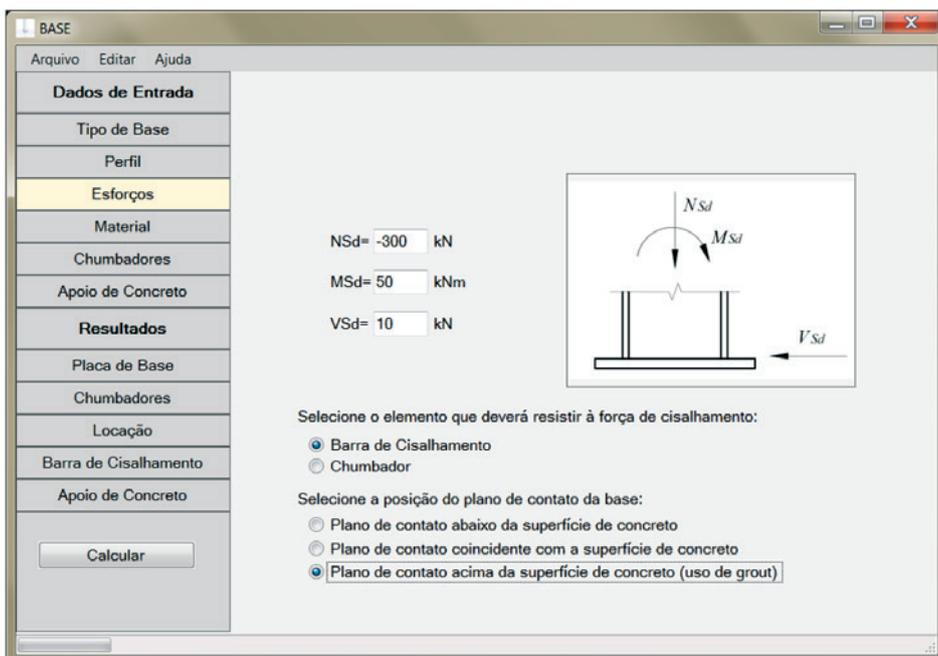


Figura 12
Janela de dados de entrada de esforços

- Dimensões da placa (espessura, largura e comprimento) calculadas e a sua massa em kg.
 - Diâmetro mínimo comercial e o comprimento do chumbador;
 - As dimensões da barra de cisalhamento;
 - As distâncias do centro do chumbador a borda da placa e ao centro do chumbador adjacente, Figura 14;
 - As dimensões mínimas em planta do apoio de concreto (dados fornecidos quando o usuário selecionar a opção de dimensionar apoio de concreto).
- Os dimensionais calculados pelo programa são os valores

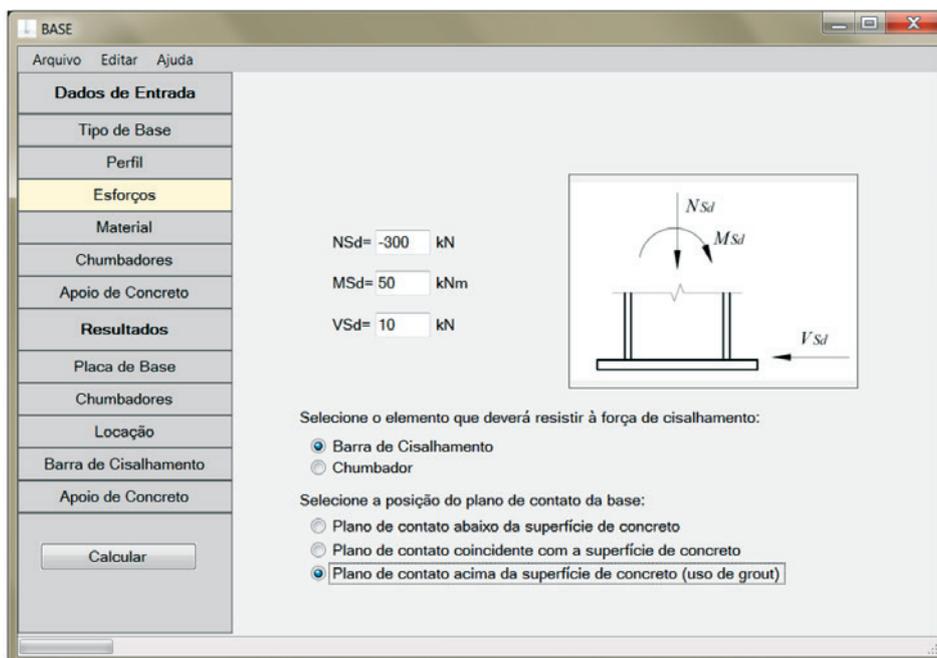


Figura 13
Janela de dados de entrada de apoio de concreto

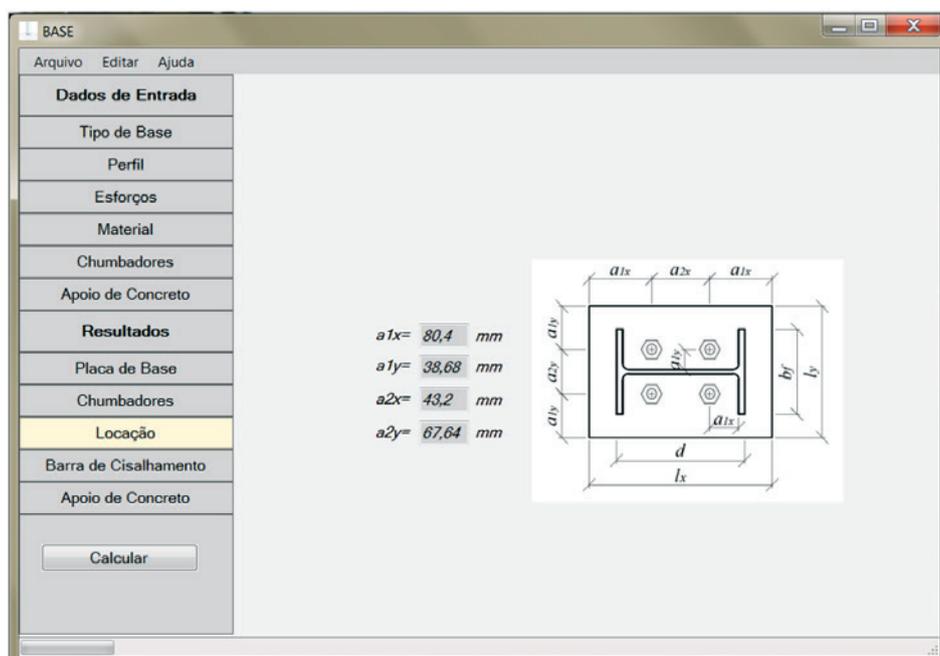


Figura 14
Janela de dados de saída de localização dos chumbadores

mínimos permitidos para que os elementos apresentem um dimensionamento seguro e, portanto, maiores dimensões podem ser adotadas pelo projetista.

Pretende-se, com o desenvolvimento desse programa, disponibilizar à comunidade uma ferramenta de fácil utilização e de acordo com as prescrições das normas brasileiras, além de possibilitar a comparação entre as hipóteses de distribuição de tensões de contato uniforme e linear.

3.3 Limitações do programa

A NBR 16239:2013 [3] limita o número de chumbadores em bases de pilares tubulares com placas retangulares entre quatro e oito e para placas circulares, entre oito e doze. Além disso, a maior dimensão da seção transversal do pilar tubular também é limitada em 510 mm. Evidentemente, como o programa utiliza a formulação da NBR 16239:2013 [3], não dimensiona bases de pilares tubulares que estejam fora dessas especificações.

Outras limitações do programa são:

- Não dimensiona placas de base com enrijecedores soldados à placa e ao pilar;
- Não dimensiona bases com momento fletor na direção do eixo de menor inércia do perfil do pilar;
- Considera os pilares centralizados na placa de base e a placa de base centralizada no elemento de concreto;
- Não considera o efeito do confinamento para o cálculo da resistência do concreto em placas comprimidas com momento fletor e para barras de cisalhamento;
- Não considera flexão nos chumbadores quando existem aruelas soldadas à placa de base;
- Quando há tração nos chumbadores nos tipos de base (b), (c) e (d) da Figura 2, não é verificado se as linhas de distribuição de tensão a 45° partindo do centro do chumbador interceptam o limite da placa de base.
- Não é abordado o caso de força axial solicitante de cálculo nula;
- O programa dimensiona apenas dois tipos de chumbadores: chumbadores com extremidade inferior com dobra a 90° ou com extremidade inferior com chapa ou porca.

3.4 Apresentação do programa

O acesso às janelas do programa se dá por meio da barra de dados de entrada e de resultados localizada à esquerda das telas. O usuário deverá inserir os dados nas abas de dados de entrada (abas “Tipo de Base”, “Perfil”, “Esforços”, “Material”, “Chumbadores” e “Apoio de Concreto”) e, depois de calcular a base, poderá visualizar os resultados nas abas de dados de saída (abas “Placa de Base”, “Chumbadores”, “Locação”, “Barra de Cisalhamento” e “Apoio de Concreto”). Para calcular a base, deve-se clicar no botão “Calcular” na parte inferior da barra de dados e selecionar qual será o método de cálculo utilizado (distribuição uniforme de tensões de contato ou distribuição linear de tensões de contato). A título de ilustração, as Figuras 10 a 14 mostram algumas das janelas do programa.

O programa possui um banco de dados com os perfis I laminados produzidos pela Gerdau Açominas e com os perfis tubulares produzidos pela V&M do Brasil sendo necessário apenas

selecionar a designação do perfil. O diâmetro do chumbador é calculado pelo programa e indicado em dimensões comerciais, respeitando um limite mínimo de 16mm.

Na janela “Apoio de Concreto” (Figura 13), o usuário decide se deseja considerar ou não o efeito do confinamento no concreto. Caso deseje considerar, deve informar se já existem dimensões definidas para a área de concreto que receberá a placa de base ou se deseja dimensioná-la. Caso o usuário deseje que o programa dimensione a área de concreto, será calculada uma área para a qual o efeito do confinamento forneça uma tensão resistente de cálculo do concreto máxima.

3.5 Validação do programa

Para que todos os procedimentos de cálculo relativos às diferentes solicitações abordadas no item 2 fossem validados, optou-se por resolver exemplos manualmente e compará-los com os resultados do programa *BASE*. Essa escolha se justifica devido a uma insuficiência de exemplos de dimensionamento de bases de pilares na literatura nacional. Além disso, o uso de exemplos da literatura internacional não seria ideal já que haveria divergências nos resultados devido às diferenças nos coeficientes de segurança, nas distâncias de locação e nos perfis empregados em pilares. Para elaboração dos exemplos resolvidos manualmente, os esforços solicitantes foram escolhidos de forma que um exemplo para cada tipo de solicitação fosse resolvido, ou seja, exemplos de compressão com pequeno e grande momento e tração com pequeno e grande momento foram resolvidos considerando as duas hipóteses de distribuição de tensões de contato uniforme e linear, conforme a Tabela 1. Todos os testes foram resolvidos para bases de pilares de perfis I ou H, com os parâmetros relativos aos materiais fixados: aço ASTM A36 para placas de base, chumbadores e barra de cisalhamento (quando utilizada) e concreto C20. Os exemplos consideraram quatro chumbadores por placa de base para todos os testes de validação.

A Tabela 1 apresenta a relação dos testes resolvidos com seus respectivos dados de entrada. A primeira coluna referencia os tipos de base de acordo com a Figura 2. A coluna “Efeito do Confinamento” informa a consideração sobre o efeito do confinamento: “não se aplica” (quando não se trata de um caso de compressão pura), “sim” (quando o efeito é considerado e as dimensões do elemento de concreto são fornecidas pelo usuário), “Ignorado” (quando não se deseja considerar o efeito) e “Dimensionar A2” (quando o usuário deseja considerar o efeito do confinamento e não tem dimensões do elemento de concreto pré-definidas).

Após a resolução dos testes no programa *BASE*, observou-se que praticamente não houve desvios entre os resultados manuais e do programa (os resultados dos testes podem ser observados na Tabela 1). Porém, os pequenos desvios ocorridos, da ordem de 0,01 %, podem ser esperados devido a arredondamentos dos cálculos manuais. Portanto, o programa foi considerado devidamente validado para placas de base de perfis I.

4. Resultados e discussões

Foram dimensionadas 200 bases de pilares de aço de seção I no programa desenvolvido, sendo as 100 primeiras bases solicitadas

por tração com momento e as 100 últimas por compressão com momento. O objetivo foi o de comparar os resultados do dimensionado de bases de pilares com momento fletor considerando as duas hipóteses, uniforme e linear, para distribuição das tensões de contato entre a placa e o elemento de concreto.

Todas as bases calculadas apresentavam as seguintes características em comum: tipo de base (b) da Figura 2, aço ASTM A36 para placas de base e chumbadores, concreto C20 e placa com quatro chumbadores. Dado a grande quantidade de informações a respeito das 200 bases de pilares calculadas, fica inviável a apresentação de todos os dados de entrada e saída. Por isso, na Tabela 2 foram selecionadas algumas das bases dimensionadas à tração com momento e apresentados os seus respectivos resultados. De forma análoga, a Tabela 3 mostra os dados de entrada e resultados de algumas das bases dimensionadas à compressão com momento. Adicionalmente, em ambas as tabelas são mostradas as respectivas diferenças percentuais das hipóteses de cálculo em relação ao método uniforme de distribuição de tensões. Bases solicitadas por esforço cisalhante não foram calculadas já que o procedimento de cálculo é o mesmo independente da hipótese considerada.

Algumas bases tracionadas com momento não forneceram valores de espessura t_p da placa. Observou-se que essa situação ocorreu sempre para a hipótese linear de distribuição de tensões. Ao se analisar melhor o dimensionamento dessas bases em par-

ticular, percebeu-se que todos esses casos se tratavam de bases tracionadas com grande momento e que o motivo para o qual o programa não retornava valores era porque a variável l_c que representa o comprimento de contato entre a placa e o concreto adquiria um valor negativo, o que é inconsistente, tratando-se de uma distância. Isso ocorreu pelo fator $(e-a)$ utilizado no cálculo de l_c ter dado negativo. Esses resultados apontam uma falha no procedimento de cálculo de bases tracionadas com grande momento e distribuição linear de tensões de contato, mostrando que a formulação para esse caso só é válida em bases com $e > a$.

Analisando os resultados das bases dimensionadas à compressão com momento, observaram-se também inconsistências na hipótese linear de distribuição de tensões. Apesar das inconsistências não terem sido apontadas tão claramente nos resultados como no caso das bases tracionadas com momento, observou-se que em alguns casos, a força nos chumbadores adquiria um valor negativo, ou seja, os chumbadores não estavam tracionados. Esse resultado é inconsistente, pois a base é considerada solicitada por compressão com grande momento e o fato de não haver tração nos chumbadores faz da base um caso de compressão com pequeno momento. A inconsistência não foi detectada nos resultados de espessura da placa de base, pois seu valor é dado pelo maior entre os valores determinados pelas equações (24) e (35), que verificam, respectivamente, a flexão na placa causada pela tração dos chumbadores e a flexão na placa causada pela

Tabela 1

Dados de entrada e de saída dos testes utilizados na validação do programa

Testes	Tipo de base	Perfil	Dados de entrada			Efeito confinamento	Dados de saída				Classificação
			Solicitação				Placas de base			Chumbadores	
			N_{sd}	M_{sd}	V_{sd}		l_x	l_y	t_p		
Teste 1	(a)	W250 x 73,0	-300	0	0	Não se aplica	253	254	25,7	22,0	Tração pura
Teste 2 ⁽¹⁾	(b)	W150 x 18,0	-300	10	0	Não se aplica	333	210	29,0	24,0	Tração + Peq. mom.
Teste 3 ⁽¹⁾	(b)	W150 x 18,0	-300	100	0	Não se aplica	527	437	35,9	36,0	Tração + Grande mom.
Teste 4	(a)	W200 x 15,0	300	0	0	Ignorado	227	130	10,6	16,0	Compressão pura
Teste 5	(a)	W200 x 15,0	300	0	0	Dimensionar A_2	200	128	11,4	16,0	Compressão pura
Teste 6 ⁽²⁾	(a)	W200 x 15,0	300	0	0	Sim	200	128	11,4	16,0	Compressão pura
Teste 7 ⁽¹⁾	(b)	W150 x 18,0	300	5	0	Não se aplica	277	142	18,2	16,0	Compressão + Peq. mom.
Teste 8 ⁽¹⁾	(b)	W150 x 18,0	300	7	0	Não se aplica	277	142	18,7	16,0	Compressão + Peq. mom.
Teste 9 ⁽¹⁾	(b)	W150 x 18,0	300	50	0	Não se aplica	366	242	33,1	16,0	Compressão + Grande mom.
Teste 10 ⁽³⁾	(a)	W200 x 15,0	300	0	100	Ignorado	227	130	10,6	16,0	Compressão pura + Cisalh.
Teste 11 ⁽⁴⁾	(a)	W200 x 15,0	-150	0	50	Não se aplica	200	142	18,2	19,0	Compressão pura + Cisalh.
Teste 12 ⁽⁵⁾	(b)	W150 x 18,0	300	10	0	Não se aplica	300	165	22,3	16,0	Compressão + Peq. mom.
Teste 13 ⁽⁵⁾	(b)	W150 x 18,0	300	50	0	Não se aplica	396	261	34,8	19,0	Compressão + Grande mom.
Teste 14 ⁽⁵⁾	(b)	W150 x 18,0	-300	10	0	Não se aplica	333	210	29,0	24,0	Tração + Peq. mom.
Teste 15 ⁽⁵⁾	(b)	W150 x 18,0	-300	100	0	Não se aplica	483	385	39,3	38,0	Tração + Grande mom.

⁽¹⁾ Exemplo considera a hipótese uniforme de distribuição de tensões de contato;
⁽²⁾ Exemplo considera como dados de entrada as dimensões para o bloco de concreto: $L_{x,bl} = 300$ e $L_{y,bl} = 250$;
⁽³⁾ Exemplo considera a utilização de barra de cisalhamento para resistir aos esforços horizontais;
⁽⁴⁾ Exemplo considera a utilização de chumbadores para resistir aos esforços horizontais;
⁽⁵⁾ Exemplo considera a hipótese linear de distribuição de tensões de contato.

pressão de contato. O valor negativo da força nos chumbadores também influenciaria no cálculo do diâmetro do chumbador, mas também não foram detectadas inconsistências, uma vez que o programa estabelece um diâmetro mínimo de 16mm.

Diante das inconsistências mencionadas acima, pode-se observar uma falha no procedimento de cálculo que considera a hipótese de distribuição linear de tensões tanto para bases tracionadas com grande momento, quanto para as comprimidas com grande momento. O procedimento de cálculo que considera a distribuição

de tensões linear classifica as bases em comprimidas com grande momento ou tracionadas com grande momento se $e > l_x/6$ para placas retangulares ou se $e > l_d/8$ para placas circulares. Analisando primeiramente o caso de compressão, classificar uma base como comprimida com grande momento significa considerar tração em parte dos chumbadores. Observe que o método não admite que a força com excentricidade equivalente possa estar fora do núcleo central de inércia sem solicitar os chumbadores, como ilustrado na Figura 15(a), criando um intervalo para o qual nem o procedimento

Tabela 2

Bases dimensionadas à tração com momento (amostra de resultados)

Dados de entrada				Resultados					
N°	Perfil	Solicitação		Hipótese	Placas de base			Chumbadores	
		N_{sd}	M_{sd}		I_x	I_y	t_p	d_b	L_c
1	W150x13,0	-25	30	Uniforme	311	192	24,24	20,0	240
				Linear	328	210	23,57	20,0	240
				Diferença %	-5,47%	-9,38%	2,76%	0,00%	0,00%
19	W200x26,6	-150	40	Uniforme	420	242	26,78	24,0	288
				Linear	420	242	26,82	24,0	288
				Diferença %	0,00%	0,00%	-0,15%	0,00%	0,00%
41	W250x25,3	-250	60	Uniforme	484	264	33,84	30,0	360
				Linear	484	264	33,85	30,0	360
				Diferença %	0,00%	0,00%	-0,03%	0,00%	0,00%
48	W250x25,3	-300	80	Uniforme	531	317	35,65	32,0	384
				Linear	531	317	35,66	32,0	384
				Diferença %	0,00%	0,00%	-0,03%	0,00%	0,00%
52	W310x21,0	-200	50	Uniforme	516	242	29,94	27,0	324
				Linear	516	242	29,94	27,0	324
				Diferença %	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
60	W360x57,8	-200	100	Uniforme	602	282	34,50	30,0	360
				Linear	602	282	34,57	30,0	360
				Diferença %	0,00%	0,00%	-0,20%	0,00%	0,00%
72	W410x38,8	-400	30	Uniforme	626	264	33,73	30,0	360
				Linear	626	264	33,73	30,0	360
				Diferença %	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
86	W530x72,8	-200	200	Uniforme	798	317	40,04	36,0	432
				Linear	809	333	39,10	36,0	432
				Diferença %	-1,38%	-5,05%	2,35%	0,00%	0,00%
97	W610x113,0	-400	150	Uniforme	882	317	41,41	36,0	432
				Linear	882	317	41,41	36,0	432
				Diferença %	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
100	W610x113,0	-1000	150	Uniforme	982	437	55,05	50,0	600
				Linear	982	437	55,05	50,0	600
				Diferença %	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

de compressão com pequeno momento, nem o de compressão com grande momento sejam aplicáveis. Ao classificar uma base como tracionada com grande momento, tensões de contato são consideradas em parte da placa. Observe que o método linear não admite que a força com excentricidade equivalente possa estar fora da região do núcleo central de inércia sem haver tensões de contato na placa, como ilustrado na Figura 15(b).

DeWolf e Bicker [7] apresenta um procedimento de cálculo para bases comprimidas com momento considerando a distribuição de

tensões linear. Diferentemente do procedimento apresentado por Fisher e Kloiber [2] e considerado neste trabalho, DeWolf e Bicker [7] consideram três magnitudes de momento fletor: pequeno, moderado e grande. Tal consideração parece ser mais adequada, visto que realmente se tratam de três configurações diferentes de placa de base: placa cujas tensões distribuídas de forma linear existem por toda a base, placa cujas tensões não se estendem por toda a base, mas os chumbadores não são solicitados e placas cujas tensões existem em apenas um trecho e há solicitação de

Tabela 3

Bases dimensionadas à compressão com momento (amostra de resultados)

Dados de entrada				Resultados					
N°	Perfil	Solicitação		Hipótese	Placas de base			Chumbadores	
		N_{sd}	M_{sd}		I_x	I_y	t_p	d_b	L_c
101	W150x13,0	25	30	Uniforme	311	192	25,29	19,0	228
				Linear	328	210	24,59	19,0	228
				Diferença %	-5,47%	-9,38%	2,77%	0,00%	0,00%
119	W200x26,6	150	40	Uniforme	357	175	24,03	19,0	228
				Linear	357	182	22,75	20,0	240
				Diferença %	0,00%	-4,00%	5,33%	-5,26%	-5,26%
141	W250x25,3	250	60	Uniforme	484	264	35,71	16,0	192
				Linear	442	203	28,30	20,0	240
				Diferença %	8,68%	23,11%	20,75%	-25,00%	-25,00%
148	W250x25,3	300	80	Uniforme	531	317	41,51	16,0	192
				Linear	477	238	33,09	22,0	264
				Diferença %	10,17%	24,92%	20,28%	-37,50%	-37,50%
152	W310x21,0	200	50	Uniforme	441	164	22,95	16,0	192
				Linear	442	164	22,27	19,0	228
				Diferença %	-0,23%	0,00%	2,96%	-18,75%	-18,75%
160	W360x57,8	200	100	Uniforme	546	219	30,85	22,0	264
				Linear	585	264	33,56	20,0	240
				Diferença %	-7,14%	-20,55%	-8,78%	9,09%	9,09%
172	W410x38,8	400	30	Uniforme	523	165	17,21	16,0	192
				Linear	523	165	19,40	16,0	192
				Diferença %	0,00%	0,00%	-12,73%	0,00%	0,00%
186	W530x72,8	200	200	Uniforme	751	264	37,94	27,0	324
				Linear	798	317	40,40	27,0	324
				Diferença %	-6,26%	-20,08%	-6,48%	0,00%	0,00%
197	W610x113,0	400	150	Uniforme	732	253	27,89	16,0	192
				Linear	746	253	26,72	16,0	192
				Diferença %	-1,91%	0,00%	4,20%	0,00%	0,00%
200	W610x113,0	1000	150	Uniforme	732	253	26,41	16,0	192
				Linear	759	280	27,28	16,0	192
				Diferença %	-3,69%	-10,67%	-3,29%	0,00%	0,00%

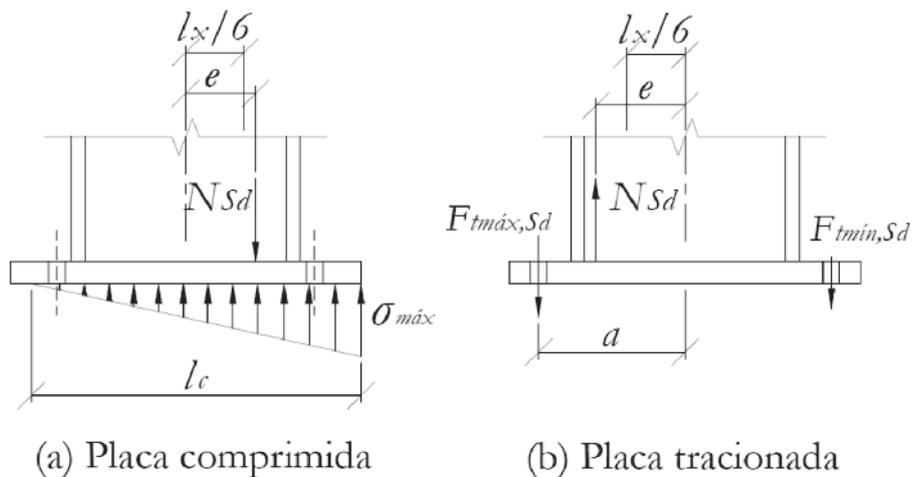


Figura 15
Bases em intervalo de excentricidade n\~ao coberto pela hip\~otese linear

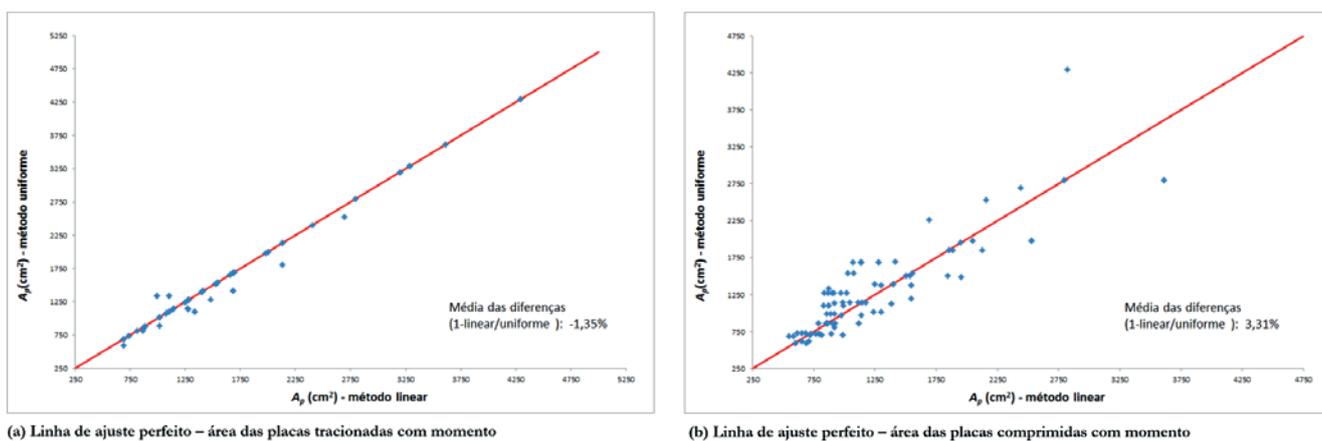


Figura 16
Gr\~afico da linha de ajuste perfeito para a \r{a}rea das placas de base

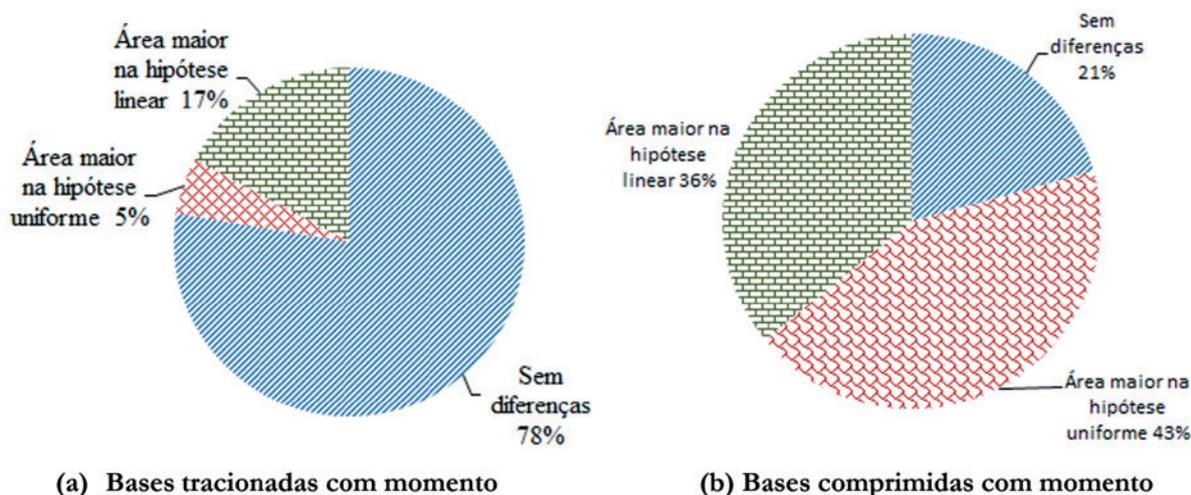


Figura 17
Compara\~ao entre os m\~etodos para o c\~alculo da \r{a}rea da placa de base

tração nos chumbadores. DeWolf e Bicker [7] consideram, para placas de base retangulares, que se $e \leq l_x/6$, a placa é solicitada por pequeno momento, se $l_x/6 < e \leq l_x/2$, por momento moderado e se $e > l_x/2$, por grande momento.

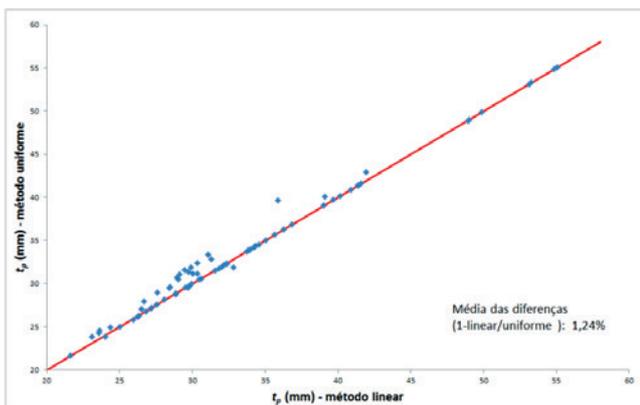
Entretanto, assumir que haja tração nos chumbadores assim que $e > l_x/2$, também trata-se de uma aproximação. A princípio, parece mais adequado considerar os três casos de magnitude de momento, mas impor como limite entre placas de momento moderado e grande, uma excentricidade que esteja relacionada com a tensão de contato resistente de cálculo do concreto, como é feito no método que considera a distribuição de tensões uniforme. Dessa forma, a placa passaria a ser solicitada por grande momento apenas quando a tensão de contato solicitante de cálculo do concreto atingisse o valor da resistente de cálculo, precisando dos chumbadores para manter o equilíbrio da placa de base.

Para comparar as hipóteses de dimensionamento foram traçados gráficos da linha de ajuste perfeito, Figuras 16 a 18, contemplando a análise das dimensões das placas de base, por meio da sua área e espessura, e dos chumbadores por meio do seu diâmetro. A média das diferenças percentuais indicada nos gráficos é dada em relação às dimensões obtidas pela hipótese uniforme, ou seja, se a média for positiva, significa que a hipótese uniforme apre-

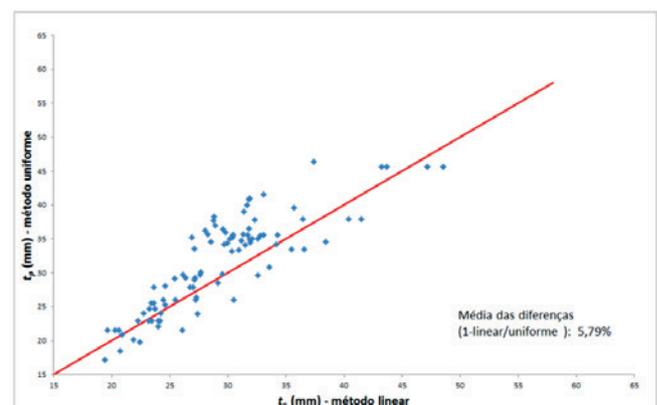
sentou um valor maior que a da hipótese linear, e vice e versa. As bases que tiveram seus resultados considerados inconsistentes foram desconsideradas. Assim, das 100 bases dimensionadas à tração com momento, 76 foram analisadas e das 100 dimensionadas à compressão com momento, 92 foram analisadas.

Analisando os gráficos da Figura 16 sobre a área das placas de base, percebe-se que, as bases tracionadas com momento apresentam uma menor dispersão no valor da área, ou seja, as hipóteses, uniforme e linear, fornecem resultados mais próximos dos que aqueles observados nas bases comprimidas com momento. Isso porque, nas bases tracionadas, só há diferença entre as metodologias quando existem tensões de contato entre a placa e o concreto (bases tracionadas com grande momento). Já nas bases comprimidas, existem tensões de contato em ambos os casos, bases comprimidas com pequeno momento e com grande momento. No caso das bases tracionadas com momento, a hipótese linear garantiu maior área com uma média das diferenças percentuais igual a -1,35%, já no caso das bases comprimidas com momento, a hipótese uniforme garantiu maior área com uma média percentual igual a 3,31%.

Analisando o caso de bases tracionadas com momento, na Figura 17, em 78% das bases, não houve diferença entre os métodos no



(a) Linha de ajuste perfeito - espessura das placas tracionadas com momento



(b) Linha de ajuste perfeito - espessura das placas comprimidas com momento

Figura 18

Gráfico da linha de ajuste perfeito para a espessura das placas de base

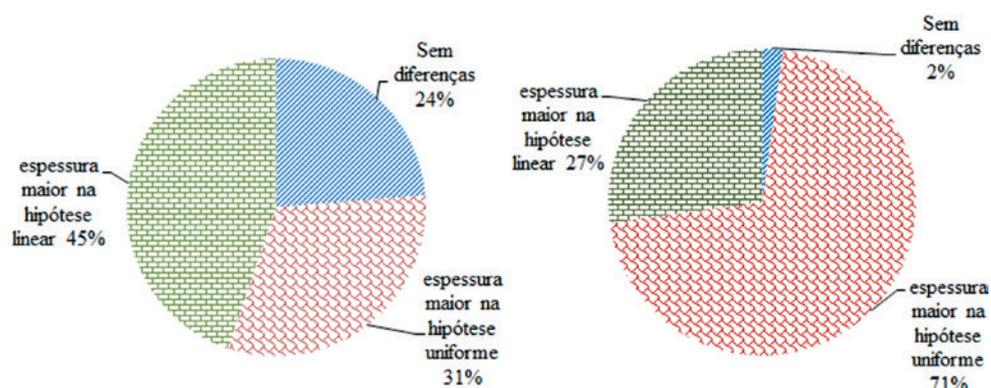


Figura 19

Comparação entre os métodos para o cálculo da espessura da placa de base

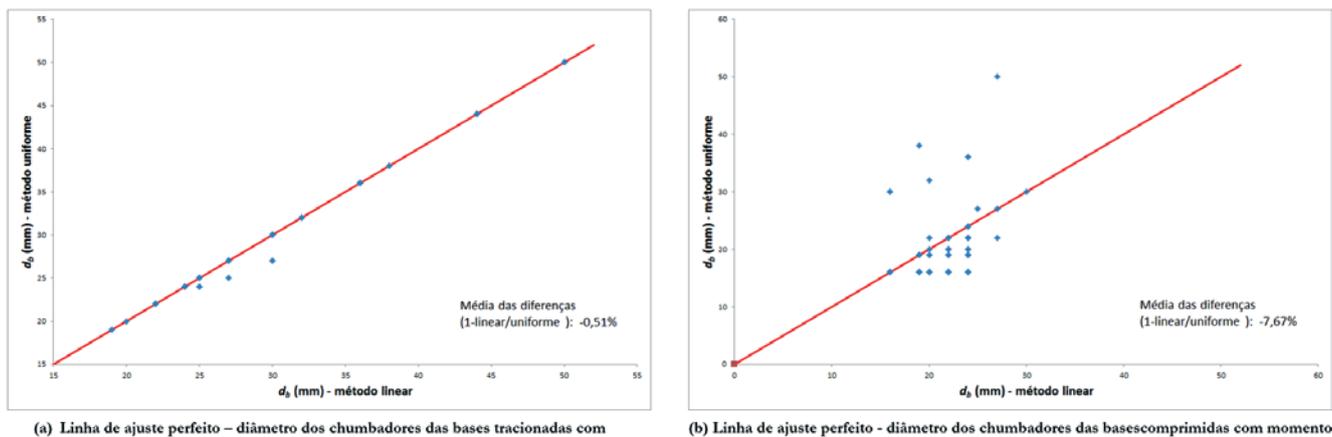


Figura 20
Gráfico da linha de ajuste perfeito para o diâmetro dos chumbadores

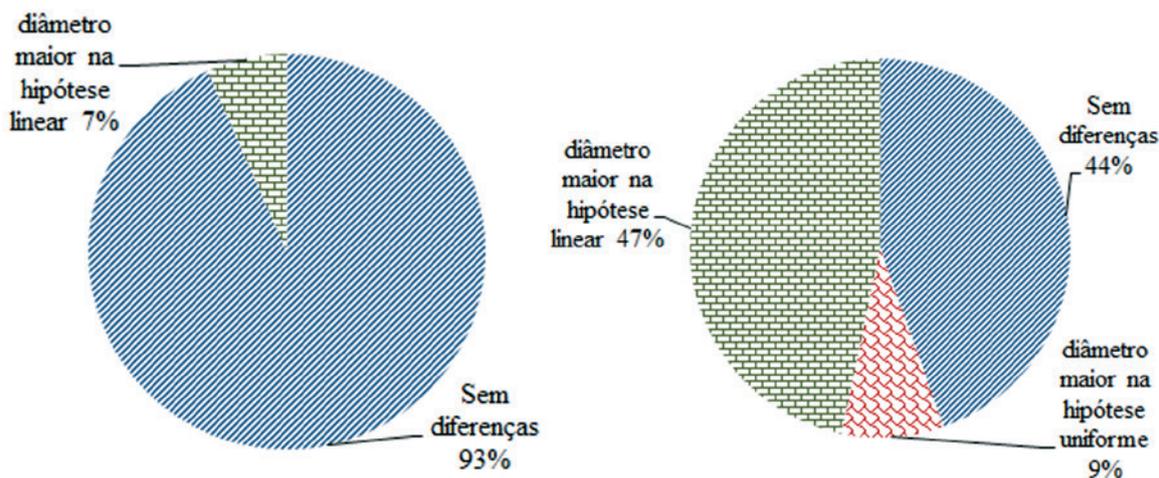


Figura 21
Comparação entre os métodos para o cálculo dos chumbadores

valor das áreas calculadas, por isso uma grande parte dos pontos do Figura 16(a) estão em cima da linha de ajuste perfeito e também possivelmente há pontos sobrepostos, com o mesmo valor de área. No caso de bases comprimidas com momento, apenas 21% das bases (Figura 17) apresentaram o mesmo valor de área em ambos os métodos, por isso menos pontos estão sobre a linha de ajuste perfeito, Figura 16(b). A hipótese linear garantiu maior área (17% das bases) para as bases tracionada se, no caso das bases comprimidas, a hipótese uniforme garantiu maior área (43% das bases).

Analisando os gráficos da Figura 18 sobre a espessura das placas de base, em ambas as bases, tracionadas e comprimidas com momento, a hipótese de distribuição uniforme forneceu maior valor para a espessura das placas de base, com a média das diferenças percentuais maior nas bases comprimidas, igual a 5,79 % contra 1,24% nas bases tracionadas. Portanto, houve também maior dispersão entre as metodologias nas bases comprimidas com momento. Ao se analisar a Figura 19, nota-se que em apenas 24 %

das bases tracionas e em 2% das bases comprimidas, as duas metodologias forneceram resultados idênticos. A hipótese linear garantiu maior espessura em 45% das bases tracionadas e, no caso das bases comprimidas, a hipótese uniforme garantiu maior espessura em 71% das bases.

Analisando os gráficos da Figura 20 sobre o diâmetro dos chumbadores, pode-se notar que existem poucos pontos nesses gráficos porque os diâmetros calculados são apresentados em dimensões comerciais, o que faz com que haja pontos sobrepostos, uns sobre os outros. Para as bases tracionadas com momento, praticamente não houve diferença entre os métodos, a média das diferenças percentuais foi de apenas -0,51%. O gráfico da Figura 21 mostra que em 93% das bases tracionadas não houve diferença entre as metodologias, porém, nos 7% em que houve, notou-se um diâmetro maior para o método linear. Para as bases comprimidas com momento, a hipótese linear garantiu maior diâmetro dos chumbadores: a média das diferenças percentuais foi de -7,67% e em 47% das bases comprimidas a hipótese linear forneceu maior

resultado. Em 45% das bases comprimidas, não houve diferença entre as metodologias.

Fisher e Kloiber [2] disseram que o uso do método de distribuição linear de tensões fornece placas de base mais espessas e chumbadores menores do que no método uniforme. Entretanto, os resultados obtidos ao dimensionar bases no programa mostraram justamente o contrário: para o método de distribuição linear de tensões, as placas apresentaram menores dimensões e os chumbadores, maiores dimensões em relação ao método uniforme.

5. Conclusões

Neste trabalho, foi desenvolvido um programa para cálculo de bases de pilares, denominado *BASE*, que aborda duas metodologias de dimensionamento distintas em relação à consideração da distribuição das tensões de contato, uniforme e linear. Esse programa foi devidamente validado por um número considerável de exemplos resolvidos manualmente para os diversos casos de esforços solicitantes abordados. O programa apresentou-se como uma ferramenta muito útil e versátil na automação do dimensionamento de bases de pilares.

As inconsistências observadas em alguns dos resultados e mencionadas na discussão dos resultados apontaram um intervalo, entre pequena e grande excentricidade, para o qual o procedimento de cálculo que considera a distribuição linear de tensões não é apropriado.

Em relação à comparação entre as duas hipóteses de distribuição de tensões, os resultados apresentaram menor dispersão nos casos de bases tracionadas com momento, sendo a média das diferenças percentuais de -1,35% e 1,24% para a área e espessura da placa de base, respectivamente, e -0,51% para o diâmetro dos chumbadores. Essa menor dispersão ocorreu porque os procedimentos de cálculo dessas bases só diferem para o caso de grande excentricidade, enquanto nas bases comprimidas com momento, os procedimentos diferem para ambos os casos, ou seja, excentricidade pequena e grande. As bases comprimidas com momento apresentaram maior média das diferenças percentuais entre as hipóteses, sendo 3,31% para a área e 5,79% para espessura das placas de base, e -7,67% para o diâmetro dos chumbadores.

A existência de um intervalo para o qual a distribuição linear de tensões não é apropriada somada a baixa média das diferenças percentuais no intervalo onde as duas hipóteses foram comparadas, faz da hipótese de distribuição uniforme de tensões a melhor aproximação a ser utilizada no dimensionamento de bases de pilares de aço.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, FAPES e PPGEC/UFES, pelo apoio para a realização desta pesquisa.

7. Referências bibliográficas

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- [2] FISHER, J.M.; KLOIBER, L.A. Steel design guide 1: Base plate and anchor rod design. 2. ed. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2006.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16239: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. Rio de Janeiro, 2013.
- [4] BELLEI, I. H. Interfaces aço-concreto. Rio de Janeiro: 2006.
- [5] BAIÃO FILHO & SILVA, 2006. Ligações para Estruturas de Aço. Guia Prático para Estruturas com Perfis Laminados. 3ª Ed. São Paulo: GERDAU Açominas.
- [6] VISUAL BASIC 2010 EXPRESS, Microsoft Visual Studio 2010.
- [7] DEWOLF, J.T; BICKER, D.T. Steel design guide series 1: Column base plates. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1990.