



2023

Dimensionamento de Bases de Colunas de Aço de Perfil I ou H conforme as Normas Brasileira e Americana

Pedro Henrique Sichinel Carneiro^a, Christiane Areias Trindade^b

^a Aluno de Graduação em Engenharia Civil, pedro.sichinel@ufms.br

^b Professor Orientador, titulação, christiane.trindade@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

O uso crescente de estruturas metálicas no cenário industrial e residencial é atribuído à sua rapidez e versatilidade construtiva. Entretanto, o projeto destas estruturas requer conexões precisas e atenção nos mínimos detalhes, especialmente ao transferir esforços dos pilares para a fundação. Neste trabalho realizou-se uma ampla revisão bibliográfica para simplificar o entendimento e resumir os parâmetros utilizados no dimensionamento das chapas de base de colunas metálicas. Comparou-se a norma brasileira NBR 8800 e a americana AISC -SDG 1, além de sintetizar os métodos de cálculo mediante os estudos publicados por Bellei (2009) do Centro Brasileiro de Construção em Aço (CBCA) e reunir e discutir trabalhos experimentais publicados, buscando complementar os restritos acervos disponíveis e auxiliar projetistas no dimensionamento estrutural da conexão dos pilares metálicos com a fundação. Concluiu-se que as normas brasileiras são carentes de instruções e equações destinadas ao dimensionamento destes elementos estruturais, enaltecendo a dependência de manuais de construção como os publicados pelo CBCA, das normas estrangeiras e de trabalhos executados como este que resume e sintetiza as principais equações e formulações no estado limite para dimensionar e detalhar a execução e montagem das chapas de base e chumbadoes.

Palavras – chave: pilar metálico; coluna metálica; chapa de base metálica; compressão; tração; momento fletor; tensão; resistência.

ABSTRACT

The increasing use of metal structures in industrial and residential settings is attributed to their speed and construction versatility. However, the design of these structures requires precise connections and attention to the smallest details, especially when transferring forces from the columns to the foundation. This work involved an extensive literature review to simplify understanding and summarize the parameters used in the design of metal column base plates. The Brazilian standard NBR 8800 and the American AISC - SDG 1 were compared, in addition to synthesizing calculation methods based on studies published by Bellei (2009) from the Brazilian Steel Construction Center (CBCA). Experimental studies were gathered and discussed to complement the limited available resources and assist designers in the structural design of the connection between metal columns and the foundation. It was concluded that Brazilian standards lack instructions and equations for the design of these structural elements, highlighting the reliance on construction manuals such as those published by CBCA, foreign standards, and works like this one that summarize and synthesize the main equations and formulations for dimensioning and detailing the execution and assembly of base plates and anchor bolts.

Keywords: metal column, metal pillar, metal base plate, compression, tension, bending moment, stress, strength.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de adotar novas técnicas construtivas, mais práticas, rápidas, seguras e sustentáveis é o que faz a engenharia continuar seguindo o caminho da modernização. A construção de estruturas metálicas

vem crescendo paulatinamente no cenário industrial e residencial, devido à rapidez, praticidade e possibilidades construtivas que engloba. “Esse montante levou a um crescimento de 13,2% no faturamento das empresas: o levantamento mostra faturamento de 16,2 bilhões de reais em 2022 ante 14,3 bilhões em 2021, 10,4 bilhões em 2020, 7,1

bilhões em 2019 e 5,1 bilhões em 2018” (CBCA, 2023). Entretanto, o design de estruturas metálicas demanda a implementação de conexões tanto entre os elementos internos da própria estrutura metálica quanto com as fundações. Nesse contexto, um detalhamento preciso e eficiente dessas conexões é de suma importância no projeto.

A conexão que liga um pilar à fundação é feita, em geral, com auxílio de chapas de base e chumbadores. Como afirma Targowski et al. (1993), os estudos deste tipo de ligação eram pouco realizados no passado, resumindo-se principalmente a modelos elásticos de comportamento. Apenas em 1999, com Elkin e Drake, que uma metodologia para cálculo de bases engastadas veio a ser publicada. Esse trabalho foi base para o estudo de Fisher e Kloiber (2006), que é referência para a norma americana até hoje. (ROCHA, 2022).

À medida que o mercado de construção em estruturas de aço convencional vem crescendo, os projetos estruturais devem corresponder a esta demanda, em termos de verificações de segurança, estudos de cargas e clareza na leitura. Entretanto, projetistas carecem da falta de parâmetros pelas normas de regulamentação, o que caminha em sentido oposto aos estados de segurança das edificações.

Desta maneira, o objetivo deste trabalho é identificar as condições atuais das normatizações brasileira e americana que especificam diretamente o dimensionamento da base de colunas de aço, e apresentar métodos de dimensionamento e estudos recentes, visando organizar procedimentos para cálculo e detalhamento de bases de colunas submetidas a combinações de carga axial e momento aplicados.

2. BASES DE PILARES METÁLICOS

As placas de base são elementos de aço que conectam e fixam os pilares na fundação, garantindo estabilidade, rigidez e, principalmente, transferindo os esforços solicitantes da superestrutura para a infraestrutura. Podem ser retangulares ou circulares, rotuladas ou engastadas, capazes de resistir forças de tração e compressão axiais e momentos fletores em uma ou duas direções. Os chumbadores em formato de gancho ou retos, usualmente posicionados afastados da linha central da chapa, têm como função estabilizar a coluna e fixarem-se na base do bloco (DEWOLF & RICKER, 1990 apud MINCHILLO, 2003).

Pode-se identificar na figura 1 a representação dos elementos de base que promovem a transmissão de

esforços da superestrutura para a infraestrutura. O pilar metálico é soldado na placa de base que promove a conexão entre as colunas e os blocos de coroamento. Esta chapa de base, por sua vez, é fixada no bloco de concreto com o auxílio dos chumbadores, elementos que garantem a ligação entre a chapa e o bloco de concreto.

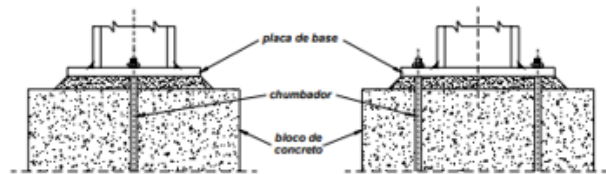


Figura 1 – Elementos da conexão do pilar com a fundação.

Fonte: Martins (2002).

As bases de pilares metálicos estão sujeitas a dois esforços usuais: esforço normal axial e momento fletor, uni ou bidirecional. Na figura 2 são elucidados os principais casos de carregamento incidentes em chapas de base de pilares metálicos. Diante de cada combinação, há cálculos e considerações distintas necessárias para o detalhamento em projeto.

No caso da figura 2(a), no qual a placa recebe um carregamento vertical de compressão que passa pelo seu eixo, geralmente não há necessidade de chumbadores para a transferência de esforços, entretanto, fazem-se necessários na fase de montagem, para garantir a estabilidade e verticalidade do pilar, mesmo que sua resistência seja desconsiderada. Quanto menor a magnitude da força axial, mais as dimensões da chapa assemelham-se às do pilar.

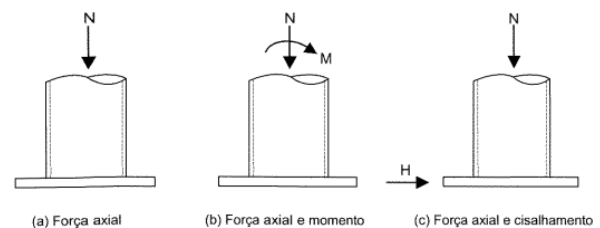


Figura 2 – Carregamentos de chapa base.

Fonte: Minchillo (2003).

Para o caso da figura 2(c), além do carregamento axial, há a presença de uma força horizontal, causando cisalhamento no elemento. Usualmente, esta solicitação é resistida pelo atrito e pelos chumbadores. Entretanto, ao tratar de barras rígidas, é indicado o uso de chapas de placas de cisalhamento no mesmo

sentido que os chumbadores, conforme identificado pela figura 3.

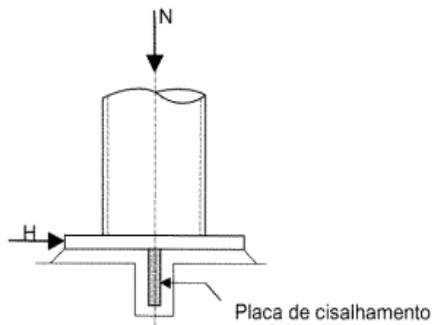


Figura 3 – Chapa metálica com placa de cisalhamento.

Fonte: Dewolf e Ricker apud Minchillo (2003).

Por fim, no caso da figura 2(b), há carregamento axial somado a momento fletor aplicado na base do pilar. Esta solicitação é a mais comum em edificações. Dependendo da excentricidade da força de compressão ou tração atuante, é recomendado o uso de enrijecedores para garantir a segurança da construção.

Quando há carga de tração ou momento fletor, faz-se necessário utilizar chumbadores, em formato de gancho ou retos, usualmente posicionados afastados da linha central da chapa, e que têm como função estabilizar a coluna e fixar na base do bloco. Estes elementos podem ter vários formatos, conforme ilustrado na Figura 4, tais como barra redonda rosqueada com gancho semicircular, parafuso com cabeça embutida no bloco de concreto e barra circular reta. Ao serem embutidos, deve-se atentar ao cobrimento e a profundidade mínima recomendados de acordo com as dimensões do bloco de concreto e o pilar, conforme será discutido ao decorrer do trabalho.



Figura 4 – Chumbadores de Chapa Base.

Fonte: Martins (2002).

3. METODOLOGIA

Visando facilitar o entendimento e sintetizar os parâmetros utilizados para o dimensionamento da

base de colunas metálicas, fez-se uma revisão bibliográfica de trabalhos e publicações que tratam sobre o tema.

Com auxílio da literatura nacional e sites de pesquisa como o Google Acadêmico, foi feito um breve relatório de trabalhos publicados desde os anos 1960 até a atualidade, com tema acerca do dimensionamento das chapas metálicas, e como se desenvolveram com o passar do tempo. A seguir, foram reunidas as especificações das normas brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008) e americana AISC -Steel Design Guide 1 (FISHER & KLOIBER, 2006).

Em sintonia, foram organizados os procedimentos de cálculo e orientações das normas e autores consultados, correlacionando com os apresentados por Bellei (2009) em sua publicação pelo Centro Brasileiro da Construção em Aço, CBCA, que é referência para manuais orientativos de dimensionamento no Brasil.

Por fim, foram reunidos e discutidos trabalhos experimentais publicados e seus resultados, visando uma abordagem mais precisa e correlacionando as equações de dimensionamento diante esforço axiais de compressão, tração e momento fletor nos eixos de maior e menor inércia do pilar.

4 ESFORÇOS ATUANTES EM BASES DE PILARES

Conforme Pimenta et al. (2010), o comportamento das ligações das placas de base pode ser esquematizado nos seguintes casos.

A Figura 5 e 6 a seguir representam o comportamento da placa de base e dos chumbadores, respectivamente, diante de um carregamento axial de compressão e de tração, isto é, sem excentricidade ou momento fletor aplicado.

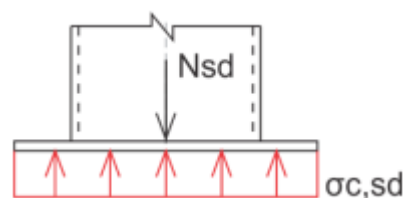


Figura 5 – Esforço de compressão axial centrado na coluna.

Fonte: Bahia e Ikeda (2016)

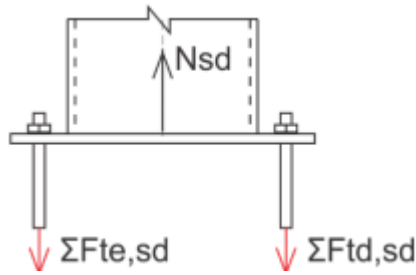


Figura 6 – Esforço de tração centrado atuante no pilar.

Fonte: Bahia e Ikeda (2016)

Ao aplicarmos este mesmo carregamento com a excentricidade pequena, isto é, $e < a$, onde a é a distância entre o eixo do chumbador e do pilar (identificado pela Figura 9), temos o seguintes comportamentos e distribuição de forças da placa de base e dos chumbadores, representados pelas Figuras 7 e 8, respectivamente.

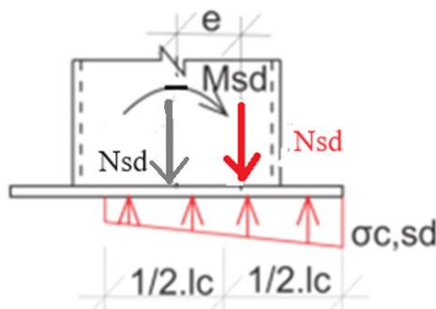


Figura 7 – Carga de compressão com excentricidade pequena.

Fonte: Bahia e Ikeda (2016)

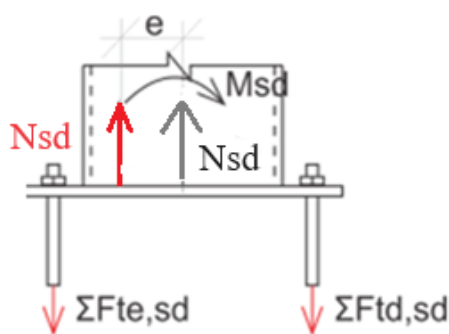


Figura 8 – Carga de tração com excentricidade pequena.

Fonte: Bahia e Ikeda (2016)

Por fim, ao considerarmos uma força de compressão aplicada com excentricidade elevada, $e > a$. Deve-se considerar o esforço de tração dos chumbadores no dimensionamento, conforme identificado pelas Figuras 9 e 10.

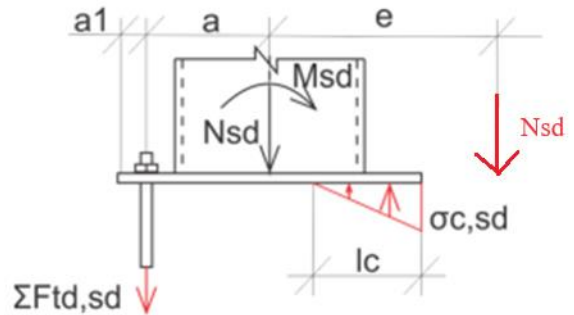


Figura 9 – Compressão aplicada na chapa de base com excentricidade elevada.

Fonte: Bahia e Ikeda (2016)

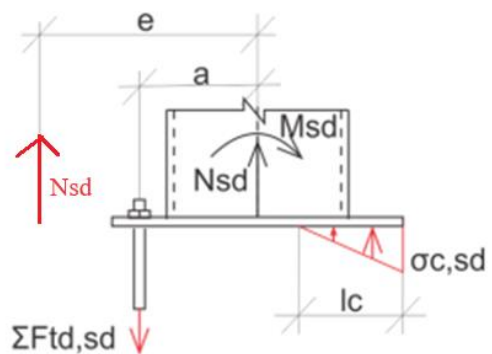


Figura 10 – Tração aplicada na chapa de base com excentricidade elevada.

Fonte: Bahia e Ikeda (2016)

5. NORMAS

Quando se trata dos parâmetros definidos pela ABNT, há inúmeras considerações a se fazer, desde o carregamento aplicado nas chapas de base até a especificação do dimensionamento. Assim, este item visa a análise das normas brasileiras, americanas e europeias.

Atualmente, os trabalhos e inovações são de suma importância para trabalhar com as chapas de base de pilares metálicos, já que norma NBR 8800 (ABNT, 2008), que aborda o projeto e a construção de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto em edifícios, não abarca todas as necessidades e condições para projeto de bases de pilares, e direciona o leitor para os estudos e formulações de Fisher e Kloiber (2006). Paralelamente, a NBR 16239 (ABNT, 2013) define as equações e limites para bases de pilar tipo tubulares, ainda com desfalque no que envolve as placas de conexão.

Nas diretrizes americanas pode-se notar constante modernização das orientações destes elementos

estruturais. O SDG 1 (FISHER e KLOIBER, 2006), publicado pela American Institute of Steel Construction é um exemplo. O SDG 1 é respaldado pelos estudos e definições de Fisher e é amplamente utilizado como referência, desde a indicação como referência pela NBR 8800, até mesmo no uso em softwares para projeto e análise do comportamento das chapas e chumbadores.

Fisher e Kloiber (2006) no SDG-1 apresentam as formulações considerando dimensionamento em estados limites últimos (com sigla em inglês LRFD - load and resistance factor design) e considerando dimensionamento em tensões admissíveis (com sigla em inglês ASD – allowable stress design), pois a norma americana permite que o projeto seja feito considerando qualquer um dos dois métodos.

O método dos estados limites utiliza uma ponderação racional, majorando as ações conforme sua natureza e minorando as resistências conforme as características de cada material. O método das tensões admissíveis não majora as ações, mas considera um fator de segurança reduzindo as tensões resistentes, que ficam denominadas tensões admissíveis. O método das tensões admissíveis deixou de ser utilizado na maioria das normas brasileiras relacionadas a projetos de estruturas, que foram atualizadas ao longo das décadas de 1980 e 1990, passando a adotar o método dos estados limites.

A NBR 8800 (ABNT, 2008) direciona o leitor para a consulta ao SDG 1 de Fisher e Kloiber, mas, apesar disso, o método base da norma brasileira é o método dos estados limites. Assim, a utilização do SDG 1, indicada pela NBR 8800 (ABNT, 2008) deve ser feita considerando o dimensionamento denominado LRFD no SDG 1.

6. DIMENSIONAMENTO DE PLACAS DE BASE E CHUMBADORES

O dimensionamento das placas de base e dos chumbadores é essencial para a elaboração de projetos e detalhamentos, a fim de suportar os esforços atuantes da estrutura geral e garantir rigidez, estabilidade e segurança. Assim sendo, serão apresentados nos itens a seguir, o dimensionamento de chumbadores e chapas de base, a partir das orientações das normas americana e brasileira, organizados conforme o Manual do CBCA de autoria de Bellei (2009).

Bellei (2009) apresenta dois métodos: Método NBR 8800 e o Método AISC-ASD. O que Bellei denomina Método NBR 8800, apesar de não constar na referida norma, é o método LRFD da Norma Americana, e traz

exatamente as mesmas formulações para o LRFD que estão presentes no SDG-1 (Fisher e Kloiber, 2006). O método AISC-ASD é apresentado por Bellei (2009) com as mesmas formulações do SDG-1 de Fisher e Kloiber (2006).

A escolha de basear a apresentação do dimensionamento na publicação de Bellei (2009) vem do fato que, além de estar em língua portuguesa, essa publicação tem organização mais clara e de mais fácil aplicação que a publicação original em inglês de Fisher e Kloiber (2006), mas ressalta-se que a publicação de Fisher e Kloiber (2006) traz as mesmas formulações que aqui são referenciadas a Bellei (2009).

Após definir o tamanho dos parafusos de ancoragem, é importante examinar os espaços entre os furos, os próprios parafusos e o pilar. A norma NBR 8800 (ABNT, 2008) estabelece distâncias mínimas entre os furos e as bordas das placas com base no diâmetro dos parafusos, para situações em que a conexão é exclusivamente metálica, sem a inclusão de elementos de concreto armado.

6.1 Chumbadores

Conforme Bellei (2009), deve-se dimensionar o chumbador mediante os esforços de tração e cisalhamento atuantes, que dependem do esforço atuante na coluna, conforme já apresentado no item 4.

Bellei (2009) identifica os esforços nos chumbadores conforme identificados na figura 11, e que podem ser correlacionados com os casos do item 4.

Pode-se identificar na figura 11 o caso (a) com a compressão centrada da figura 5 acrescida de um esforço horizontal. Assim, o chumbador deverá ser dimensionado somente para esforço de cisalhamento H.

Na figura 11, o caso (b) representa o esforço de tração centrado (figura 6) acrescido de um esforço horizontal. Assim, o chumbador deverá ser dimensionado para o esforço de tração T associado ao esforço de cisalhamento H.

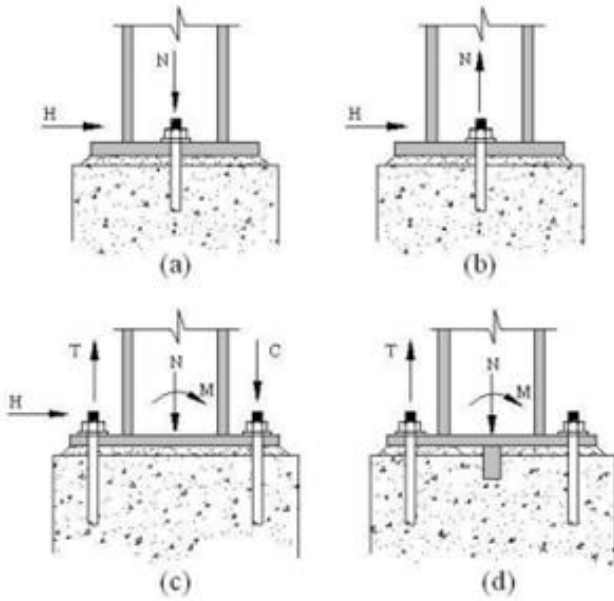


Figura 11 – Esquema de casos de carregamentos nos chumbadores.

Fonte: Adaptado de Bellei (2009).

Os casos (c) e (d) da figura 11 representam a aplicação conjunta de esforço normal (que pode ser compressão ou tração) e momento fletor. A diferença é a aplicação do esforço horizontal H.

Na caso (c) da figura 11, o chumbador deverá ser dimensionado para a tração T e o cisalhamento H. No caso (d), somente para tração. Para os dois casos, o valor de T poderá ser obtido conforme o sentido do esforço normal (tração ou compressão) e a magnitude da excentricidade (pequena ou elevada).

Nos itens 6.1.1 e 6.1.2 estão apresentados os dois métodos para dimensionamento dos chumbadores.

6.1.1 Dimensionamento pelo Método AISC-ASD

De acordo com Bellei (2009), o dimensionamento ao cisalhamento deve ser feito pela equação 1 a seguir, que correlaciona a tensão de cisalhamento atuante com a tensão admissível no cisalhamento, f_v .

$$A_{nec} = \frac{H}{f_v} = n_{ch} \pi \frac{d_c^2}{4} \tag{1}$$

Onde,

- A_{nec} é a área necessária dos chumbadores [cm];

- H é a carga horizontal atuante não majorada [kN];
- f_v é a tensão admissível ao cisalhamento, considerando $f_v = 0,2 f_u$;
- f_u é o limite de ruptura à tração do aço do chumbador [kN/cm²];
- n_{ch} é o número de chumbadores;
- d_c = Diâmetro do chumbador [cm];

Assim, especificando o número de chumbadores, o diâmetro pode ser calculado pela equação 2:

$$d_c = 2,523 \sqrt{\frac{H}{n_{ch} f_u}} \tag{2}$$

O dimensionamento à tração dos chumbadores pelo Método AISC-ASD, conforme Bellei (2009), deve ser feito pela equação a seguir, que correlaciona a tensão atuante de tração com a tensão admissível à tração, f_t , identificado pela equação 3:

$$A_{nec} = \frac{T}{f_t} = \pi \frac{d_c^2}{4} \tag{3}$$

Onde,

- A_{nec} = Área necessária dos chumbadores;
- T = Carga axial de tração atuante não majorada [kN];
- f_t é a tensão admissível à tração, considerando $f_t = 0,38 f_u$;
- f_u = Limite de ruptura à tração do aço do chumbador [kN/cm²];
- d_c = Diâmetro do chumbador [cm];

Para o dimensionamento à tração com cisalhamento, Bellei (2009) afirma que as tensões atuantes devidas ao esforço de tração T e ao esforço de cisalhamento H, e compara-se a tensão final σ com a tensão admissível à tração f_t , como mostram as equações 4 a 6 a seguir:

$$\sigma_t = \frac{T}{A_{ch}} \tag{4}$$

$$\sigma_v = \frac{H}{A_{ch}} \tag{5}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + 3 \sigma_v^2} < f_t$$

- (6) Em relação ao dimensionamento à tração atuante, a NBR 8800 segue a equação 9 a seguir:

Onde,

- A_{ch} é a área da seção transversal do chumbador [cm];
- σ_t é a tensão atuante devida ao esforço de tração não majorado T [cm];
- σ_v é a tensão atuante devida ao esforço de cisalhamento causado pela força não majorada H [kN/cm²];
- f_t é a tensão admissível à tração $f_t = 0,38 f_u$;
- f_u é o limite de ruptura à tração do aço do chumbador [kN/cm²];

$$F_{trd} = \frac{0,75 A_{con} f_u}{1,35} \cong A_{con} 0,56 f_u \quad (9)$$

A expressão simplificada de Bellei (2009) é dada pela relação 10 a seguir:

$$A_{nec} = \frac{T_d}{0,56 f_u} = \pi \frac{d_c^2}{4} \quad (10)$$

6.1.2 Dimensionamento conforme a ABNT NBR 8800

Bellei (2009) apresenta expressões já simplificadas para o dimensionamento de chumbadores à tração e a cisalhamento conforme as especificações da NBR 8800.

O dimensionamento ao cisalhamento, conforme Bellei (2009), pode ser feito conforme a equação 7 a seguir:

$$A_{nec} = \frac{H_d}{0,3 f_u} = \pi \frac{d_c^2}{4} \quad (7)$$

Onde,

- A_{nec} é a área necessária dos chumbadores [cm];
- H_d é a carga horizontal de cálculo atuante em um chumbador [kN];
- f_u é o limite de ruptura à tração do aço do chumbador [kN/cm²];
- d_c é o diâmetro do chumbador [cm];

Ressalta-se que a expressão apresentada por Bellei (2009) considera a resistência de cálculo ao cisalhamento igual a $0,3 f_u$. Esse valor pode ser obtido considerando a redução de 70% da área na região da rosca, a relação entre cisalhamento e tração (0,6) e o coeficiente de minoração da resistência de 1,35 como apresentado pela NBR 8800 (ABNT, 2008), para cálculo de conectores a cisalhamento, dada pela equação 8:

$$F_{vrd} = \frac{0,7 A_{con} 0,6 f_u}{1,35} \cong A_{con} 0,3 f_u \quad (8)$$

Onde,

- A_{nec} é a área necessária dos chumbadores [cm];
- T_d é a carga de tração de cálculo atuante em um chumbador [kN];
- f_u é o limite de ruptura à tração do aço do chumbador [kN/cm²];
- d_c é o diâmetro do chumbador [cm];

Para dimensionamento à tração e cisalhamento combinados, Bellei (2009) apresenta a expressão da norma americana, pelo método AISC-LRFD, sintetizado nas equações de 11 a 13:

$$\sigma_t = \frac{T_d}{A_{ch}} \quad (11)$$

$$\sigma_v = \frac{H_d}{A_{ch}} \quad (12)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + 3 \sigma_v^2} < 0,56 f_u \quad (13)$$

Onde,

- A_{ch} é a área da seção transversal do chumbador [cm];
- σ_t é a tensão atuante devida ao esforço de tração não majorado T [kN/cm²];

- σ_v é a tensão atuante devida ao esforço de cisalhamento causado pela força não majorada H [kN/cm²];
- f_t é a tensão admissível à tração $f_t = 0,38 f_u$;
- f_u é o limite de ruptura à tração do aço do chumbador [kN/cm²];

Entretanto a NBR 8800 (ABNT, 2008) traz a expressão 14 a seguir para verificação da segurança, que deve ser feita para cada chumbador,

$$\left(\frac{T_d}{F_{trd}}\right)^2 + \left(\frac{H_d}{F_{vrd}}\right)^2 \leq 1 \tag{14}$$

com T_d , F_{trd} , H_d e F_{vrd} já descritos nas expressões anteriores. A expressão da NBR 8800 (ABNT, 2008) leva a valores semelhantes aos da expressão do AISC-LRFD, pois reescrevendo a expressão 15:

$$\left(\frac{T_d}{A_{ch} 0,56 f_u}\right)^2 + \left(\frac{H_d}{A_{ch} 0,3 f_u}\right)^2 \leq 1 \tag{15}$$

obtem-se a equação 16:

$$\sigma_t^2 + 3,48 \sigma_v^2 \leq (0,56 f_u)^2 \tag{16}$$

Onde,

- σ_t é a tensão atuante devida ao esforço de tração não majorado T [kN/cm²];
- σ_v é a tensão atuante devida ao esforço de cisalhamento causado pela força não majorada H [kN/cm²];
- f_u é o limite de ruptura à tração do aço do chumbador [kN/cm²];

6.1.3 Comprimento de ancoragem dos chumbadores

Ao se tratar do comprimento de ancoragem dos chumbadores, Bellei (2009) cita as orientações do AISC – SDG , que estabelece critérios para dois tipos de chumbadores: ou com a extremidade inferior dobrada a 90° ;ou com uma chapa ou porca na extremidade inferior, como já apresentado na figura 4..

Aqui será apresentado o dimensionamento para os chumbadores com extremidade inferior dobrada. Nesse caso, é necessário calcular os comprimentos L_h e L_c , mostrados na figura 12.

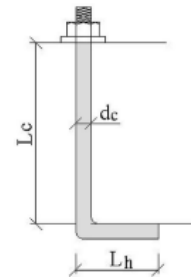


Figura 12 – Dimensões dos chumbadores.

Fonte: Bellei (2009).

A seguir estão apresentadas as expressões 17 e 18, para o cálculo de L_h , para o Método AISC-ASD e pela NBR 8800, respectivamente (Bellei, 2009).

Método AISC-ASD:

$$L_h = \frac{1,21 T}{f_{ck} d_c} \tag{17}$$

ABNT NBR 8800:

$$L_h = \frac{T_d}{1,4 f_{ck} d_c} \tag{18}$$

Para os dois métodos:

$$L_c = 12 d_c \text{ (aço SAE 1020 ou ASTM A36)}$$

$$L_c = 17 d_c \text{ (aço ASTM A325)}$$

$$L = L_h + L_c$$

Onde,

L_h = comprimento da barra dobrada à 90° [cm];

L_c = comprimento mínimo da barra reta [cm];

L = comprimento total do chumbador [cm];

f_{ck} = resistência característica do concreto do bloco [kN/cm²];

6.2 Dimensões da Placa de base para perfis I ou H

O dimensionamento das placas de base é essencial para garantir estabilidade e rigidez entre a superestrutura e a infraestrutura da edificação, isto é, nesta ligação que se transfere os esforços de compressão, tração e de momento fletor incidentes sob os pilares, para a fundação. Assim, Bellei (2009) cita no manual os parâmetros e equações sintetizados neste tópico para o dimensionamento de chapas de base para pilares de perfil I e H.

6.2.1 Placas de base submetidas à compressão centrada

As dimensões das placas de base de pilares I e H, quando sujeitas a cargas axiais de compressão centradas, são calculadas com base na tensão máxima atuante no concreto da base (Bellei, 2009), citada na seguinte relação 19:

$$\sigma_c = \frac{N}{BC} \quad (19)$$

Onde,

- σ_c é a tensão atuante no concreto [kN/cm²];
- N é a carga normal aplicada [kN];
- B e C são as dimensões da chapa [cm];

A tensão é limitada pela resistência do concreto. Se o dimensionamento for feito pelo método AISC-ASD, utilização o esforço N sem majoração e o valor de f_{ck} como limite. Se o método for o LFRD ou da norma brasileira, utiliza-se N_d e f_{cd} , com as ponderações devidas.

A partir desta relação, BELLEI (2009) determina os parâmetros necessários para o cálculo da espessura, separando os setores da placa para o cálculo de esforços.

Na figura 13 estão representados m e n (Figura 13.a), e n' (Figura 13.b) e simplificados pelas equações 20 a 22 a seguir.

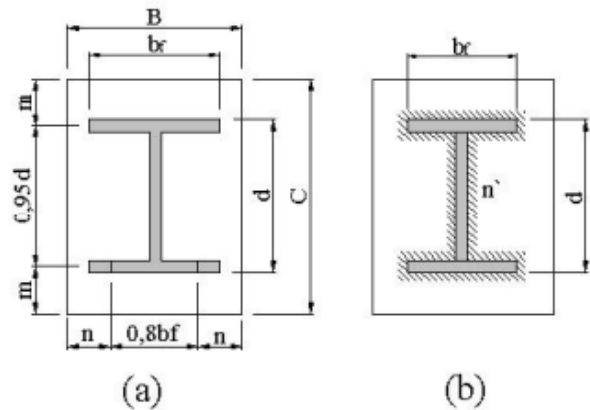


Figura 13 – Dimensões das chapas de base.

Fonte: Bellei (2009).

$$m = \frac{C - 0,95d}{2} \quad (20)$$

$$n = \frac{B - 0,8b_f}{2} \quad (21)$$

$$n' = \frac{\sqrt{db_f}}{4} \quad (22)$$

Onde,

- m é a distância para cálculo do momento na direção paralela à altura da seção [cm], ilustrado na figura 14;
- n é a distância para cálculo do momento na direção perpendicular à altura da seção [cm];
- n' é a distância em torno da borda da seção para cálculo de momento [cm];
- d é a altura da seção transversal do perfil do pilar [cm];
- b_f é a largura da mesa do perfil do pilar [cm];

Bellei (2009) também define as áreas da placa A_1 e a área da cabeça do bloco de concreto A_2 , que deve ser, no máximo, $4 A_1$.

Os esforços serão calculados no contato entre a placa e o concreto, e nas seções da placa, como mostra a figura 14.

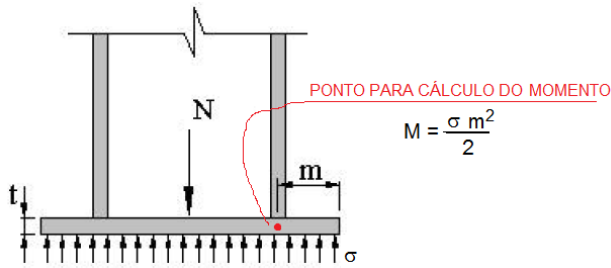


Figura 14 - Tensão na base e momento na chapa.

Fonte: Adaptado de Bellei (2009).

• Método AISC-ASD

A tensão no concreto deve ser verificada:

$$\sigma_c = \frac{N}{A_1}$$

Onde,

- N é a força de compressão atuante não majorada [kN];
- A1 é a área da placa [cm²];
- σ_c é a tensão no concreto [kN/cm²];

A tensão admissível no concreto é a menor entre

$$\begin{cases} f_c = 0,35 f_{ck} \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \\ f_c = 0,7 f_{ck} \end{cases}$$

Também deve ser verificada a chapa no ponto submetido ao maior momento atuante, gerado pela tensão no contato entre chapa e bloco

$$\sigma_M = \frac{M}{W}$$

Onde,

- M é o maior momento atuante na chapa por unidade de comprimento [kNm/m], dado por:

$$M = \frac{\sigma_c l^2}{2}$$

Onde,

- l é o maior valor entre m, n e n'
- W é o módulo de resistência por unidade de comprimento [cm³/m], dado por:

$$W = \frac{t^2}{6}$$

A tensão admissível no aço à flexão é dada por:

$$f_m = 0,9 f_y$$

Comparando a tensão atuante com a admissível, tem-se a seguinte relação 23:

$$\sigma_M \leq f_m$$

$$\frac{\sigma_c l^2}{\frac{t^2}{6}} \leq 0,9 f_y$$

(23)

Obtém-se a espessura necessária:

$$t \geq 1,83 l \sqrt{\frac{\sigma_c}{f_y}}$$

• Método NBR 8800

Conforme Bellei (2009) deve-se verificar os esforços de compressão no concreto, a partir do esforço normal de cálculo N_d.

$$N_d \leq \varphi_c N_p$$

Onde $\varphi_c = 0,6$ é o fator de resistência ao esmagamento no concreto

N_p é o esforço resistente limite no concreto, dado pela equação 24:

$$N_p = 0,85 \varphi_c f_{ck} A_1 \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} < \varphi_c 1,7 f_{ck} A_1$$

(24)

A espessura da chapa é calculada a partir do máximo momento atuante, como se segue.

$$\sigma_{cd} = \frac{N_d}{A_1}$$

$$M_d = \frac{\sigma_{cd} l^2}{2}$$

Onde l é o maior valor entre m, n e n'

A condição de segurança é dada pela relação 25:

$$M_d \leq \frac{M_n}{1,35} = W f_y$$

$$W = \frac{t^2}{6}$$

(25)

Assim, pode-se escrever a espessura t necessária conforme a equação 26:

$$t = 1,49 l \sqrt{\frac{\sigma_{cd}}{f_y}} \quad (26)$$

6.2.2 Placas de base submetidas à tração centrada

Eventualmente, placas de base estão sujeitas a esforços de tração, havendo a necessidade de um dimensionamento específico para este caso, elucidados a seguir. Em geral estas placas têm aproximadamente o mesmo tamanho do pilar.

- Método AISC-ASD

O cálculo da espessura da chapa deve ser feito pelas expressões a seguir, conforme a relação entre a largura e altura da seção.

Caso $1,42 b_f < d$ utiliza-se a equação 27.

$$t = 0,84 \sqrt{\frac{N g}{b_f f_y}} \quad (27)$$

Caso $1,42 b_f > d$, utiliza-se:

$$t = 1,42 \sqrt{\frac{N g}{b_f f_y}} \quad (28)$$

Onde,

- N é o carregamento a tração aplicado [kN];
- b_f é a largura da mesa do perfil do pilar [cm];
- f_y é a tensão de escoamento do aço [kN/cm²];
- g é a distância entre os chumbadores [cm];
- d é a altura do perfil do pilar [cm];
- N_d é o carregamento normal atuante [kN];
- t é a espessura da chapa de base [cm];

- Método NBR 8800

O cálculo da espessura da chapa é feito pelas equações a seguir, que consideram já um coeficiente de minoração da resistência do aço $\gamma_{a1} = 1,1$.

Caso $1,42 b_f < d$ e, utiliza-se a relação 29:

$$t = 0,63 \sqrt{\frac{N_d g}{b_f f_y}} \quad (29)$$

Caso $1,42 b_f > d$ utiliza-se:

$$t = 1,05 \sqrt{\frac{N_d g d}{f_y (d^2 + b_f^2)}} \quad (30)$$

Onde,

- N_d é o carregamento a tração de cálculo aplicado [kN];
- b_f é a largura da mesa do perfil do pilar [cm];
- f_y é a tensão de escoamento do aço [kN/cm²];
- g é a distância entre os chumbadores [cm];
- d é a altura do perfil do pilar [cm];
- t é a espessura da chapa de base [cm];

6.2.3 Placas de base submetidas à compressão axial e momento

Quando há um sistema de cargas à compressão e momento fletor aplicado simultaneamente, no cálculo, a primeira consideração é a largura da placa. O comprimento (L) da placa de base é então determinado de modo a garantir que a tensão máxima do concreto próxima à extremidade (σ_c) seja inferior à resistência à compressão (f_c), sintetizados nas equações 31 e 32 a seguir e representado na Figura 15.

$$\sigma_{c,max} = \frac{N}{B L} - \frac{6M}{B L^2} \leq f_c \quad (31)$$

$$\sigma_{c,min} = \frac{N}{B L} + \frac{6M}{B L^2} \quad (32)$$

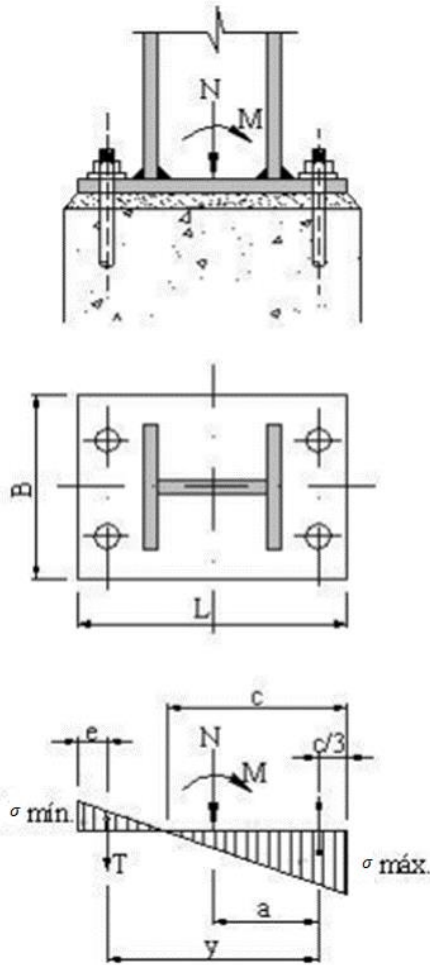


Figura 15 – Dimensões da placa de base sujeita a sistema de carregamento composto.

Fonte: Bellei(2009).

Para definirmos o valor mínimo de L, tem-se a equação 33 seguintes:

$$L = \frac{N}{2Bf_c} + \sqrt{\left(\frac{N}{2Bf_c}\right)^2 + \frac{6M}{Bf_c}} \tag{33}$$

Ao se tratar do dimensionamento do esforço total T nos chumbadores tracionados, tem-se as equações 34 a 36:

$$T = \frac{M - N a}{y} \tag{34}$$

Sendo que,

$$a = \frac{L}{2} - \frac{C}{3} \tag{35}$$

$$y = L - \frac{C}{3} - e \tag{36}$$

Método AISC-ASD

Verifica-se a tensão no concreto ao comparar $\sigma_{c\ max}$ com f_c , obtido conforme indicado na equação 37:

$$f_c = 0,35 f_{ck} \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 0,7 f_{ck} \tag{37}$$

Onde,

- f_c é a tensão admissível no concreto;
- f_{ck} é a resistência do concreto;
- A_2 é a área da face superior do bloco de concreto [cm²];
- A_1 é a área da chapa de base [cm²];

Para a espessura da chapa de base, tem-se a equação 38 a seguir:

$$t = 2,6 \sqrt{\frac{M}{f_y}} \tag{38}$$

Onde,

- M é o momento atuante [kNcm];
- f_y é o limite de escoamento do aço;
- t é a espessura da chapa [cm];

Método NBR 8800

Verifica-se a tensão no concreto semelhante ao método anterior, conforme indica a equação 39 a seguir, comparando $\sigma_{c\ max}$ com f_{cd} , onde:

$$f_{cd} = 0,51 f_{ck} \sqrt{\frac{A1}{A2}} \leq 1,02 f_{ck} \quad (39)$$

Onde,

- f_{cd} é a resistência característica do concreto [kN/cm²];
- $A1$ é a área da chapa de base [cm²];
- $A2$ é a área da face superior do bloco de concreto [cm²];

Para a espessura da chapa de base, temos que:

$$t = 2,1 \sqrt{\frac{Md}{fy}}$$

Onde,

- t é a espessura da chapa de base [cm];
- Md é o momento atuante de cálculo [kNcm];
- fy é o limite de escoamento do aço;

7. MODELAGEM E TRABALHOS EXPERIMENTAIS

Em seu trabalho, Martins (2002), realizou um estudo em pilares de perfil H e bases de chapas sem nervura, carregadas axialmente por forças de compressão e tração isoladas e com momento fletor aplicado utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Isso consiste em um estudo de comportamento dos elementos de base de um pilar metálico como um todo, isto é, chapas de base, chumbadores e blocos de concreto e, por meio da análise numérica comparar com os métodos analíticos usualmente utilizados para projetos.

O estudo analisou quatro modelos via método dos elementos finitos utilizando o software ANSYS e, simulou-se duas situações distintas. A primeira comprimindo o elemento sem a presença de momento fletor, alterando o tipo de chumbador entre a rosca reta e semicircular. A segunda, comprimindo com o adicional de momento fletor, também alternando os chumbadores.

Observou-se diferença significativa nos resultados de ambos os modelos. MARTINS (2002) atribuiu esta discordância à distribuição de tensão. Os modelos teóricos consideram que esta varia linearmente com máximo na borda da chapa, pois considera-se que o contato ocorre de maneira uniforme no trecho comprimido, variando conforme o momento fletor.

Contudo, a análise numérica identificou uma distribuição com forma aproximada de uma parábola e máximo na região abaixo da mesa do pilar comprimida.

Devido a isso, Martins (2002) afirma que o momento gerado na chapa, o que define sua espessura, é menor na análise numérica do que análise tradicional. Analisando os resultados dos chumbadores, Martins (2002) notou que a resistência de cálculo foi consideravelmente menor que a tração atuante. Por fim, Martins (2002) conclui que os procedimentos teóricos são conservadores quanto ao dimensionamento das chapas de base, mas quanto aos chumbadores, pode subdimensioná-los.

Rocha (2022) realizou um estudo de revisão sobre placas de base submetidas a momento fletor nas duas direções. Ao analisar as normas nacionais e internacionais, só são estabelecidos critérios de dimensionamento das chapas de base submetidas a momento fletor aplicado no eixo de maior inércia do pilar. Entretanto, é notória a precária análise do comportamento destes elementos perante o momento fletor aplicado no eixo de menor inércia. Logo, a prática prevê a edificação engastada no sentido de maior inércia, contra ventando a edificação no sentido de menor inércia.

Em seu trabalho, Rocha (2022), por meio revisão bibliográfica em trabalhos teóricos e experimentais, defende o uso de pilares bi engastados e norteia correlacionando resultados numéricos e experimentais.

Aos autores referenciados por Rocha (2022) executaram testes em placas rígidas, semirrígidas e flexíveis, alternando as espessuras, dimensões, chumbadores, carregamentos e blocos de concreto. Após rodarem todos os corpos de prova, comparou-se resultados com auxílio do MEF e softwares de análise.

Mediante seu trabalho, Rocha (2022) identificou que o comportamento da placa difere significativamente com aplicação de momento nas direções de maior e menor inércia. O autor ainda concluiu que os modelos analíticos para cálculo desenvolvidos por de Fasaee et al. (2018, apud Rocha 2022) foram validados experimentalmente pelo próprio Fasaee por meio de MEF e experimentalmente por ensaios de Gomez (2010, apud Rocha 2022),

O objetivo dos trabalhos citados anteriormente era da verificação e comparação entre resultados experimentais (em testes de laboratório ou pelo MEF) e as normativas atuais ou modelos teóricos utilizados em projetos práticos. Logo, o trabalho apresentado por Martins (2002), após simulações de cargas

aplicadas axialmente com e sem a presença de momento fletor, apresenta resultados menos conservadores se comparados aos modelos teóricos, pois o momento fletor aplicado na base ficou cerca de 50% se comparado às pesquisas teóricas, mas, por estas, há um subdimensionamento dos chumbadores.

Ao mesmo tempo, é nítida a falta de estudos e verificações para momentos aplicados no eixo de menor inércia do pilar. Rocha (2022) enaltece em seu projeto que o comportamento das chapas de base diverge muito quando há momento aplicado em ambas as direções, de maior e menor inércia.

8. CONCLUSÕES

Há um acervo restrito ao que diz respeito aos estudos de placas de base. A normativa nacional, a NBR 8800 (ABNT, 2008), é omissa no dimensionamento da placa e carece de atualizações, principalmente se compararmos com o cenário americano. Ainda sim que estes parâmetros tratem de materiais e situações externas distintas, a falta orientações na norma brasileira dificulta o projeto para profissionais no âmbito prático, ainda mais considerando que o material indicado pela NBR 8800 está em língua inglesa e não é muito didático.

Isso pode favorecer erros, com possíveis comprometimentos à segurança e rigidez da estrutura, ou ainda o superdimensionamento por simples desconhecimento.

O texto aqui apresentado, cumpriu seu objetivo, pois reuniu de forma didática e simplificada orientações para dimensionamento das chapas de base, tanto em suas dimensões como em sua espessura, e dos chumbadores, em seu comprimento total, o diâmetro das barras e o posicionamento dos mesmos.

9. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto em edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ARAUJO, A.H.M. Projeto Fabricação e Montagem de Estruturas Metálicas Tubulares com Seção Circular. Revista Construção Metálica, ABCEM. 2002;

BELLEI, I. HÉLIO. Interfaces Aço-concreto. Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro, 2009;

FISHER, J M , KLOIBER, L A. Steel Design Guide 1, American Institute of Steel Construction, 2006;

MARTINS M. Estudo de Bases de Pilares Metálicos pelo Método dos Elementos Finitos. Belo Horizonte, Brasil; 2002;

MINCHILLO V. G. Estudo de Comportamento de Ligações de Placas de Base para Estruturas Metálicas Tubulares. Universidade Estadual de Campinas, 2003;

PIMENTA, Roberval José. Ligações de Apoio de Pilares em Perfil Tubular. Construmetal 2010 – Congresso Latino Americano da Construção Metálica. São Paulo, Brasil; 2010;

REQUENA, J.A.V. Projeto Fabricação e Montagem de Estruturas Metálicas Tubulares com Seção Circular. Revista Construção Metálica, ABCEM. 2002;

ROCHA N., João Pedro. Estudo de Comportamento de Placas de Base Metálicas Engastadas nos Eixos de Maior e Menor Inércia. Belo Horizonte, Brasil; 2022;

TARGOWSKI, R.; LAMBLIN, D.; GUERLEMENT, G. Base plate connection under bending: experimental and numerical study. Journal of Constructional Steel Research (37-54), 1993;