



2024

Influência da espessura da placa de base na rigidez da ligação e no deslocamento da coluna em perfis I ou H submetidas à flexão composta com cisalhamento

João Vitor Ribeiro de Souza ^a; Christiane Areias Trindade ^b

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

^b Professora Orientadora, Doutora, christiane.trindadel@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

Placas de base são as responsáveis pelo vínculo entre pilar metálico e fundação de concreto. É intuitivo que o aumento da espessura desse elemento gere um acréscimo de rigidez e um decréscimo de rotação, este artigo tem como objetivo mensurar essa influência por meio de uma simulação numérica pelo método dos elementos finitos. Para tanto, foram concebidas duas situações de carregamento aplicadas a ligação, com flexo-tração e flexo-compressão, ambas combinadas com esforço cisalhante. Utilizando como base a normativa brasileira em conjunto com normas internacionais e trabalhos acadêmicos publicados, e por meio da utilização de software que emprega método dos elementos finitos, foi realizada uma análise de diferentes espessuras e constatada um ganho relativo de rigidez de até 191% e consequentemente uma diminuição relativa do deslocamento da coluna de até 34%.

Palavras-chave: Placa de base, chapa de base, rigidez, rotação, deslocamento, engaste perfeito, rótula;

ABSTRACT

Base plates are responsible for the connection between steel columns and concrete foundations. It is intuitive that increasing the thickness of this element leads to an increase in stiffness and a decrease in rotation. This article aims to quantify this influence through a numerical simulation using the finite element method. To this end, two loading scenarios were applied to the connection: bending with tension (flexo-tension) and bending with compression (flexo-compression), both combined with shear force. Based on the Brazilian standard, in conjunction with international standards and published academic studies, and using software that employs the finite element method, an analysis of different thicknesses was carried out. The results showed a relative stiffness increase of up to 191%, which consequently led to a relative reduction in column displacement of up to 34%.

Keywords: Base plate, stiffness, rotation, perfect fixity, hinge joint;

1. INTRODUÇÃO

A ligação entre o pilar e a fundação é uma parte fundamental na construção civil, especialmente em estruturas metálicas e mistas. Essa conexão, geralmente constituída por chapas de base, é responsável por transmitir os esforços da superestrutura para a infraestrutura, garantindo a segurança e a integridade do sistema.

A rigidez da ligação, que nada mais é do que o quanto o material ou a estrutura resiste a deformação, influencia diretamente a magnitude dos esforços transferidos e, consequentemente, os deslocamentos da estrutura.

Há um conjunto de fatores que determinam a rigidez e a resposta estrutural da ligação entre o pilar e a fundação. A espessura da chapa de base é um desses

fatores, pois chapas mais espessas tendem a aumentar a rigidez da ligação, reduzindo os deslocamentos, enquanto chapas mais finas geram deformações maiores, que podem comprometer as condições de serviço do conjunto.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da variação da espessura de uma chapa de base na rigidez da ligação e no deslocamento da coluna por meio de simulação numérica pelo método dos elementos finitos, utilizando o software Idea StatiCa.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

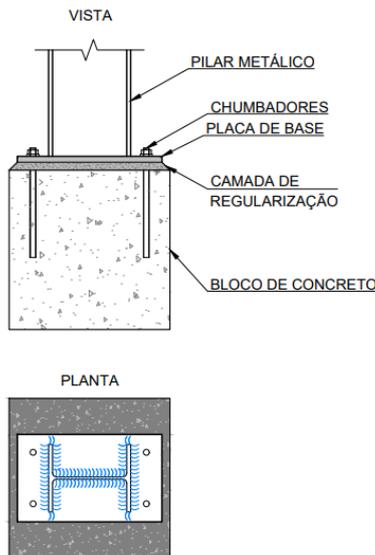
2.1 BASE DE PILARES METÁLICOS

A ligação na base de pilares metálicos é feita com uma chapa de base que é basicamente, uma placa retangular ou circular unida à fundação por meio de

parafusos (chumbadores) e soldada à coluna, como mostra a figura 1. A chapa e os chumbadores têm como função transferir esforços da coluna para a fundação. (PIMENTA, 2010).

Além disso, há uma camada de regularização com espessura variando de 2 a 5cm, que têm como função principal garantir um contato uniforme e completo entre pilar e fundação.

Figura 1 – Elementos que compõe uma ligação por chapa de base



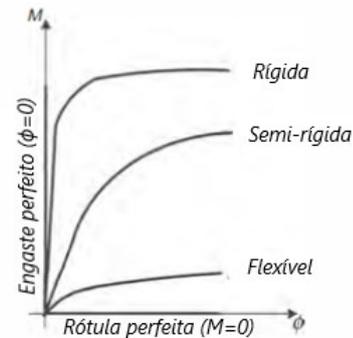
Fonte: Autor

2.2 TIPOS DE BASE

É comum no projeto de estruturas a consideração de simplificações quanto a situações de apoio ou de ligações em uma estrutura. Em nós rotulados se supõe que não há a transferência de nenhuma parcela de momento fletor enquanto que em nós engastados supõe-se que não há nenhum tipo de rotação. Todavia essa situação é idealizada, e o que realmente ocorre na prática é algo que na verdade, transita entre esses dois extremos, com nós rotulados transferindo certa parcela do momento fletor e nós engastados apresentando certo grau de rotação (SANTOS, 1998).

A figura 2 apresenta o comportamento e a classificação de uma ligação conforme a sua rigidez.

Figura 2 – Classificação das ligações de acordo com a rigidez



Fonte: Adaptado de Pfeil, 2009

Pode se verificar no eixo das ordenadas que, em um engaste perfeito, todo o momento fletor aplicado é transferido, conseqüentemente a rotação no nó é nula ($\Phi=0$), já no eixo das abcissas tem-se que, em uma rótula perfeita, por conta da liberdade de giro, não há a transferência de nenhuma parcela do momento fletor ($M=0$).

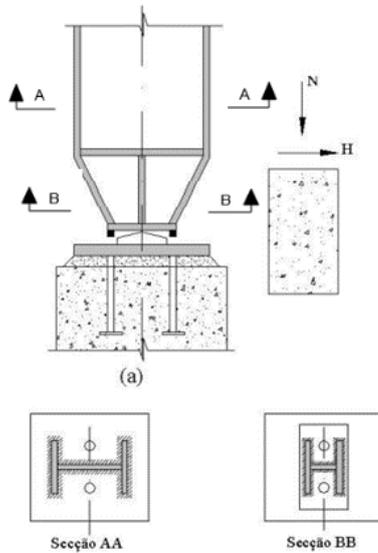
Na etapa de modelagem de um projeto, o engenheiro responsável é quem define o tipo de ligação que será aplicada na base dos pilares, podendo ser um nó tendendo a uma rótula ou a um engaste. A partir dessa definição se faz necessário que a concepção e a execução da ligação correspondam na realidade ao comportamento esperado na etapa de projeto.

2.2.1 BASE ROTULADA

O nó tipo rotulado é caracterizado pela transferência apenas de esforços axiais, com a rótula permitindo a rotação da conexão entre as partes estruturais, assim, idealmente, não há a transferência de momento fletor.

A base rotulada mais simples, ilustrada na Figura 3, é composta por uma chapa metálica soldada à base do pilar, com dois chumbadores posicionados no centro, colocados o mais próximo possível do seu eixo de rotação (BELLEI, 2009).

Figura 3 – Detalhe de uma base rotulada



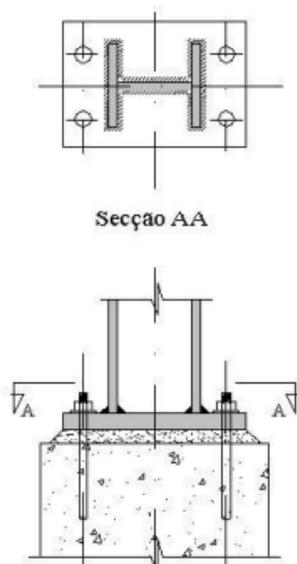
Fonte: Bellei, 2009

2.2.2 BASE ENGASTADA

As bases engastadas transmitem para as fundações tanto esforços axiais quanto momentos fletores. O vínculo tipo engaste é caracterizado por impedir totalmente qualquer movimento relativo entre os elementos interligados.

“A base engastada mais simples e a mais usada é aquela em que o pilar é soldado à placa de base, com os chumbadores afastados da linha de centro, formando um braço de alavanca.” (BELLEI, 2009)

Figura 4 – Detalhe de uma base engastada



Fonte: Bellei, 2009

2.3 NORMAS

A NBR 8800 em sua versão anterior, de 2008, discretizava em seu escopo as verificações quanto a chumbadores e soldas, porém ela não abordava de maneira direta o dimensionamento de chapas de base, tendo em seus anexos apenas um direcionamento para Fisher e Kobleir (2006).

O Steel Design Guide 1 (FISHER e KLOIBER, 2006), recomendado pela norma brasileira de 2008 e publicado pelo American Institute of Steel Construction (AISC), oferece uma base teórica utilizada em diversos softwares de engenharia estrutural, os quais implementam as formulações e recomendações do guia para verificar o comportamento e dimensionar as ligações na base de pilares.

O SDG-1 apresenta duas metodologias de verificação distintas: LRFD (Load and resistance factor design) e ASD (Allowable stress design).

O LRFD é o método dos estados limites últimos, ele é baseado em conceitos probabilísticos, em que são consideradas as incertezas quanto as cargas e a variabilidade quanto a resistência dos materiais. Essa incerteza é ponderada por meio de fatores de segurança que majoram as ações e minoram as resistências.

Por outro lado, a metodologia ASD admite tensões admissíveis no seu cálculo, ou seja, estabelece limites fixos para a tensão máxima nos materiais e verifica se com os esforços aplicados (sem majoração) não ultrapassam esse valor máximo. Portanto, têm-se apenas um fator de segurança que incide apenas sobre os materiais.

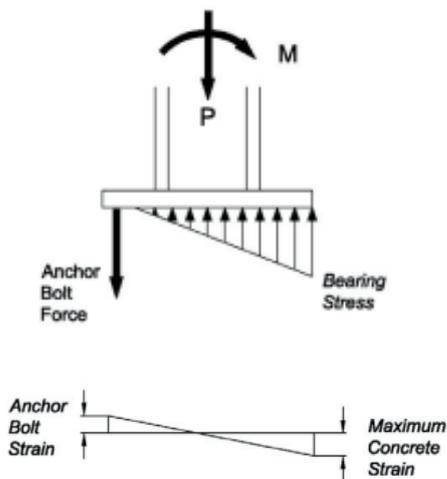
O LRFD, é um método mais moderno que reflete melhor a variabilidade e o comportamento real das estruturas e por isso é o adotado pelas normas brasileiras que abordam dimensionamentos e verificações estruturais.

A norma NBR 8800 ganhou uma nova versão no ano de 2024, e trouxe em seu escopo um item abordando diretamente o dimensionamento de placas de base de pilares metálicos de perfil I ou H. Entretanto esse tópico ainda carece de generalidades. Por exemplo, há na norma uma tabela de disposições gerais com dimensões recomendadas para distância entre parafusos, dos parafusos a borda, da placa de base a fundação, etc. A aplicabilidade dessa tabela é declarada como válida apenas para chumbadores de aço tipo A-36.

2.4 PLACA DE BASE SUBMETIDA A FLEXÃO COMPOSTA COM CISALHAMENTO

Considerando uma chapa de base concebida como engastada, submetida a flexão composta, têm-se que o momento fletor indicado na figura 5, gera tração em um dos lados da placa fazendo com que ela tenda a se desprender da fundação, os chumbadores locados nesse lado da chapa são os responsáveis por impedir que isso aconteça, suportando essa tensão. Na face oposta da placa ocorre o oposto, surgem tensões de compressão que serão suportadas pelo concreto do elemento de fundação. A força axial, a depender do seu sentido, entrará com uma parcela de acréscimo de tensões de compressão ou tração.

Figura 5 – Placa de base submetida à flexão composta

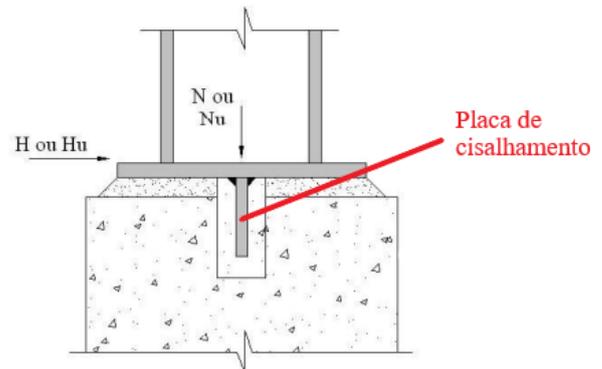


Fonte: Fisher and Kloiber, 2006

Em conjunto com a flexão composta, têm-se também o esforço cisalhante, que é resistido pelos chumbadores. Nos casos em que o pilar está submetido a uma força normal de compressão, pode-se considerar o atrito entre a chapa de base e o concreto da fundação como contribuinte na resistência.

Uma alternativa para resistir a esse esforço, utilizada em casos específicos — como quando não é possível ou desejável mobilizar a resistência por meio dos chumbadores ou do atrito entre a chapa de base e o concreto (situações com força de compressão baixa ou inexistente) —, é o uso de uma placa de cisalhamento. Essa chapa é soldada à parte inferior do conjunto, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Placa de base submetida a esforço horizontal



Fonte: Adaptado de Bellei, 2009

Somente haverá força horizontal nessa placa, após ser vencida a força de atrito entre a placa de base e o concreto.

2.5 DIMENSIONAMENTO DE PLACA DE BASE E CHUMBADORES SUBMETIDOS À FLEXÃO COMPOSTA COM CISALHAMENTO

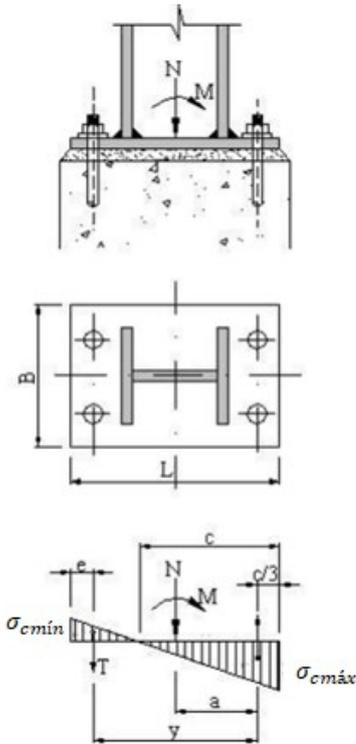
O dimensionamento de uma ligação por chapa de base não é linear e pode ser feito de diversas maneiras. A placa de base e os chumbadores são calculados de maneira conjunta, com incógnitas que em alguns momentos precisarão ser estimadas para posteriormente serem verificadas e confirmadas.

2.5.1 PLACA DE BASE

O dimensionamento da placa de base se inicia pela estimativa dos comprimentos B e L da mesma. Sendo a maior dimensão (L), posicionada na direção do plano de flexão, como mostrado na figura 7. Assim, tem-se a maior inércia da chapa posicionada de maneira eficiente e otimizada, contribuindo na resistência ao momento fletor.

A figura 7 expõe novamente o comportamento das tensões em uma placa de base submetida à flexão composta, com uma tensão máxima de compressão ($\sigma_{cm\acute{a}x}$) a ser suportada pelo concreto e uma força resultante de tração (T) a ser suportada pelos chumbadores posicionados no lado esquerdo da chapa. Os demais parâmetros geométricos serão detalhados logo a seguir.

Figura 7 – Esquema de tensões em uma placa de base submetida à flexão composta



Fonte: Adaptado de Bellei, 2009

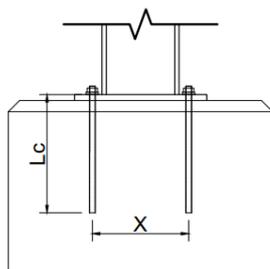
Com o perfil do pilar que se liga a fundação definido e também com uma estimativa do diâmetro dos chumbadores, pode-se utilizar as tabelas 1 e 2 que se seguem, baseadas nas distâncias entre parafusos e destes a borda para pré-dimensionar a placa.

Tabela 1 – Comprimento (Lc) e distância mínima entre chumbadores (X)

Tipos de aço	Comprimento Lc	Distância entre chumb. X
SAE 1020 ASTMA36	12d _c	5d _c ≥ 100mm
ASTMA325	17d _c	7d _c ≥ 100mm

Fonte: Bellei, 2009

Figura 8 – Referências do comprimento Lc e da distância X entre chumbadores



Fonte: Autor

Tabela 2 – Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda

Diâmetro d _b		Distância mínima
polegadas	mm	mm
1/2		19
5/8	16	22
3/4		25
	20	26
7/8	22	28
	24	30
1		32
	27	34
1 1/8	30	38
1 1/4		41
> 1 1/4	≥ 36mm	1,25 d _b

Fonte: NBR 8800, 2024

De acordo com Bellei (2009), a maior dimensão (L) da placa é calculada de maneira que a tensão máxima de compressão, demonstrada no lado direito do diagrama da figura 7, aplicada na fundação (σ_{c,máx}), não ultrapasse a tensão limite à compressão do concreto (σ_{c,Rd}).

$$\sigma_{c,máx} = \frac{N_u}{B \cdot L} + \frac{M_u}{W} = \frac{N_u}{B \cdot L} + \frac{6 \cdot M_u}{B \cdot L^2} \leq \sigma_{c,Rd} \quad (1)$$

onde,

- N_u: Carga axial majorada;
- M_u: Momento fletor majorado;
- B: Menor dimensão da placa de base;
- L: Maior dimensão da placa de base;

Sendo a σ_{c,Rd}, segundo NBR 8800 (ABNT, 2024):

$$\sigma_{c,Rd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2)$$

Onde,

- f_{ck}: Resistência característica do concreto a compressão;
- A₁: Área carregada sob a placa de apoio;
- A₂: Área da superfície de concreto;
- γ_c: Fator ponderador do concreto;

Para fins de cálculo, considerando que a área da superfície de concreto ainda não tenha sido definida, pode-se considerar A₂=A₁.

Segundo Bellei (2009), no outro extremo da placa se verifica a tensão mínima de tração (σ_{c,min}):

$$\sigma_{cmin} = \frac{N_u}{B \cdot L} - \frac{M_u}{W} = \frac{N_u}{B \cdot L} - \frac{6 \cdot M_u}{B \cdot L^2} \quad (3)$$

Ainda segundo Bellei (2009), com os dados das tensões máxima e mínima, verifica-se agora se o comprimento (L) da chapa adotado no começo do dimensionamento é suficiente:

$$L = \frac{0,5 \cdot N_u}{B \cdot \sigma_{c,Rd}} + \sqrt{\left(\frac{0,5 \cdot N_u}{B \cdot \sigma_{c,Rd}}\right)^2 + \frac{6 \cdot M_u}{B \cdot \sigma_{c,Rd}}} \quad (4)$$

A NBR 8800 (ABNT, 2024) define uma espessura mínima para que uma placa seja considerada rígida e com isso ser desconsiderado o efeito alavanca nos cálculos:

$$t \geq \sqrt{\frac{4 \cdot (b - 0,5 \cdot d_b) \cdot F_{t,0,Sd} \cdot \gamma_{a1}}{p \cdot f_u}} \quad (5)$$

Onde,

- b: Distância do furo a face mais próxima do perfil;
- d_b : Diâmetro do furo;
- γ_{a1} : Fator ponderador;
- $F_{t,0,Sd}$: Força de tração solicitante de cálculo em um parafuso;
- p: Largura tributária do parafuso;
- f_u : Resistência a ruptura da chapa;

Ela também define a espessura mínima já considerando esse efeito:

$$t \geq \sqrt{\frac{4 \cdot (b - 0,5 \cdot d_b) \cdot F_{t,0,Sd} \cdot \gamma_{a1}}{p \cdot f_u \cdot (1 + \delta\alpha)}} \quad (6)$$

Sendo,

$$p_{ext} \geq \min(e_{ext}; 1,75 \cdot b) + \min(0,5 \cdot e_{int}; 1,75 \cdot b) \quad (7)$$

$$p_{int} = \min(e_{int}; 3,5 \cdot b) \quad (8)$$

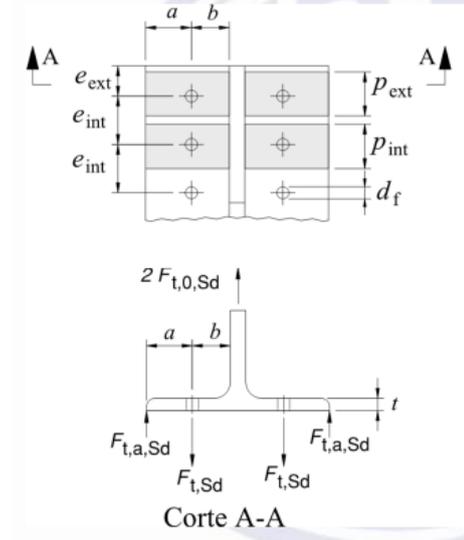
$$\delta = 1 - \frac{d_f}{p} \quad (9)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{se } \beta \geq 1 \\ \min\left[1; \frac{1}{\delta} \cdot \left(\frac{\beta}{1 - \beta}\right)\right] & \text{se } 0 < \beta < 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta = \left(\frac{a + 0,5 \cdot d_b}{b - 0,5 \cdot d_b}\right) \cdot \left(\frac{F_{t,Rd}}{F_{t,0,Sd}} - 1\right) \quad (11)$$

A figura 9 demonstra de forma ilustrativa os parâmetros utilizados nas equações 7 a 11.

Figura 9 – Geometria para efeito alavanca



Fonte: NBR 8800, 2024

O efeito alavanca é um fenômeno resultante da deformação da chapa de base, que provoca um acréscimo de tensões tanto na chapa e nos parafusos quanto na fundação.

2.5.2 CHUMBADORES

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2024) a área efetiva (A_{be}) de um parafuso é dada por:

$$A_{be} = 0,75A_b \quad (12)$$

$$A_b = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \quad (13)$$

onde,

d_c : Diâmetro do chumbador;

A força resistente de cálculo a tração é:

$$F_{t,Rd} = \frac{A_{be} \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (14)$$

onde,

f_{ub} : Resistência a ruptura do chumbador;

γ_{a2} : Fator ponderador;

O diâmetro necessário do chumbador pode ser obtido igualando as força resistente a solicitante:

$$F_{t,Rd} = F_{t,Sd} \quad (15)$$

$$0,75 \cdot \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} = \frac{F_{t,Sd} \cdot \gamma_{a2}}{f_{ub}} \quad (16)$$

$$d_c = \sqrt{\frac{5,33 \cdot F_{t,Sd} \cdot \gamma_{a2}}{\pi \cdot f_{ub}}} \quad (17)$$

Para n chumbadores:

$$d_c = \frac{1}{n_{ct}} \sqrt{\frac{5,33 \cdot F_{t,Sd} \cdot \gamma_{a2}}{\pi \cdot f_{ub}}} \quad (18)$$

onde,

$F_{t,Sd}$: Força de tração solicitante sobre os chumbadores;

n_{ct} : Número de chumbadores submetidos a esforço de tração;

A norma NBR 8800 (ABNT, 2024) define a força resistente de cálculo a cisalhamento para dois casos:

- Quando o plano de corte passa pela rosca:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,45 \cdot A_b \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (19)$$

- Quando o plano de corte não passa pela rosca:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,56 \cdot A_b \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (20)$$

Pegando como exemplo o pior caso (19) têm-se:

$$F_{v,Rd} = F_{v,Sd} \quad (21)$$

$$\frac{0,45 \cdot A_b \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} = F_{v,Sd} \quad (22)$$

$$d_c = \sqrt{\frac{8,89 \cdot F_{v,Sd} \cdot \gamma_{a2}}{\pi \cdot f_{ub}}} \quad (23)$$

Para n chumbadores:

$$d_c = \frac{1}{n_{cv}} \sqrt{\frac{8,89 \cdot F_{v,Sd} \cdot \gamma_{a2}}{\pi \cdot f_{ub}}} \quad (24)$$

onde,

$F_{v,Sd}$: Força de cisalhamento solicitante sobre os chumbadores;

n_{cv} : Número de chumbadores submetidos a esforço de cisalhamento;

Se faz necessário também a verificação quanto a pressão de contato em furos que é descrita para furos padrão ou pouco alargados, em dois casos pela NBR 8800 (ABNT, 2024):

- Quando a deformação no furo para forças de serviço for uma limitação de projeto:

$$F_{c,Rd} = \frac{1,2 \cdot l_f \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2,4 \cdot d_c \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \quad (25)$$

- Quando a deformação no furo para forças de serviço não for uma limitação de projeto:

$$F_{c,Rd} = \frac{1,5 \cdot l_f \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{3,0 \cdot d_c \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \quad (26)$$

onde,

l_f : É a distância na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente;

t : Espessura da parte ligada;

f_u : Resistência a ruptura do aço da chapa;

Por fim, verifica-se tração e cisalhamento combinados:

$$\left(\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1 \quad (27)$$

Bellei (2009), traz uma outra verificação para esforços de tração e cisalhamento combinados:

$$\sigma_{tu} = \frac{F_{t,Sd}}{A_{ct}} \quad (28)$$

$$\sigma_{vu} = \frac{F_{v,Sd}}{A_{cv}} \quad (29)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{tu}^2 + 3\sigma_{vu}^2} \leq f_t = 0,38 \cdot f_{ub} \quad (30)$$

sendo,

A_{ct} : Área dos chumbadores sujeitos à tração;
 A_{cv} : Área dos chumbadores sujeitos à cisalhamento;
 f_t : Tensão admissível à tração;

Ainda segundo Bellei (2009), a força de tração representada pela área do diagrama da figura 7, seria toda suportada pelos chumbadores localizados nesse lado da placa.

Fazendo um equilíbrio de momentos em relação ao centro de gravidade do diagrama de compressão têm-se:

$$\sum M_{cg,comp.} = M_u - N_u \cdot a - T_u \cdot y = 0 \quad (31)$$

Logo o esforço T_u atuante nos chumbadores tracionados é de:

$$T_u = \frac{M_u - N_u \cdot a}{y} \quad (32)$$

Graficamente obtêm-se:

$$a = \frac{L}{2} - \frac{c}{3} \quad (33)$$

$$y = L - \frac{c}{3} - e \quad (34)$$

onde,

e : Distância do centro do parafuso a borda da placa;

Sendo:

$$c = \frac{\sigma_{cm\acute{a}x} \cdot L}{\sigma_{cm\acute{a}x} + \sigma_{cm\grave{m}n}} \quad (35)$$

Ainda é preciso verificar a ruptura por arrancamento de cone. Para isso a ACI 318-19 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2019) fornece equações baseadas na Teoria de campos de fissura de concreto (Concrete Capacity Design - CCD), essas equações são descritas no “Projeto de fixações com chumbadores mecânicos pré-instalados e pós-instalados em elementos de concreto” da Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural. (ABECE-007:2022).

Têm-se que a capacidade de resistência é dada por:

$$R_{Rk,c} = N_{Rk,c} \frac{A_{c,N}}{A^0_{c,N}} \cdot \Psi_{s,N} \cdot \Psi_{re,N} \cdot \Psi_{ec,N} \quad (36)$$

$$N_{Rk,c} = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad (37)$$

$$A^0_{c,N} = S_{cr,N} \cdot S_{cr,N} \quad (38)$$

$$S_{cr,N} = 3 \cdot h_{ef} \quad (39)$$

$$\Psi_{s,N} = 0,7 + 0,3 \cdot \frac{C}{C_{cr,N}} \leq 1 \quad (40)$$

$$C_{cr,N} = \frac{1}{2} \cdot S_{cr,N} \quad (41)$$

$$\Psi_{re,N} = 0,5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1 \quad (42)$$

$$\Psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + 2 \cdot e_N/S_{cr,N}} \leq 1 \quad (43)$$

onde,

$N_{R,kc}$: Resistência inicial característica do chumbador;

h_{ef} : Altura equivalente de ancoragem do chumbador;

k_1 : Fator que varia conforme a fissuração ou não do concreto;

$A^0_{c,N}$: Área de influência de um chumbador isolado que não sofre interferência de outros chumbadores ou das bordas;

$A_{c,N}$: Área efetiva, delimitada pela superposição as áreas de influência dos chumbadores adjacentes e pelas bordas do elemento concreto;

$\Psi_{s,N}$: Fator que leva em conta a perturbação na distribuição de tensões devido as bordas do elemento de concreto;

$\Psi_{re,N}$: Leva em consideração o efeito da taxa de armadura superficial;

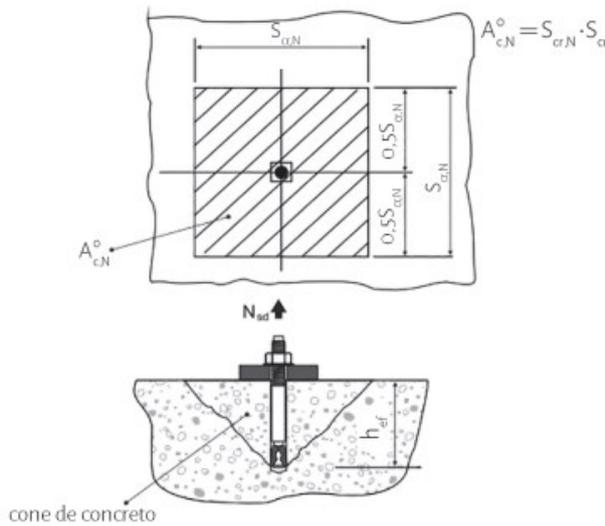
$\Psi_{ec,N}$: Fator que leva em conta o efeito de esforços de tração diferentes atuando em chumbadores do mesmo grupo;

Têm-se então que:

$$N_{Sd} \leq \frac{R_{Rk,c}}{\gamma_c} \quad (44)$$

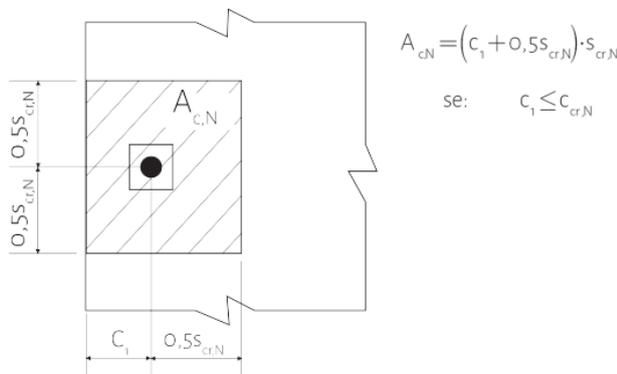
Nas figuras 10 e 11, pode-se observar a área de influência de um chumbador isolado, juntamente com sua respectiva altura equivalente além dos demais parâmetros descritos pelas equações 36 a 44.

Figura 10 – Área de influência de um chumbador isolado



Fonte: ABECE, 2022

Figura 11 – Chumbador individual na borda de elemento de concreto



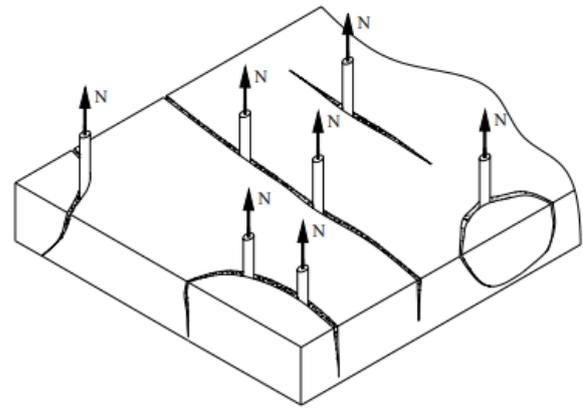
Fonte: ABECE, 2022

Por fim, ainda se faz necessária uma verificação quanto a ruptura no concreto por fendilhamento e por esforços transversais advindos do chumbador;

“O mecanismo de ruptura por fendilhamento não é bem conhecido e a carga última associada não é fácil de ser obtida. Geralmente procura-se evitar este tipo de ruptura aumentando a distância do chumbador a borda, o espaçamento entre os chumbadores ou a espessura do bloco de concreto; ou mesmo usando armadura.” (MARTINS, 2006).

A figura 12 traz as configurações mais comuns de ruptura do concreto por fendilhamento

Figura 12 – Esquema de ruptura por fendilhamento



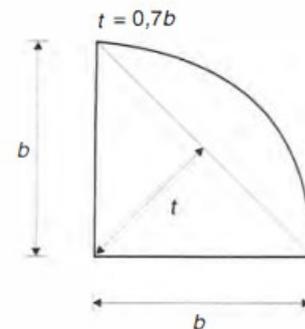
Fonte: Martins, 2006

A ruptura causada pela transferência de esforço horizontal do chumbador para o concreto também não é muito difundida, ela é mais comum quando o chumbador está locado próximo da borda do elemento de concreto e a parcela local de concreto resistente não se faz suficiente para suportar as tensões que surgem naquela região. Soluções para evitar esse problema incluem aumentar o número de chumbadores, adoção de placas de cisalhamento além de aumento da resistência do concreto aplicado na fundação.

2.5.3 SOLDAS

Em uma ligação por chapa de base se utiliza soldas do tipo filete, que são considerados como uma seção transversal triangular com base e altura geralmente iguais conforme mostrado na figura 13.

Figura 13 – Geometria de uma solda tipo filete



Fonte: Pfeil, 2009

A garganta da solda é simbolizada por t, e é um dos parâmetros para determinar a resistência da ligação soldada.

A NBR 8800 (ABNT, 2024), tabela o tamanho mínimo da perna de uma solda de acordo com a menor espessura entre dos elementos ligados, como se segue:

Tabela 3 – Espessura mínima da perna de uma solda de filete

Menor espessura do metal-base na junta mm	Tamanho mínimo da perna da solda de filete, d_w^a mm
Abaixo de 6,3 e até 6,3	3
Acima de 6,3 até 12,5	5
Acima de 12,5 até 19	6
Acima de 19	8

^a Executadas somente com um passe.

Fonte: NBR 8800, 2024

Ainda segundo a norma, para dimensionamento de soldas tipo filete são necessárias duas verificações: resistência na seção da garganta e resistência na seção do metal base onde será feita a solda.

A resistência da solda é dada pela equação:

$$R_d = \frac{A_w \cdot 0,6 \cdot f_w}{\gamma_{w2}} \quad (45)$$

$$A_w = t \cdot l \quad (46)$$

Onde,

A_w : Área efetiva da solda;
 l : Comprimento real da solda
 f_w : Resistência última do aço da solda;
 γ_{w2} : Fator de majoração (1,35 para comb. normais);

Enquanto que a resistência do metal base é dado por:

$$R_d = \frac{A_g \cdot 0,6 \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (47)$$

sendo,

A_g : Área bruta cisalhada;
 f_y : Tensão de escoamento do aço da chapa;
 γ_{a1} : Fator de majoração (1,1 para comb. normais);

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido utilizando como referência a norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2024), em conjunto com a publicação “Interface Aço-Concreto” de Bellei (2009), publicada pelo Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA). A análise dos dados foi realizada por meio do método dos elementos finitos (MEF), utilizando o software IDEA

StatiCa, uma ferramenta de verificação e dimensionamento de ligações metálicas que abrange diferentes normas internacionais.

No início do estudo, foi selecionado um perfil laminado, e o dimensionamento de sua ligação com a fundação foi realizado conforme os métodos e formulações descritos no item 2 do presente artigo. Os esforços foram definidos para simular uma situação real de projeto, assumindo que a base seria do tipo engastada. Foram conduzidas duas análises: uma considerando a ligação submetida à flexo-compressão e outra à flexo-tração, ambas combinadas com esforço cisalhante.

As ligações foram modeladas no software IDEA StatiCa com os respectivos esforços, variando apenas um parâmetro: a espessura da chapa de base. A partir dos resultados de rigidez, rotação, deformação, etc., obtidos, foi realizada uma avaliação da real influência desse parâmetro na rigidez da ligação e no deslocamento da coluna.

3.1 SOFTWARE IDEA STATICA

O IDEA StatiCa é um software que utiliza o CBFEM (Método dos Elementos Finitos Baseado em Componentes), para simular o comportamento de ligações, fazendo a consideração de cada componente (chapas, blocos, soldas, parafusos) de maneira individual. Cada membro então, tem seu comportamento caracterizado por curvas que permitem calcular rigidezes locais.

Na interação entre componentes, como a transferência de forças entre parafusos e chapas, são ponderadas as não linearidades geométricas e também as imperfeições dos materiais

O bloco de concreto é discretizado em uma malha de elementos finitos em três dimensões. Isso permite simular a distribuição de tensões e deformações no volume do bloco. O modelo leva em conta os comportamentos elástico e inelástico do concreto.

Já a chapa é representada como um elemento plano bidimensional. Para sua discretização, são utilizados elementos do tipo casca ou placa, que consideram os esforços fletores e de membrana (axiais).

3.1 LIGAÇÃO MODELO UTILIZADA

O perfil e os demais elementos da ligação adotados estão apresentados a seguir e nas figuras 14, 15 e 16. Os dados dos aços estão descritos na tabela 4.

- Pilar

HP 200x53 (A-572 Gr50);

Comprimento longitudinal de 3,00m;

- Chumbadores

4 parafusos de 5/8'' (ASTM-325);

Comprimento total de 300mm;

- Chapa

Placa retangular de 300x350mm (A-36);

- Solda

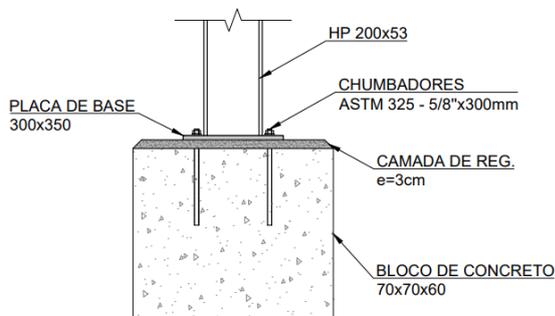
Espessura da perna de 8mm (E60XX);

- Fundação

Bloco de concreto com dimensões de 70x70x60;

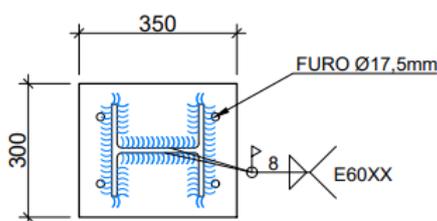
$f_{ck}=25$ MPa;

Figura 14 – Detalhe da elevação da ligação



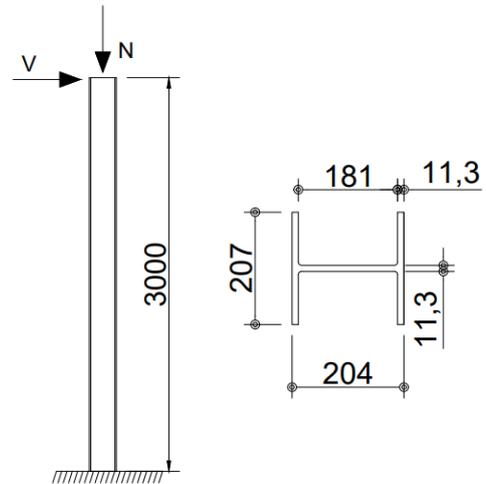
Fonte: Autor

Figura 15 – Detalhe em planta da ligação, medidas em mm



Fonte: Autor

Figura 16 – Detalhe do pilar metálico, medidas em mm



Fonte: Autor

Tabela 4 – Valores de tensão de escoamento e resistência última por tipo de aço

TIPO DE AÇO	f_y (MPa)	f_u (MPa)
A36	250	400
ASTM 325	635	830
A572 (Gr 50)	345	450

Fonte: Autor

3.1.1 CASO 1 – FLECO-COMPRESSÃO COM CISALHAMENTO

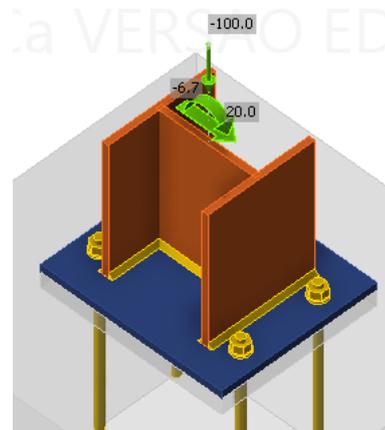
Para a flexo-compressão, foram adotados os valores dos esforços que se seguem, com direção e sentido conforme a figura 17.

$$N_u = -100 \text{ kN};$$

$$V_u = -6,7 \text{ kN};$$

$$M_u = 20 \text{ kN.m};$$

Figura 17 – Esforços a flexo-compressão com cisalhamento



Fonte: Autor

3.1.2 CASO 2 – FLEVO-TRAÇÃO COM CISCALHAMENTO

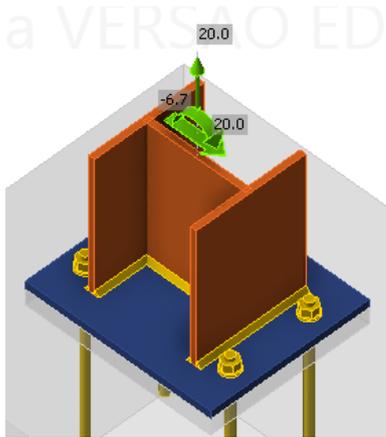
Para a flexo-tração, foram adotados os valores dos esforços que se seguem, com direção e sentido conforme a figura 18.

$$N_u = 20\text{kN};$$

$$V_u = -6,7\text{kN};$$

$$M_u = 20\text{kN.m};$$

Figura 18 – Esforços a flexo-tração com cisalhamento



Fonte: Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse item estão apresentados os resultados obtidos para os casos 1 e 2.

4.1 CASO 1

Foram analisadas ligações com chapas de espessura variando de 10mm a 38mm.

A tabela 5 apresenta os resultados, segundo o software Idea StatiCa, para a rigidez inicial e secante, rotação e deslocamento no topo da coluna.

A rigidez inicial é a calculada no início da aplicação de uma carga, na fase elástica do material, já a rigidez secante é uma rigidez média que considera o comportamento do material em uma região maior da curva tensão-deformação, englobando efeitos não-lineares.

Tabela 5 – Resultados de rigidez, rotação e deslocamento do pilar para esforços do caso 1

FLEVO-COMPRESSÃO COM CISCALHAMENTO				
CHAPA (mm)	RIG. INICIAL (MN.m/rad)	RIG. SECANTE (MN.m/rad)	ROTAÇÃO (mrad)	δh (mm)
10	8,00	8,80	2,30	12,94
12	10,10	10,90	1,80	11,62
16	14,40	15,00	1,30	10,11
19	17,00	17,70	1,10	9,49
22	19,00	19,80	1,00	9,13
25	20,50	21,50	0,90	8,89
32	22,70	24,00	0,80	8,60
38	23,30	24,90	0,80	8,51

Fonte: Autor

É possível perceber uma incompatibilidade aparente com a rigidez secante sendo maior que a inicial. Esse fato pode ser justificado por conta de o IDEA StatiCa, como já dito anteriormente, empregar o CBFEM para determinar as rigidezes, o que permite a captura de efeitos de comportamento local e das interações entre os elementos. Isso pode fazer com que a rigidez inicial no modelo, seja inferior a rigidez real. Por outro lado, a rigidez secante representa o comportamento estabilizado da junção, o que justifica sua maior magnitude. Portanto, se faz necessário ter em mente essa divergência do software, para entender e avaliar os dados expostos.

Pela tabela 5 pode-se notar um aumento da rigidez inicial de 191% e um ganho de rigidez secante de 183%.

A tabela 6, apresenta valores de referência de rigidez, rotação e deslocamento, para que a ligação seja considerada engastada.

Tabela 6 – Referências para ligação tipo engastada e perfeitamente engastada

REFÊRENCIAS			
TIPO DE LIGAÇÃO	RIGIDEZ (MN.m/rad)	ROTAÇÃO (mrad)	δh (mm)
ENGASTE	67,6	0,297	6,979
ENGASTE PERFEITO	∞	0,003	6,087
LIMITE DE NORMA (mm) - H/300			10,00

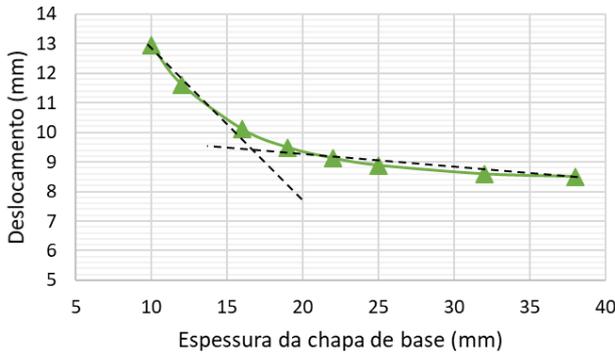
Fonte: Autor

O valor de 10 mm corresponde à menor espessura da chapa calculada por meio da equação 6, estabelecida pela norma. A NBR 8800 (ABNT, 2024) define em seu anexo B, um limite para o deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base para galpões em geral e edificações de um pavimento, igual a H/300 (sendo H a altura da coluna), valor destacado na Tabela 6.

Considerando esse parâmetro como referência, observa-se pela Tabela 5 que esse valor somente é atendido a partir da espessura de 19 mm.

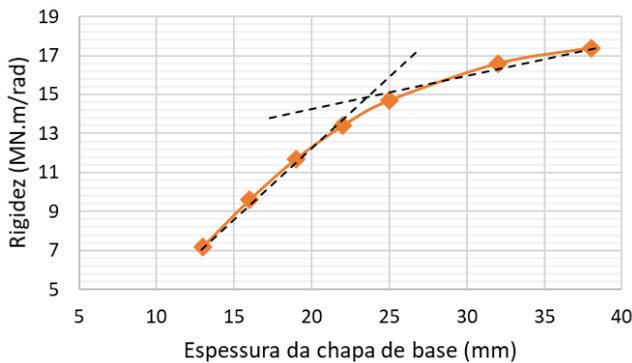
A seguir as figuras 19 e 20 trazem gráficos evidenciando a diminuição do deslocamento do topo do pilar e o aumento da magnitude da rigidez secante com o aumento da espessura da placa de base.

Figura 19 – Deslocamento da coluna x Espessura da placa de base



Fonte: Autor

Figura 20 – Rigidez secante x Espessura da placa de base



Fonte: Autor

No gráfico da figura 20 é possível perceber uma certa linearidade, com a rigidez aumentando relativamente proporcional a espessura da chapa de base até atingir a marca de 19mm de espessura, após isso têm-se um abaulamento da curva. Já no gráfico apresentado na figura 19 essa é restrita a parte mais inicial do gráfico, fato que pode ser constatado pelo abaulamento da curva e pela tabela 7 que, evidencia em números a queda da magnitude da diminuição do deslocamento da coluna com o aumento progressivo da espessura da placa.

Tabela 7 – Diminuição relativa do deslocamento com o aumento da espessura da placa de base

CHAPA (mm)	AUMENTO PERCENTUAL DA ESPESSURA DA CHAPA (%)	δh (mm)	DIMINUIÇÃO DO DESLOCAMENTO A CADA MMAUMENTADO DE CHAPA (mm)
10	-	12,94	-
12	20,0	11,62	0,660
16	33,3	10,11	0,378
19	18,8	9,49	0,205
22	15,8	9,13	0,121
25	13,6	8,89	0,080
32	28,0	8,60	0,042
38	18,8	8,51	0,015

Fonte: Autor

Para entender a tabela 7, pode-se pegar como exemplo o aumento de espessura da chapa de 10mm para 12mm (aumento relativo de 20%), nesse caso tem-se que, ao aumentar em 1mm a espessura da placa de base há a diminuição de 0,660mm no deslocamento do pilar. Agora, pegando o aumento de espessura de placa de 16mm para 19mm (aumento relativo de 19%) tem-se que a cada 1mm de espessura de chapa adicionado, há a diminuição de 0,205mm do deslocamento. Por fim, analisando o aumento de espessura de placa de 25mm para 32mm (aumento relativo de 28%) tem-se que a cada 1mm de espessura de chapa aumentado, há a diminuição de apenas 0,042mm do deslocamento. Portanto, fica claro que, conforme se vai aumentando a espessura da placa de base, há uma perda considerável na diminuição do deslocamento no topo das colunas.

O ganho percentual relativo de diminuição do deslocamento da coluna com o aumento da espessura da chapa pode ser observado na tabela 8 que se segue. Nota-se uma diminuição de cerca de 34% quando comparamos as chapas mais extremas, de 10mm e 38mm.

Tabela 8 – Diminuição percentual relativa do deslocamento da coluna com o aumento da espessura da placa de base

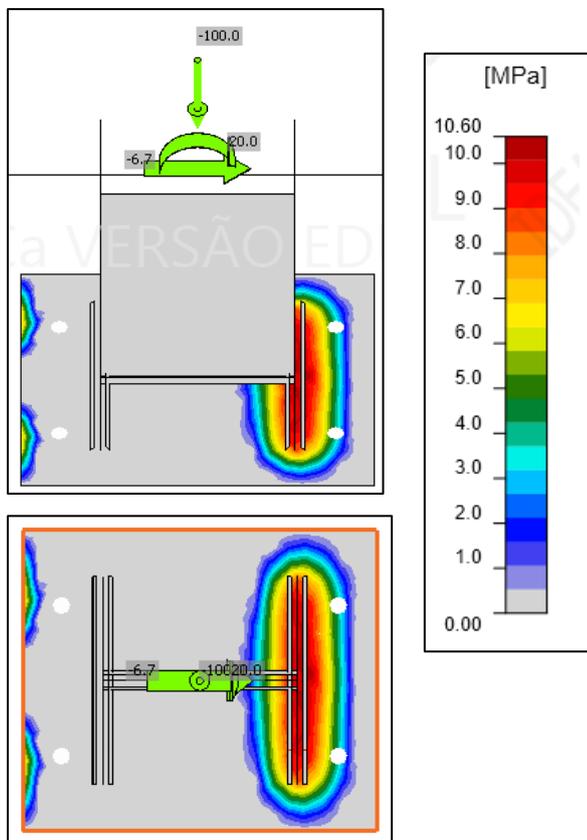
CHAPA (mm)	δh (mm)	DIMINUIÇÃO PERCENTUAL RELATIVA DO DESLOCAMENTO DA COLUNA (%)
10	12,94	-
12	11,62	10,20
16	10,11	21,87
19	9,49	26,63
22	9,13	29,43
25	8,89	31,28
32	8,60	33,54
38	8,51	34,24

Fonte: Autor

A seguir serão apresentadas, para efeitos de comparação, as tensões no concreto e também no aço (chapa, pilar, parafusos), para as placas de 10mm e de 25mm de espessura. A escolha dessas duas placas para comparação se deu por conta de a chapa de 10mm ser a de menor espessura dimensionada, enquanto que a chapa de 25mm ser uma espessura considerada já elevada, mas usual. Espessuras maiores que essa, como a de 32mm e de 35mm não são tão comuns em chapas de base.

Iniciando pela placa de espessura de 10mm, a figura 21 demonstra a magnitude das tensões que chegam à fundação.

Figura 21 – Tensão no concreto, placa com espessura de 10mm

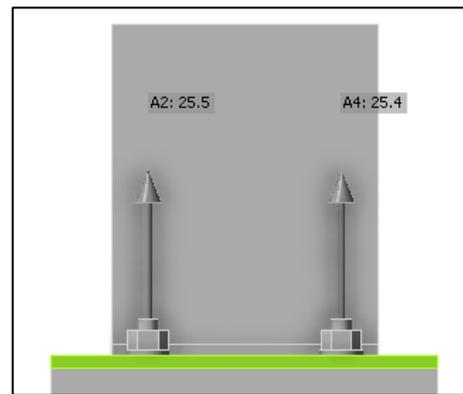


Fonte: Autor

É possível perceber o surgimento de tensões de compressão no concreto inclusive no lado tracionado do binário de forças, isso ocorre por conta da deformação da chapa que comprime esse lado da fundação, demonstrando assim de maneira clara o efeito alavanca ocorrendo.

A seguir, a figura 22 expõe as forças de tração nos dois chumbadores localizados no lado tracionado da placa de base.

Figura 22 – Força de tração, em kN, nos parafusos, chapa de base de 10mm

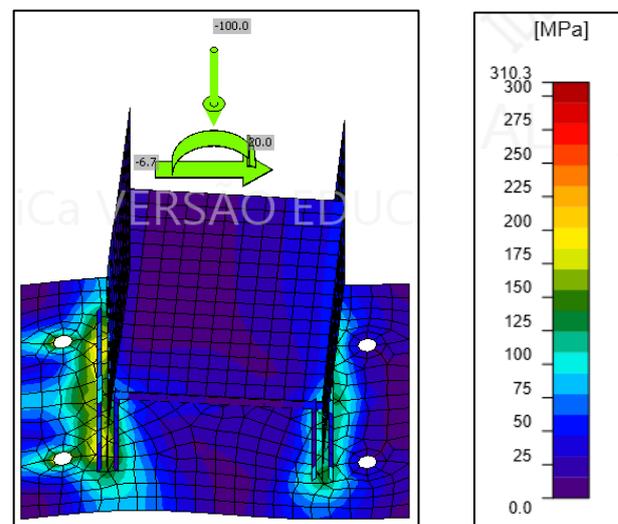


Fonte: Autor

Pela equação 14, pode-se mensurar a força resistente de um parafuso ASTM 325 de 5/8”, que é igual a 260 kN, valor mais que 10 vezes maior que o solicitado nesse caso.

Seguindo com a análise, a figura 23 dá a magnitude das tensões equivalentes no aço da placa e do perfil, além disso se tem o comportamento, fora de escala, da deformada da ligação.

Figura 23 – Tensão equivalente e deformada da ligação, placa de base de 10mm



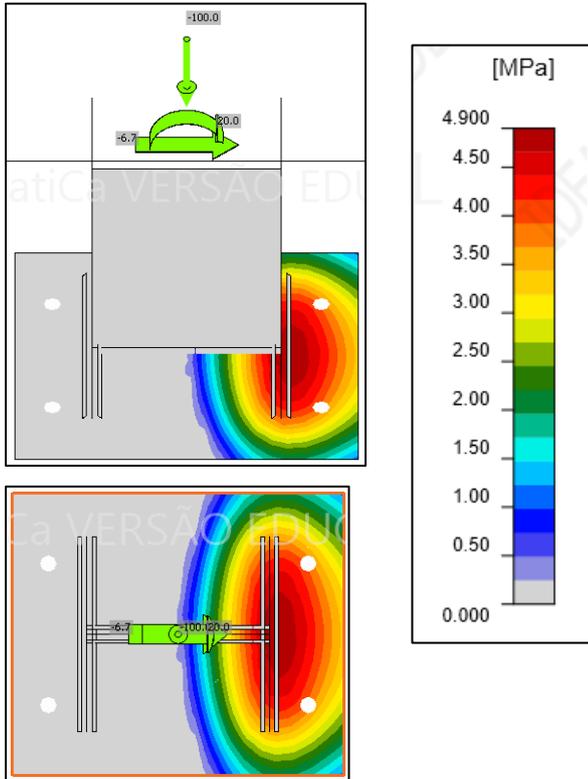
Fonte: Autor

Essa tensão equivalente, demonstrada na figura 23, é a tensão de Von Mises (ou tensão equivalente de Von Mises), que é amplamente utilizada em análises estruturais para avaliar o estado de tensão em materiais dúcteis.

A tensão máxima atingida pela placa (no lado esquerdo da imagem, em amarelo) fica em torno de 210MPa, ou seja, o aço (A-36), se encontra em regime linear, não atingindo o seu patamar de escoamento.

Agora, partindo para a placa de 25mm, têm-se as magnitudes das tensões no concreto expostas na figura 24.

Figura 24 – Tensão no concreto, placa com espessura de 25mm



Fonte: Autor

Veja na figura 24, que com uma chapa mais rígida e conseqüentemente menos deformável, não há o aparecimento do efeito alavanca.

Nota-se ainda, que a tensão solicitante na fundação, com a placa de 25mm, é mais que duas vezes menor do que com a placa de espessura de 10mm. Para explicar esse fato, pode-se recorrer a resistência dos materiais. Considerando a fórmula de tensão na placa igual a:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \tag{48}$$

Sendo:

- M: Momento fletor aplicado;
- y: Distância da face mais comprimida ou tracionada a linha neutra;
- I: Momento de inércia;

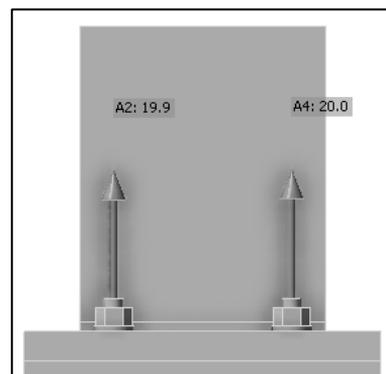
E sendo I pra uma seção retangular igual a:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \tag{49}$$

Tem-se que h será igual a espessura da chapa de base nesse caso, e, portanto, é intuitivo perceber que o momento de inércia aumenta com o aumento da espessura da chapa, o que explica a diminuição na tensão na placa, e que conseqüentemente gera uma transferência de menos tensão ao concreto e também aos parafusos. Por fim, têm-se ainda a contribuição de y, que tende a ter seu valor minorado com o aumento de h.

Prosseguindo, pode-se verificar as forças de tração nos parafusos responsáveis por suportar esse esforço na placa de 25mm.

Figura 25 – Força de tração, em kN, nos parafusos, chapa de base de 25mm

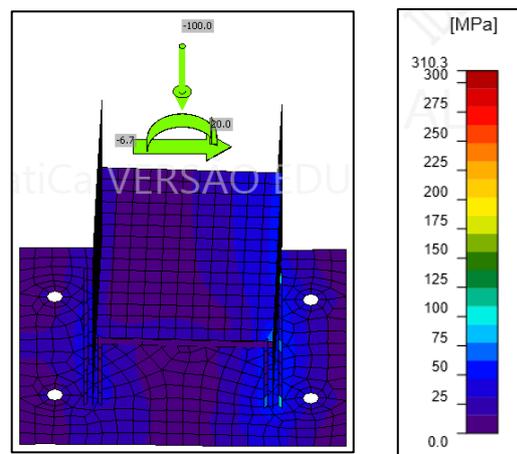


Fonte: Autor

Com tensões menores a força solicitante dos chumbadores conseqüentemente também é reduzida.

A seguir, na figura 26, é mostrada a magnitude da tensão equivalente nos elementos compostos de aço da ligação.

Figura 26 – Tensão equivalente e deformada da ligação com placa de base de 25mm



Fonte: Autor

A tensão máxima, para a ligação com placa de base de espessura de 25mm, submetida aos respectivos esforços indicados, é igual a 60 MPa.

4.2 CASO 2

Foram analisadas ligações com chapas de espessura variando de 13mm a 38mm.

A tabela 9 mostra os resultados para a rigidez inicial e secante, rotação e deslocamento no topo do pilar.

Tabela 9 – Resultados de rigidez, rotação e deslocamento do pilar para esforços do caso 2

FLEXO-TRAÇÃO COM CISALHAMENTO				
CHAPA (mm)	RIG. INICIAL (MN.m/rad)	RIG. SECANTE (MN.m/rad)	ROTAÇÃO (mrad)	δh (mm)
13*	7,00	7,20	2,80	14,46
16	9,40	9,60	2,10	12,37
19	11,00	11,70	1,70	11,24
22	12,40	13,40	1,50	10,59
25	13,50	14,70	1,40	10,19
32	15,50	16,60	1,20	9,72
38	16,20	17,40	1,20	9,55

*Não passou na verificação quanto a arrancamento de cone.

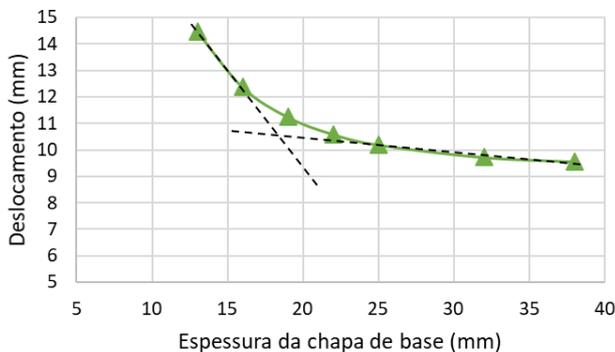
Fonte: Autor

Pela tabela 9 pode-se notar um ganho de rigidez inicial de 131% e um ganho de rigidez secante de 141%.

O valor de 13mm é a menor espessura de chapa calculada conforme equação 6, estabelecida pela norma. Para essa espessura o parâmetro de deslocamento limite conforme demonstrado na tabela 6, não é atendido, somente a partir da chapa de 32mm que o limite de $H/300$ é respeitado.

A seguir a figura 27 traz o gráfico que compara o deslocamento do topo da coluna com a variação da espessura da chapa de base.

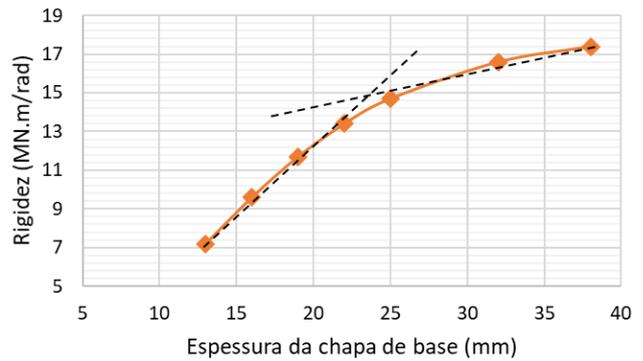
Figura 27 – Deslocamento da coluna x Espessura da placa de base



Fonte: Autor

Já a figura 28, traz o gráfico que compara a variação da rigidez secante com o aumento da espessura da placa.

Figura 28 – Rigidez secante x Espessura da placa de base



Fonte: Autor

Nota-se, na flexo-tração, o mesmo padrão observado na flexo-compressão, com a rigidez apresentando uma tendência proporcional até certo ponto, ao longo do aumento da espessura da chapa, conforme mostrado na Figura 28, enquanto que o deslocamento tem sua curva abaulada um pouco antes no gráfico, como indicado na Figura 27 e atestado pela tabela 10. A tabela 10 tem o mesmo escopo da tabela 7.

Tabela 10 – Diminuição relativa do deslocamento com o aumento da espessura da placa de base

CHAPA (mm)	AUMENTO PERCENTUAL DA ESPESSURA DA CHAPA (%)	δh (mm)	DIMINUIÇÃO DO DESLOCAMENTO A CADA MM AUMENTADO DE CHAPA (mm)
13	-	14,46	-
16	23,1	12,37	0,697
19	18,8	11,24	0,377
22	15,8	10,59	0,217
25	13,6	10,19	0,133
32	28,0	9,72	0,067
38	18,8	9,55	0,028

Fonte: Autor

O ganho percentual relativo na diminuição do deslocamento da coluna com o aumento da espessura da chapa pode ser observado na tabela 11.

Tabela 11 – Diminuição percentual relativa do deslocamento da coluna com o aumento da espessura da placa de base

CHAPA (mm)	δh (mm)	DIMINUIÇÃO PERCENTUAL RELATIVA DO DESLOCAMENTO DA COLUNA (%)
13	14,46	-
16	12,37	14,45
19	11,24	22,27
22	10,59	26,76
25	10,19	29,53
32	9,72	32,78
38	9,55	33,93

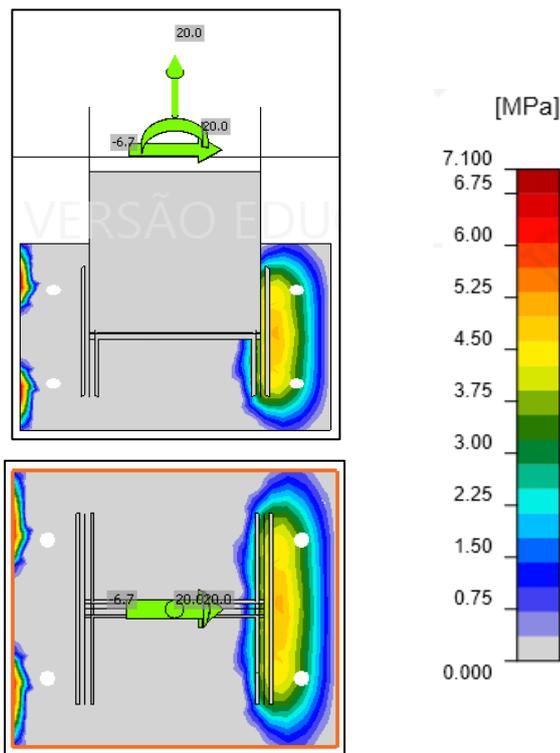
Fonte: Autor

Nota-se uma diminuição percentual de cerca de 34% quando comparamos as chapas de 13mm e 38mm que são respectivamente as de menor e maior espessura analisadas.

A seguir serão apresentadas, para efeitos de comparação, as tensões no concreto e no aço (chapa, pilar, parafusos), para as placas de 10mm e de 25mm de espessura.

Começando pela placa de espessura de 13mm, pode-se observar pela figura 29 a magnitude das tensões no concreto.

Figura 29 – Tensão no concreto, placa com espessura de 13mm

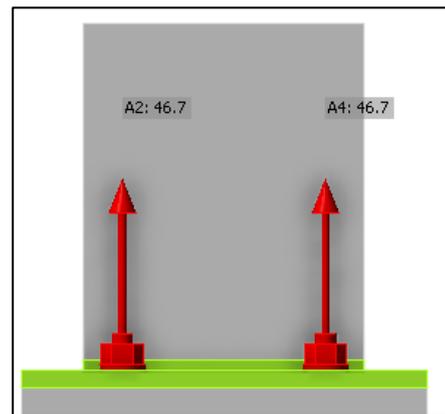


Fonte: Autor

Nota-se a presença do efeito alavanca com as tensões de maiores magnitudes ficando localizadas no lado esquerdo da chapa.

A seguir, a figura 30 mostra as forças de tração nos dois chumbadores responsáveis por suportar esse esforço.

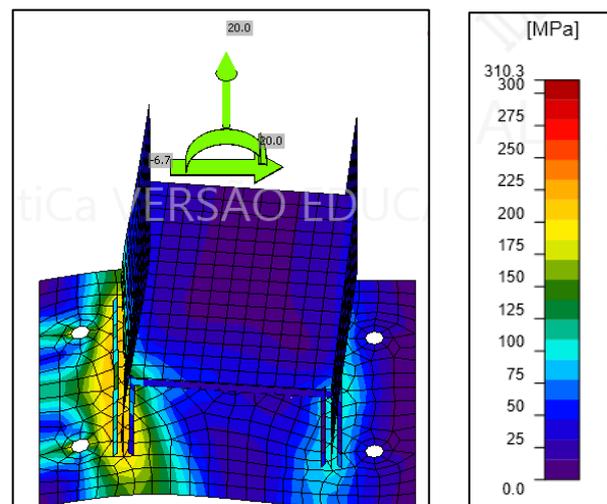
Figura 30 – Força de tração, em kN, nos parafusos, chapa de base de 13mm



Fonte: Autor

Seguindo com a análise, a figura 31 expõe a magnitude das tensões equivalentes no aço da placa e do perfil, além disso se tem o comportamento, fora de escala, da deformada da ligação.

Figura 31 – Tensão equivalente e deformada da ligação com placa de base de 13mm

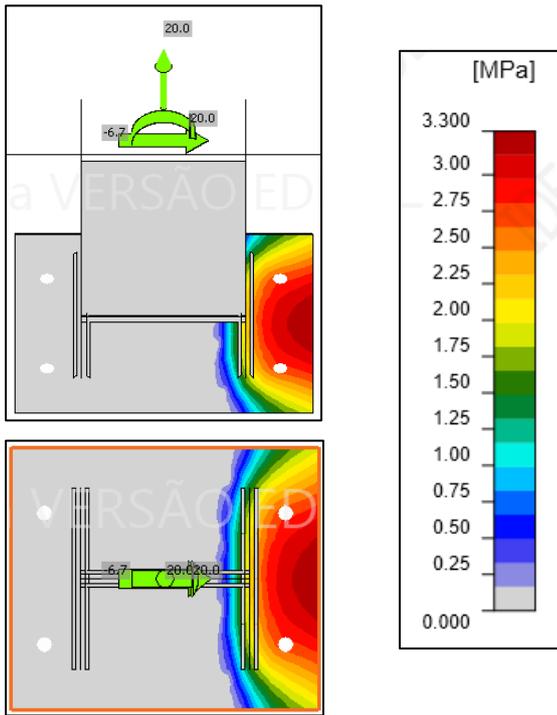


Fonte: Autor

Comparando as tensões equivalentes da chapa de 13mm submetida a flexo-tração com a chapa de 10mm submetida a flexo-compressão, nota-se que a tensão máxima na tração é ligeiramente maior aqui, cerca de 225MPa, além disso a área submetida a essa magnitude de tensão também é maior, como mostra a figura 31. Por fim, a maior tensão da ligação, ocorre no perfil, que atinge 262MPa.

Passando para a placa de 25mm, têm-se as magnitudes das tensões no concreto expostas na figura 32.

Figura 32 – Tensão no concreto, placa com espessura de 25mm

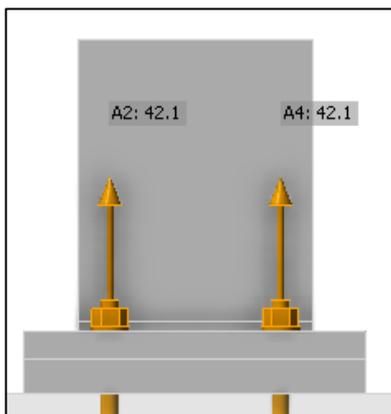


Fonte: Autor

Percebe-se a ausência de efeito alavanca com as tensões se concentrado apenas no lado direito da placa.

Prosseguindo, pode-se verificar as forças de tração nos parafusos pela figura 33.

Figura 33 – Força de tração, em kN, nos parafusos, chapa de base de 25mm

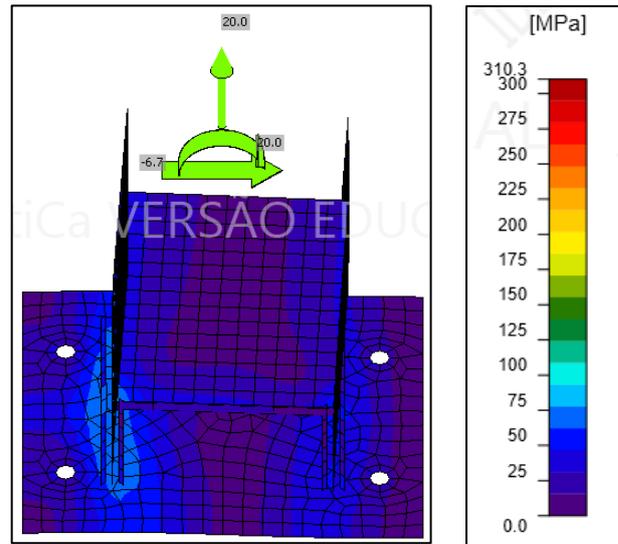


Fonte: Autor

Percebe-se que a força de tração é ligeiramente menor na chapa de 25mm.

A seguir, na figura 34, é mostrada a magnitude da tensão equivalente nos elementos de aço da ligação.

Figura 34 – Tensão equivalente e deformada da ligação com placa de base de 25mm



Fonte: Autor

A tensão máxima atingida pela chapa de 25mm submetida ao esforço de flexo-tração com cisalhamento foi igual a cerca de 80 MPa.

5. CONCLUSÃO

A espessura da chapa é apenas um entre uma série de fatores que influenciam na rigidez de uma ligação na base de um pilar. Outros fatores como: o diâmetro e a quantidade de chumbadores, a resistência e o tamanho da perna da solda, as demais dimensões da placa de base, a resistência do concreto da fundação, além da magnitude e orientação dos esforços, interfere também na conexão.

Quanto maior a força de compressão sobre o pilar maior é também a rigidez da ligação, pois a compressão centrada é favorável a não rotação da chapa, fato esse que não ocorre quando se têm um esforço de tração que contribui na destabilização da placa. Exemplo claro disso está no fato de o esforço normal de tração, mesmo sendo cinco vezes menor, ter provocado maiores deslocamentos quando comparado ao esforço de compressão, observando a mesma espessura de chapa.

Na etapa de pré-dimensionamento da flexo-tração, a verificação quanto ao arrancamento dos chumbadores foi o principal fator limitante dos esforços, enquanto que na flexo-compressão não houve nenhuma verificação que se destacasse como limitante.

Fica claro que o aumento da espessura da chapa de base causa um aumento da rigidez da ligação e uma diminuição no deslocamento horizontal no topo do pilar, esse aumento pode ser o responsável por fazer

com que a ligação passe a atender requisitos de serviço recomendados por norma. Todavia, ficou evidente que a partir de espessuras maiores, a diminuição no deslocamento no topo das colunas pela variação da espessura da placa de base, é limitada. Por conta disso, quando há uma necessidade de ganho de rigidez, principalmente em estruturas de grande porte, se recorre ao uso de enrijecedores.

A diminuição percentual do deslocamento, no topo do pilar, na flexo-compressão foi de 34%, quando comparadas uma chapa de 10mm com uma de 38mm. Na flexo-tração a diminuição foi basicamente a mesma, porém, comparando uma chapa de 13mm com uma de 38mm. Enquanto isso o aumento da rigidez inicial foi de até 191%, e da rigidez secante foi de até 183% ambos na flexo-compressão com cisalhamento.

O IDEA StatiCa utiliza o CBFEM (Método dos Elementos Finitos Baseado em Componentes) que pode capturar efeitos de comportamento local e interação entre componentes, para calcular as rigidezes. Por isso, a rigidez inicial pode ser subestimada no modelo, enquanto a rigidez secante reflete o comportamento consolidado da conexão. Portanto, se faz necessário ter em mente essa possível divergência do software, para entender e avaliar os dados expostos.

Uma solução para tornar a ligação por chapa de base mais simples e menos onerosa, seria manipular o esforço de cisalhamento de modo a evitar sua transferência para a fundação. Isso poderia ser feito liberando o deslocamento na direção de aplicação do esforço. A adoção de aparelhos de apoio ou de furos oblongos são alternativas práticas para isso.

Simplificações são muito comuns no âmbito da engenharia civil, entretanto é essencial compreendê-las e avaliá-las corretamente, pois podem impactar significativamente o resultado final do projeto. A concepção de uma base como totalmente engastada ou rotulada deve ser coerente com o projeto e a execução da ligação. Na prática, as ligações são semirrígidas, transferem momentos e permitem rotações, e esses efeitos precisam ser entendidos e considerados no dimensionamento.

A norma NBR 8800 antes de sua nova versão no ano de 2024, não contemplava em seu escopo o dimensionamento de placas de base, sendo apenas indicada em um de seus anexos que este deveria ser feito conforme Fisher e Kloiber (2006). Apesar de tratar diretamente do assunto agora, esse tipo de ligação ainda carece de mais orientações e disposições gerais, existindo ainda certas restrições de cálculo. As

dimensões mínimas para a locação dos chumbadores na chapa de base, por exemplo, são válidas apenas para parafusos fabricados em aço tipo A-36.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary**. Farmington Hills, MI: ACI, 2019;
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL. **Projeto de fixações com chumbadores mecânicos pré-instalados e pós-instalados em elementos de concreto**. São Paulo, 2022;
- 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, 2024;
- 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, JOEL DONIZETE. **Resistência à tração de chumbadores com placa de ancoragem instalados em concreto**. Tese (Mestrado em Estruturas e Construção Civil - Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília). Brasília, p.167, 2006.
- PFEIL, WALTER. **Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático segundo NBR 8800:2008**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009;
- PIMENTA, ROBERVAL JOSÉ. **Ligações de Apoio de Pilares em Perfil Tubular**. Construmetal 2010 – Congresso Latino Americano da Construção Metálica. São Paulo, Brasil; 2010;
- SANTOS, L. BARBOSA. **Influência da Rigidez das Ligações em Estruturas de Aço**. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo). São Carlos, p. 194, 1988;