

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

PETRICK EICHWALD ROSA DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA CÁLCULO DE CHAPA DE BASE
DE PILARES DE AÇO**

**PORTO ALEGRE
2023**

PETRICK EICHWALD ROSA DOS SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA CÁLCULO DE CHAPA DE
BASE DE PILARES DE AÇO

Projeto final de curso apresentado à Comissão de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Enio Carlos Mesacasa Júnior, Dr.

Porto Alegre

2023

©2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Av. Paulo Gama, 110

Porto Alegre – RS CEP: 90046-900

Este exemplar é de propriedade da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Dos Santos, Petrick Eichwald Rosa.

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA CÁLCULO DE CHAPA DE BASE DE PILARES DE AÇO / Petrick Eichwald Rosa Dos Santos. –

Porto Alegre, 2023.

69 f.

Orientador(es): Enio Carlos Mesacasa Júnior.

Projeto final de curso (graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Engenharia Civil, 2023.

1. Ligações. 2. pilares. 3. chapa de base. 4. estruturas de aço. 5. software. 6. Python. 7. Windows. i. Mesacasa Júnior, Enio Carlos (orient.)
ii. Título

PETRICK EICHWALD ROSA DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA CÁLCULO
DE CHAPA DE BASE DE PILARES DE AÇO**

Projeto final de curso apresentado à Comissão de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(es): Enio Carlos Mesacasa Júnior.

Aprovado em Porto Alegre, 06 de setembro de 2023, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Enio Carlos Mesacasa Júnior - **Orientador**
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Felipe Schaedler de Almeida
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia
Universidade de Passo Fundo

Porto Alegre
2023

*Este trabalho é dedicado a todos que
acreditaram em mim e fizeram
parte dessa jornada.*

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento principal é para minha mãe que em todos os anos da minha vida nunca mediu esforços para me proporcionar as melhores oportunidades, que me mostrou desde pequeno que grandes resultados vinham com muita dedicação, e que a educação sempre foi o melhor caminho para o sucesso. Agradeço também meu padrasto por todo companheirismo e carinho que prosperaram na nossa família com a presença dele. À minha namorada pelo apoio que ajudou a tornar essa etapa menos conturbada. Aos meus amigos que entenderam e respeitaram a minha ausência. Aos meus chefes e mentores pela confiança e pelo conhecimento que possibilitaram o meu crescimento profissional. E por último, mas não menos importante, um agradecimento especial para meu orientador, Enio, que disponibilizou seu tempo e conhecimento os quais tornaram possível a conclusão dessa jornada, muito obrigado.

*"A educação é a arma mais poderosa
que você pode usar para mudar o mundo."
(Nelson Mandela)*

RESUMO

As ligações de base de pilares são cruciais para garantir a estabilidade e segurança das estruturas de aço permitindo a transferência eficiente das cargas da superestrutura para as fundações. Este estudo aborda a análise e projeto de tais conexões, levando em consideração fatores como geometria, materiais e solicitações para o dimensionamento adequado. O objetivo principal é compreender o comportamento das ligações frente a diversas combinações de solicitações e propriedades dos elementos. Além disso, o estudo apresenta as metodologias empregadas no desenvolvimento de um software para sistema operacional Windows, utilizando a linguagem de programação Python, com o propósito de oferecer uma ferramenta prática para engenheiros e projetistas possibilitando o cálculo dessas conexões. O software considera fatores como espessura, dimensões e materiais das chapas de base para determinar sua influência na capacidade de carga das ligações. Com uma interface intuitiva, o programa automatiza os cálculos de acordo com as recomendações das normas atuais, gerando resultados confiáveis para embasar decisões de projeto. Os resultados obtidos a partir dos estudos, com base nos valores extraídos do software, ressaltam a importância da análise criteriosa das chapas de base nas ligações de pilares metálicos, demonstrando como diferentes configurações desses elementos afetam o desempenho estrutural. Ao acelerar o processo de cálculo, o aplicativo ofereceu uma contribuição prática ao permitir uma avaliação eficiente de variados cenários de projeto.

Palavras-chave: Ligações. pilares. chapa de base. estruturas de aço. software. Python. Windows.

ABSTRACT

The column's base connections are crucial for ensuring the stability and safety of steel structures, allowing for the efficient transfer of loads from the superstructure to the foundations. This study addresses the analysis and design of these connections, taking into consideration factors such as geometry, materials, and loads for proper design. The main objective is to understand the behavior of these connections under different combinations of loads and element properties. Additionally, the study presents the methodologies used in developing software for the Windows operating system, using the Python programming language, with the purpose of providing a practical tool for engineers and designers to calculate these connections. The software considers factors such as thickness, dimensions, and materials of the base plates to determine their influence on the load-bearing capacity of the connections. With an intuitive interface, the program automates calculations in accordance with current standards' recommendations, generating reliable results to support design decisions. The results obtained from the studies, based on values extracted from the software, highlight the importance of careful analysis of the base plates in steel column connections, demonstrating how different configurations of these elements affect structural performance. By speeding up the calculation process, the application has provided practical assistance by enabling an efficient evaluation of various design scenarios

Keywords: Connections. columns. base plate. steel structures. software. Python. Windows.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Conexão de base de pilares.	17
Figura 2 – Exemplos de bases de pilares.	18
Figura 3 – Pressão de contato sobre apoios de concreto	25
Figura 4 – Esforço de compressão sobre chapa base.	26
Figura 5 – Carga distribuída sobre extremidade da chapa base	27
Figura 6 – Distâncias das linhas de flexão do perfil.	28
Figura 7 – Teoria da linha de escoamento.	31
Figura 8 – Flexão causada na chapa	32
Figura 9 – Posição dos chumbadores para cálculo do momento na chapa.	32
Figura 10 – Distância x	33
Figura 11 – Chapa base submetida a força de excentricidade pequena	36
Figura 12 – Chapa base com grandes momentos	38
Figura 13 – Variação da espessura para diferentes seções	52
Figura 14 – Variação das espessuras das ligações do W310x38,7 com a variação da resistência característica do concreto à compressão do concreto.	54
Figura 15 – Variação da espessura pela proporção da áreas para seção W310x38,7	55
Figura 16 – Variação da espessura pela proporção da áreas para seção W310x38,7	56
Figura 17 – Variação da espessura por chumbadores	57
Figura 18 – Disposições construtivas dos chumbadores	63
Figura 19 – Interface gráfica do software desenvolvido no trabalho	64
Figura 20 – Resultados obtidos no exemplo 4,1	67
Figura 21 – Resultados obtidos no exemplo 4,6	68
Figura 22 – Resultados obtidos no exemplo 4,7	69
Figura 23 – Resultados obtidos no exemplo 4,11	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente para cálculo da tensão de aderência (η_1)	44
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AISC	American Institute of Steel Construction
ASD	Allowable Stress Design
GUI	Graphical User Interface
LRFD	Load and Resistance Factor Design
NBR	Norma Brasileira
OSHA	Occupational Safety and Health Administration

LISTA DE SÍMBOLOS

A_1	Área da chapa base
A_2	Área de concreto geometricamente similar à área carregada
A_b	Área nominal dos chumbadores
A_{be}	Área líquida efetiva dos chumbadores
$A_{b,calc}$	Área de chumbador necessária na ligação
$A_{b,ef}$	Área de chumbador utilizada na ligação
A_v	Área dos chumbadores resistentes ao cisalhamento
a_2	Distância entre chumbadores
B	Largura da chapa base
$b_{ef,f}$	Comprimento efetivo de resistência a flexão do perfil
b_f	Largura do perfil metálico
d	Altura do perfil metálico
e	Excentricidade da força solicitante
e_{crit}	Excentricidade crítica
F_{nt}	Tensão resistente de tração dos chumbadores
F_{nv}	Tensão resistente de cisalhamento dos chumbadores
$F_{t,Rd}$	Força resistente de tração unitária dos chumbadores
F_u	Tensão resistente do material dos chumbadores
F_y	Tensão de escoamento do material da chapa base
f	Distância do eixo do perfil ao eixo dos chumbadores
f_{bd}	Resistência de aderência de cálculo
f'_c	Resistência característica do concreto
f_{ck}	Resistência característica do concreto
f_{ctd}	Resistência de cálculo de compressão do concreto

$f_{ctk,inf}$	Resistência à tração direta característica
f_p	Tensão de compressão solicitante
$f_{p(max)}$	Tensão de compressão resistente do concreto
f_{pu}	Tensão solicitante de cálculo entre a chapa base e o concreto
f_t	Tensão de tração total dos chumbadores
f_{ub}	Tensão de ruptura dos chumbadores
f_v	Tensão solicitante de cisalhamento
f_{yd}	Resistência ao escoamento do aço
l	Balanço da chapa base
l_b	Comprimento de ancoragem básico
$l_{b,min}$	Comprimento de ancoragem mínimo
$l_{b,nec}$	Comprimento de ancoragem necessário
M_{pi}	Momento gerado pela tração dos chumbadores interno ao perfil
M_{pe}	Momento gerado pela tração dos chumbadores externos ao perfil
M_{pl}	Momento fletor de plastificação da seção
M_{pu}	Momento nas extremidades da chapa base
M_u	Momento solicitante de cálculo
$M_{x,Sd}$	Momento fletor solicitante de cálculo em relação ao eixo x
$M_{x,Rd}$	Momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo x
$M_{y,Sd}$	Momento fletor solicitante de cálculo em relação ao eixo y
$M_{y,Rd}$	Momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo y
m	Distância da linha de flexão paralela a mesa do perfil
N	Comprimento da chapa base
N_{Sd}	Força axial solicitante de cálculo
N_{Rd}	Força axial resistente de cálculo
n	Distância da linha de flexão paralela a alma do perfil

n'	Linha teórica de escoamento do balanço da chapa base
P_p	Força axial de compressão resistente de cálculo
P_u	Força axial de compressão solicitante de cálculo
q	Carga linear solicitante de compressão do concreto
q_{max}	Carga linear resistente de compressão do concreto
R_n	Força nominal de tração resistente de cálculo
T_r	Força de tração solicitante por chumbador
T_u	Força de tração solicitante na linha do eixo dos chumbadores
t_f	Espessura da mesa do perfil
t_{min}	Espessura mínima da chapa de base
t_w	Espessura da alma do perfil
V_u	Força de cisalhamento solicitante de cálculo
x	Distância do eixo dos chumbadores à linha de flexão do perfil
Y	Comprimento da tensão de contato entre o concreto e a chapa
Z	Módulo resistente plástico
γ_{a2}	Coefficiente de ponderação da resistência
γ_c	Coefficiente de ponderação da resistência do concreto
γ_n	Coefficiente de ponderação
η_1	Coefficiente de rugosidade da barra ancorada
η_2	Coefficiente de posição da barra ancorada
η_3	Coefficiente de diâmetro da barra ancorada
$\sigma_{c,Rd}$	Tensão de compressão resistente do concreto
ϕ	Fator de redução LRFD

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS GERAIS	20
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.3	DELIMITAÇÕES	20
2	DIMENSIONAMENTO	22
2.1	DIMENSIONAMENTO DA CHAPA BASE	22
2.1.1	Dimensionamento para força axial de compressão	23
2.1.1.1	Tensão de compressão resistente do concreto	24
2.1.1.2	Tensão de compressão solicitante	25
2.1.1.3	Flexão na chapa de base	26
2.1.1.4	Espessura da chapa de base (método dos balanços)	27
2.1.1.5	Espessura da chapa de base (teoria da linha de escoamento)	30
2.1.2	Dimensionamento para força axial de tração	31
2.1.2.1	Flexão da chapa de base	31
2.1.2.2	Espessura da chapa de base	33
2.1.3	Dimensionamento para pequenos momentos	34
2.1.3.1	Excentricidade da carga	35
2.1.3.2	Carga linear	36
2.1.3.3	Comprimento da carga linear	36
2.1.3.4	Tensão de compressão solicitante	37
2.1.3.5	Espessura da chapa de base	37
2.1.4	Dimensionamento para grandes momentos	38
2.1.4.1	Comprimento da carga linear	39
2.1.4.2	Espessura da chapa de base	39
2.2	DIMENSIONAMENTO DA ANCORAGEM	40
2.2.1	Força resistente à tração das barras de ancoragem	40
2.2.2	Resistência ao cisalhamento das barras de ancoragem	41
2.2.3	Barras de ancoragem submetidas a tração e cisalhamento	42
2.2.4	Comprimento de ancoragem	43
2.2.4.1	Comprimento de ancoragem básico	43
2.2.4.2	Resistência de aderência	43
2.2.4.3	Coeficiente para cálculo da tensão de aderência η_2	44
2.2.4.4	Coeficiente para cálculo da tensão de aderência η_3	44
2.2.4.5	Comprimento de ancoragem necessário	45

2.2.5	Disposições construtivas	45
2.3	VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO PERFIL	45
3	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	47
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
4.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS	61
	ANEXO A – DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS	63
	ANEXO B – SOFTWARE CHAPA BASE	64
B.1	INTERFACE GRÁFICA	64
B.2	COMPARTILHAMENTO	65
	ANEXO C – EXEMPLOS DE VALIDAÇÃO	66

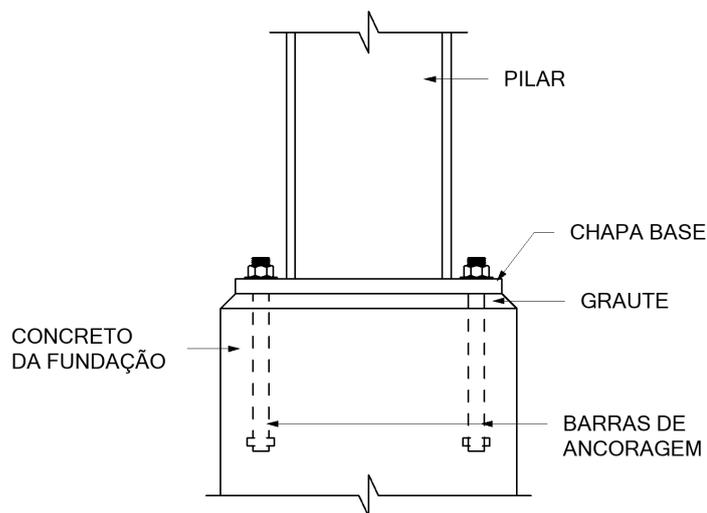
1 INTRODUÇÃO

Sendo uma das principais ligações a serem consideradas no dimensionamento de estruturas metálicas, as bases de pilares são os vínculos estruturais entre os pilares e a fundação, são responsáveis por transferir as cargas provenientes da superestrutura para os elementos de apoio. Importantes para a integridade estrutural, as ligações de base de pilares tem um papel crucial no dimensionamento e no comportamento das edificações, pois além de proporcionar a estabilidade do sistema, têm um impacto significativo no comportamento global da estrutura, influenciando diretamente a capacidade de carga, a rigidez e a resposta sísmica da edificação.

As bases de pilares, ilustradas na Figura 1, também são definidas por Fakury et al. (2016, p.345) da seguinte forma:

As bases de pilar são apoios da estrutura e precisam ser projetadas para transmitir, dependendo de seu tipo, forças axiais, forças cortantes, e momentos fletores. De modo geral, são constituídas por uma placa de base soldada na extremidade do pilar, fixada por chumbadores e, algumas vezes, por barras de cisalhamento a um bloco de concreto da fundação.

Figura 1 – Conexão de base de pilares.

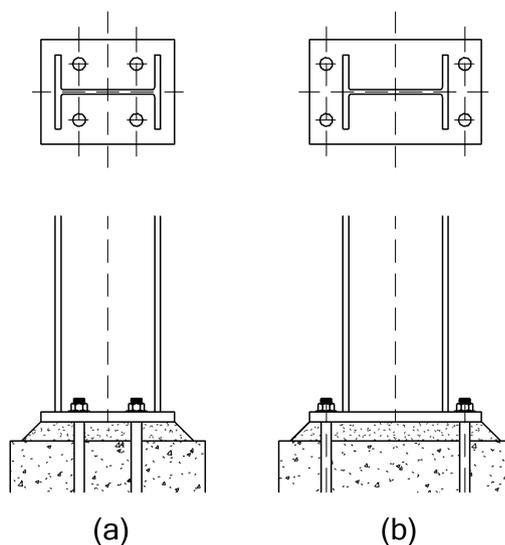


Fonte: adaptado de Fisher e Kloiber (AISC, 2006)

De modo simplificado, as ligações podem ser divididas em dois grupos: ligações de bases rotuladas e ligações de bases engastadas, representadas na Figura 2a e Figura 2b respectivamente. As ligações diferenciam-se pela capacidade de resistência às solicitações atuantes nas bases dos pilares, ambos os tipos de ligações podem ser

capazes de transmitir forças axiais e transversais, porém apenas as bases engastadas tem a capacidade de resistir à momentos fletores.

Figura 2 – Exemplos de bases de pilares.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

As ligações de bases rotuladas têm como característica a chapa soldada na extremidade do pilar com os chumbadores posicionados próximos ao eixo central da ligação. Incapazes de resistir a cargas excêntricas e momentos fletores, as ligações rotuladas transferem para as superfícies de apoio apenas forças axiais e transversais, o que pode resultar em fundações mais econômicas. Deve-se adotar um número mínimo de 4 chumbadores por ligação, mesmo para ligações rotuladas, o motivo é abordado pelo "Safety Standards for Steel Erection" (OSHA, 2001) que recomenda esse valor por questões de segurança e estabilidade nas etapas de montagem das estruturas, prevenindo possíveis acidentes.

As ligações de bases engastadas, geralmente de maiores dimensões quando comparadas com ligações rotuladas, são responsáveis por transmitir para as fundações forças e momentos, proporcionando supraestruturas mais econômicas, porém ligações de bases mais onerosas. Os chumbadores, posicionados do lado externo das ligações, têm a função de criar um braço de alavanca que permite que a ligação resista a esforços de momentos fletores gerados pela excentricidade dos carregamentos, sendo seu dimensionamento fundamental para esse tipo de ligação.

No que tange ao dimensionamento das chapas de bases dos pilares de aço, o anexo S.2 da NBR 8800 (ABNT, 2008) indica que as informações para projeto e cálculo de bases de pilares podem ser obtidas no guia de dimensionamento elaborado por Fisher e Kloiber (AISC, 2006), o material em questão aborda as orientações para

o dimensionamento de ligações de bases de pilares, assim como especificações de materiais, informações sobre detalhes construtivos, tolerâncias e requisitos para placas e barras de ancoragem.

No âmbito da elaboração de projetos estruturais, é usual deparar-se com ligações dimensionadas inadequadamente, isso se dá pela falta de tempo ser muitas vezes uma das principais adversidades no cotidiano dos projetistas, dessa forma a adoção de ferramentas e softwares para desenvolvimento e análise de ligações, com o objetivo de otimizar tempo e enxugar tarefas recorrentes, torna-se vantajoso. Além do mais, com o dimensionamento adequado é possível otimizar-se o uso de materiais e reduzir os custos das ligações, de modo a se contribuir para a economia das estruturas, dessa forma assegura-se uma construção que atenda aos requisitos de segurança estrutural evitando desperdícios de materiais.

Bastante empregada na execução de tarefas rotineiras e funções iterativas, a automação de processos torna-se uma grande aliada dos projetistas permitindo a liberação de recursos para a consecução de tarefas mais críticas e criativas, como resolução de problemas, análise de dados e desenvolvimento de soluções de projeto. Além do mais, a automação de algumas tarefas pode atuar na redução de erros humanos e no aumento da qualidade de resultados, gerando economia de tempo e recursos, aumentando a eficiência e qualidade dos projetos.

Na busca por otimização de tarefas, as linguagens de programação demonstram-se propícias a realização de cálculos matemáticos e processos iterativos, a elaboração de poucas linhas de códigos e algoritmos simples permitem a execução de cálculos complexos e extração de resultados precisos e instantâneos. Contudo, apesar da simplicidade, nem todos os usuários têm familiaridade com linguagens de programação, o que acaba se tornando um obstáculo na implementação de rotinas de cálculo. Uma das alternativas para a falta de intimidade com as linguagens de programação, as interfaces gráficas permitem que os usuários interajam com os programas de forma mais visual, tornando o processo de cálculo mais simples e intuitivo, resultando em um aumento de produtividade.

Neste contexto, apresenta-se nesse trabalho o processo de implementação de uma ferramenta de fácil acesso e distribuição destinada a automatizar o dimensionamento de ligações de bases de pilares metálicos. Desenvolvida com uma interface gráfica clara e intuitiva, a ferramenta tem a intenção de auxiliar estudantes, engenheiros e profissionais da área à reduzir substancialmente o tempo necessário para o dimensionamento de ligações mais eficientes, contribuindo assim para o campo de projetos de estruturas de aço.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um software com interface gráfica que permita o dimensionamento e a verificação das principais dimensões dos elementos que compõe as ligações de bases de pilares metálicos. O software também deve ser capaz de exibir um breve memorial de cálculo que possibilite ao usuário interpretar seus resultados.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Pesquisar bibliografias que abordem ligações de bases de pilares metálicos;
- Identificar as variáveis necessárias para o dimensionamento das ligações, além de suas influências no cálculo e limitações para automatização dos processos de cálculo;
- Implementar rotinas de cálculo para diferentes metodologias de dimensionamento;
- Elaborar uma interface gráfica simples e intuitiva;
- Analisar os resultados extraídos do software;

1.3 DELIMITAÇÕES

O presente trabalho tem como tema central o "Desenvolvimento de software para cálculo de chapa de base de pilares metálicos", focando especificamente no dimensionamento e verificação de ligações para pilares do tipo W com formato I com solicitações de compressão, tração, cortante e momento.

O dimensionamento e verificação para os esforços de momentos se limitaram a ligações com solicitações de momentos fletores atuando no maior eixo de inércia do pilar simultaneamente com forças axiais de compressão, e quando solicitados para esforços cortantes, não sendo abordado o dimensionamento para solicitações de forças axiais de tração juntamente com momentos fletores.

A ligação da extremidade do pilar com a face da chapa de base não foi abordada, porém deve-se garantir total transferência das solicitações para a placa, o uso de enrijecedores na extremidade do pilar também não foi abordado nas metodologias de dimensionamento.

O vínculo entre a chapa de base e a estrutura de concreto foi limitado à utilização de um mínimo de quatro chumbadores, conforme recomendações do "Safety Standards for Steel Erection" (OSHA, 2001), e um máximo de dez chumbadores, porém o usuário

deve-se atentar para a quantidade e material dos chumbadores recomendadas pelas normas brasileiras.

Não foram abordados a utilização de insertos metálicos ou chumbadores mecânicos pós-instalados.

As distâncias mínimas construtivas dos chumbadores seguem metodologias abordadas pela NBR 16239 (ABNT, 2013), não sendo consideradas as distâncias mínimas para as faces da base de concreto.

A verificação dos efeitos combinados das solicitações de força axial e momentos fletores, conforme NBR 8800 (ABNT, 2008) não influencia diretamente o dimensionamento das ligações.

Apesar do projeto de revisão da NBR 8800 (ABNT, 2022) abordar as metodologias para dimensionamento de ligações de base de pilares de aço para solicitações de tração, compressão, momentos fletores e esforços cortantes, as mesmas não serão apresentadas no presente trabalho.

2 DIMENSIONAMENTO

As ligações de bases de pilares de aço do tipo W com formato I podem ser dimensionadas com base em diferentes metodologias de cálculo, porém, visando atender as recomendações de dimensionamento do anexo S.2 da NBR 8800 (ABNT, 2008), o guia de dimensionamento "*Steel Design Guide 1*" (AISC, 2006) torna-se o mais adequado para determinação das dimensões das chapas de base dos pilares.

Fisher e Kloiber (AISC, 2006) descrevem os métodos de cálculo para o dimensionamento de chapas de base de pilares metálicos que atendem aos critérios de segurança e confiabilidade definidos pelo "*American Institute of Steel Construction*" (AISC) e pela "*Occupational Safety and Health Administration*" (OSHA), além de fornecer uma série de recomendações relacionadas a materiais, soldas e proteção, com o objetivo de possibilitar ao projetista o dimensionamento de ligações mais econômicas e seguras.

Não se limitando apenas ao guia de dimensionamento elaborado por Fisher e Kloiber, o dimensionamento das ligações de base de pilares proposto no presente capítulo também apresenta métodos que buscam atender aos critérios das normas brasileiras entre outras bibliografias, sendo apresentados quando abordados.

Pimenta et al. (2010, p.2) abordam o dimensionamento das ligações de base de pilares de aço da seguinte forma:

De maneira geral, a ligação de pilares à fundação de concreto armado está sujeita a força axial, de compressão ou tração, a momento fletor e força cortante, que podem induzir os seguintes estados limites últimos: formação de charneira plástica na placa de base, ruptura por tração do chumbador, arrancamento do chumbador, esmagamento do concreto ou da argamassa expansiva de assentamento na região de contato com a placa de base e deslizamento da ligação, assim como a ruptura da solda de ligação do pilar com a placa de base. Os elementos componentes da ligação devem ser dimensionados de forma que os esforços resistentes de cálculo a cada um desses estados-limites últimos seja igual ou superior aos esforços solicitantes de cálculo, determinados pela análise da estrutura, sujeita às combinações de cálculo das ações, conforme determina a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008. (PIMENTA et al., 2010, p.2).

2.1 DIMENSIONAMENTO DA CHAPA BASE

Para a determinação das dimensões da chapa de base, Fisher e Kloiber (AISC, 2006) abordam as orientações para o dimensionamento de cinco combinações diferentes de carregamentos: força axial de compressão, força de compressão com momentos pequenos, força de compressão com momentos grandes, força axial de tração e força

cortante. Para os casos indicados, o guia apresenta as equações que seguem dois diferentes métodos de dimensionamento de estruturas abordadas pelo AISC, o método das tensões admissíveis e o método dos estados limites, traduzidos respectivamente de "Allowable Stress Design" (ASD) e "Load and Resistance Factor Design" (LRFD), ambos os métodos possuem suas características e pode haver divergências entre seus resultados. O método dos estados limites utiliza ponderadores de cargas e resistências para equilibrar segurança e economia no dimensionamento de estruturas, tornando-o economicamente otimizado, sendo este o método vigente na NBR 8800 (ABNT, 2008) será o método abordado nos cálculos de dimensionamento do presente capítulo.

2.1.1 Dimensionamento para força axial de compressão

Para o método de cálculo das dimensões resistentes a forças axiais de compressão com excentricidade nula, as chapas de base são dimensionadas de forma a resistir e transferir para a base de concreto os esforços provenientes da estrutura sem que haja ruptura do concreto por compressão ou plastificação das bordas da chapa de base. O dimensionamento da ligação pode ser dividido em duas etapas principais: determinação da área de chapa de base a partir do limite da tensão de compressão resistente do concreto; definição da espessura da chapa com base nas suas linhas de flexão e no limite de escoamento do material da placa.

DeWolf e Ricker (1990, p.1, tradução nossa) ainda descrevem as ligações de base de pilares de aço solicitadas apenas por forças axiais de compressão da seguinte forma:

O carregamento é perpendicular à placa e passa pelo centroide do pilar. São usadas em estruturas em que as bases dos pilares são consideradas fixas. Uma camada de graute é usada para nivelar a chapa e posicioná-la na elevação específica. Chumbadores são utilizados para estabilizar o pilar durante a montagem, e sua resistência pode ser desprezada. O pilar e a placa de base geralmente são centralizados na fundação de concreto. Se a carga do pilar for relativamente pequena, o tamanho necessário da placa de base, determinado pela capacidade de carga do concreto, será aproximadamente igual ou menor que o tamanho do pilar.

Uma vez que o esmagamento do concreto também constitui um estado limite último, é importante que para o dimensionamento das ligações de base de pilares solicitadas por forças axiais de compressão, a tensão solicitante transmitida para a base de concreto não seja superior ao valor resistente, logo, a seguinte condição deve ser atendida:

$$f_p \leq f_{p(max)} \quad (2.1)$$

Onde:

f_p é a tensão de compressão solicitante de cálculo da base de concreto;

$f_{p(max)}$ é a tensão de compressão resistente de cálculo da base de concreto.

2.1.1.1 Tensão de compressão resistente do concreto

A tensão de compressão resistente de cálculo da base de concreto, na área da região carregada sob a placa de base (A_1) abordada na Figura 3, é dada pela NBR 8800 (ABNT, 2008) como:

$$\sigma_{c,Rd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c \gamma_n} \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq f_{ck} \quad (2.2)$$

Onde:

f_{ck} é a resistência característica do concreto;

γ_c é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto;

γ_n é o coeficiente de comportamento, igual a 1,40;

A_1 é a área carregada sob a placa de apoio;

A_2 é a área da superfície de concreto.

O modelo de cálculo definido pela Equação 2.2 se mostra um pouco conservador quando comparado com os valores adotados no projeto de revisão da NBR 8800 (ABNT, 2022), que define a tensão de compressão resistente de cálculo como:

$$\sigma_{c,Rd} = \frac{0,85 f_{ck}}{\gamma_c} \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.3)$$

Os valores adotados pelo projeto de revisão da norma são similares aos valores definidos pelo "Specification for Structural Steel Buildings" (AISC, 2016), que aborda na seção J8 a força de compressão resistente da área de concreto sob a região carregada. Com pequenas divergências nos coeficientes de ponderação, a tensão de compressão resistente da base concreto para o método de "Load and Resistance Factor Design" (LRFD), é definida por Fisher e Kloiber (AISC, 2006) como:

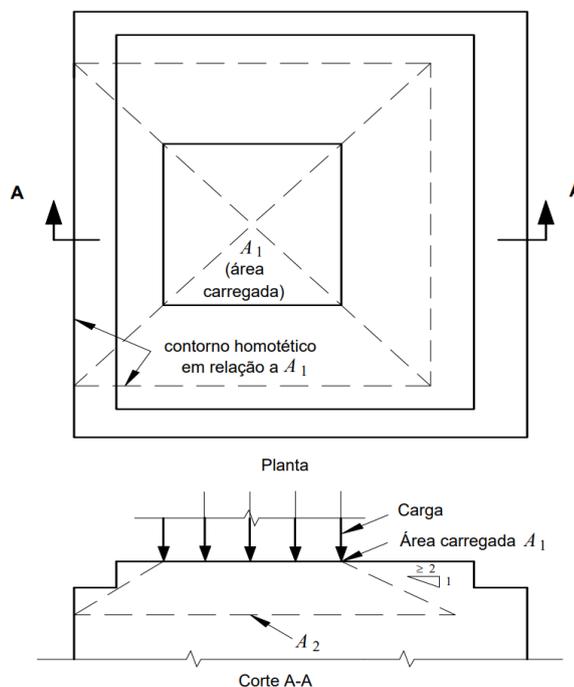
$$f_{p(max)} = \phi (0,85 f'_c) \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq \phi 2 (0,85 f'_c) \quad (2.4)$$

Onde:

f'_c é a resistência característica do concreto;

ϕ é o fator de redução do método dos estados limites, definido na Tabela 21.2.1 do "Building Code Requirements for Structural Concrete" (ACI, 2019), igual a 0,65.

Figura 3 – Pressão de contato sobre apoios de concreto



Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

Observa-se um limite superior nas equações que definem as tensões resistentes das bases de concreto para os modelos de cálculos apresentados, tal fato é justificado por Minchillo (2003, p.19) da seguinte maneira:

Para definição da área do bloco de concreto, DeWolf e Ricker (1990) baseiam-se em resultados de análises experimentais de DeWolf e Sarrisley (1980). Os testes demonstraram que a pressão de contato admissível aumenta quando a área do bloco de concreto é maior do que a área da placa. A maior pressão de contato admissível ocorre quando a área do bloco é maior ou igual a quatro vezes a área da placa.

2.1.1.2 Tensão de compressão solicitante

A tensão de compressão solicitante de cálculo (f_p), ilustrada pela Figura 4, produzida pela reação do concreto à força de compressão sob a área da chapa de base é, muitas vezes, conservadoramente, considerada uniformemente distribuída, conforme abordado por Araújo (2016, p.542):

De uma maneira geral, a pressão no concreto é maior na região diretamente sob o pilar, que é a parte mais rígida da ligação, reduzindo-se na direção das bordas da placa. Essa diferença no valor da pressão é tanto

menor quanto maior for a espessura da placa. Portanto, se a espessura da placa tende ao infinito - na prática a um valor suficientemente grande - a pressão tende a ser uniforme. A hipótese de pressão uniforme mostra-se mais conservadora em relação à hipótese em que a pressão no concreto é mais concentrada sob o pilar, por levar a espessuras maiores da placa e, conseqüentemente, conduzir à situação da própria hipótese utilizada, isto é, de placa espessa e pressão uniforme.

Para os casos de forças axiais de compressão, assume-se que a distribuição de tensões (f_p) sob a chapa de base é uniformemente distribuída sob toda a área de chapa, e pode ser expressa pela Equação 2.5:

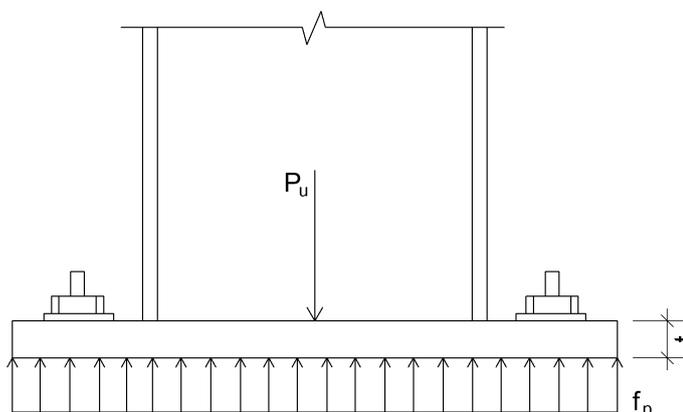
$$f_p = \frac{P_u}{A_1} \quad (2.5)$$

Onde:

P_u é a força axial de compressão solicitante de cálculo;

A_1 é a área carregada sob a placa de apoio.

Figura 4 – Esforço de compressão sobre chapa base.



Fonte: adaptado de Fisher e Kloiber (AISC, 2006)

2.1.1.3 Flexão na chapa de base

A placa deverá ser dimensionada para comportar-se como uma placa rígida, podendo-se admitir que a pressão de contato seja uniformemente distribuída ao longo da placa. Esta por sua vez, comporta-se como uma viga em balanço com carregamento uniformemente distribuído assumindo a ação de um momento fletor em torno de uma seção crítica. (Requena e Santos, 2007)

Assumindo que a tensão de compressão é uniformemente distribuída entre o concreto e chapa de base, calcula-se o momento para os "balanços" da chapa, dimensões m e n ilustradas nas Figuras 5 e 6. Consideradas seções críticas, os momentos para essas seções podem ser calculados a partir das Equações 2.6 e 2.7:

$$M_{pu} = f_p \left(\frac{B m^2}{2} \right) \quad (2.6)$$

$$M_{pu} = f_p \left(\frac{N n^2}{2} \right) \quad (2.7)$$

Onde:

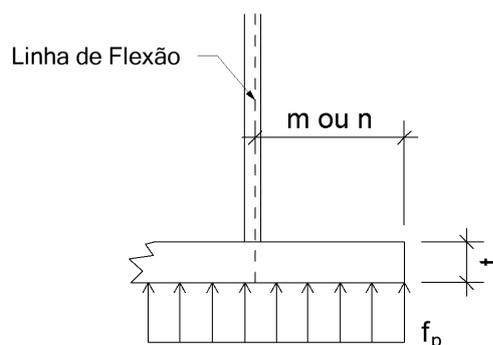
B é a largura da chapa base;

N é o comprimento da chapa base;

m é a seção paralela à mesa do perfil;

n é a seção paralela à alma do perfil.

Figura 5 – Carga distribuída sobre extremidade da chapa base



Fonte: adaptado de Fisher e Kloiber (AISC, 2006)

$$m = \frac{N - 0,95d}{2} \quad (2.8)$$

Onde:

d é a altura do perfil.

$$n = \frac{B - 0,8bf}{2} \quad (2.9)$$

Onde:

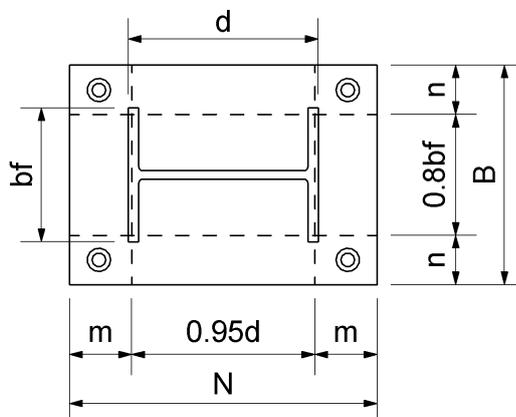
bf é a largura do perfil.

2.1.1.4 Espessura da chapa de base (método dos balanços)

Assumindo uma tensão de compressão uniforme entre a chapa de base e a base de concreto, tem-se que o dimensionamento da espessura da chapa de base é

baseado no limite plástico da seção crítica, o que acaba por resultar em placas de base mais finas por aproveitar mais a capacidade resistente da chapa.

Figura 6 – Distâncias das linhas de flexão do perfil.



Fonte: Fisher e Kloiber (AISC, 2006)

Ainda segundo Piana e Calenzani (2018, p.225) sobre o dimensionamento de ligações de base de pilares:

A placa de base é tratada como um console para o dimensionamento de sua espessura. A placa de base deve ter espessura suficiente para resistir à flexão nas suas seções críticas (distâncias m e n) e, nas bases de perfil I ou H, adicionalmente na região entre as mesas do pilar (distância $\lambda n'$).

Deduzido por Salmon e Johnson (2009, p.730), a equação para determinação da espessura das chapas de base para as ligações de base de pilares é obtida através do limite plástico das seções críticas das chapas de base, onde se tem que o momento fletor de plastificação da seção transversão (M_{pl}) deve ser superior ou igual ao momento solicitante da seção (M_{pu}), conforme:

$$\phi M_{pl} \geq M_{pu} \quad (2.10)$$

Onde:

M_{pl} é o momento fletor de plastificação da seção;

M_{pu} é o momento solicitante da seção.

Sabendo que o momento plástico da seção é dado por:

$$M_{pl} = Z F_y \quad (2.11)$$

Onde:

Z é o módulo resistente plástico;

F_y é a resistência ao escoamento do aço.

O módulo de resistência plástico das seções de "balanço" das chapas de base podem ser obtidos através das Equações 2.12 e 2.13:

$$Z = \frac{N t_p^2}{4} \quad (2.12)$$

$$Z = \frac{B t_p^2}{4} \quad (2.13)$$

A partir das equações dos módulos resistentes plástico (Equações 2.12 e 2.13), temos que os momentos fletores de plastificação das seções críticas (m e n) da chapa de base são dados pelas Equações 2.14 e 2.15:

$$M_{pl} = \left(\frac{N t_p^2}{4} \right) F_y \quad (2.14)$$

$$M_{pl} = \left(\frac{B t_p^2}{4} \right) F_y \quad (2.15)$$

Respeitando a relação abordada na Equação 2.10, se obtém a espessura da chapa de base, igualando o máximo momento fletor solicitante da seção (M_{pu}), Equações 2.6 e 2.7, à resistência de cálculo ao momento fletor (M_{pl}) para o regime limite plástico.

$$\phi \left(\frac{N t_p^2}{4} \right) F_y = f_p \left(\frac{N n^2}{2} \right) \quad (2.16)$$

$$\phi \left(\frac{B t_p^2}{4} \right) F_y = f_p \left(\frac{B m^2}{2} \right) \quad (2.17)$$

Resolvendo as equações 2.16 e 2.17 para t_p temos que as espessuras das chapas de base para o limite plástico das seções são dadas por:

$$t_p = m \sqrt{\frac{2f_p}{\phi F_y}} \quad (2.18)$$

$$t_p = n \sqrt{\frac{2f_p}{\phi F_y}} \quad (2.19)$$

Sabendo que ϕ é o fator de redução do método dos estados limites e tem seu valor igual a 0,90, podemos chegar nas seguintes equações de espessuras de chapas de base:

$$t_p = 1,5 m \sqrt{\frac{f_p}{F_y}} \quad (2.20)$$

$$t_p = 1,5 n \sqrt{\frac{f_p}{F_y}} \quad (2.21)$$

2.1.1.5 Espessura da chapa de base (teoria da linha de escoamento)

Ainda assim, as ligações com forças axiais de compressão solicitante de baixas magnitudes podem resultar em dimensões de chapa não muito maiores que as dimensões dos perfis. Para esses casos a seção crítica das chapas de base pode estar entre as mesas do perfil, e não nas faces externas. Abordado por Thornton (AISC, 1990) o comprimento efetivo do "balanço" ($\lambda n'$) será o responsável nesses casos por gerar chapas mais espessas.

Para complementar o método da viga em balanço para placas de base grandes, que na verdade é um método de linha de escoamento, é consistente utilizar a teoria de linha de escoamento aplicada à porção da placa de base contida dentro da altura e largura do perfil. (Thornton, 1990, p.1, tradução nossa).

A linha teórica de escoamento da seção da chapa de base, região listrada na Figura 7, é dada por:

$$\lambda n' = \lambda \frac{\sqrt{d b_f}}{4} \quad (2.22)$$

Onde:

n' é a linha teórica de escoamento da chapa base;

λ é o fator que relaciona o carregamento (P_u) à área db_f , dado pela equação 2.23.

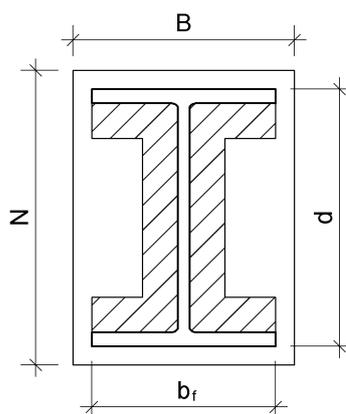
$$\lambda = \frac{2\sqrt{X}}{1 + \sqrt{1 - X}} \leq 1 \quad (2.23)$$

Onde:

X é dado pela Equação 2.28

$$X = \left\{ \frac{4 d b_f}{(d + b_f)^2} \right\} \frac{P_u}{\phi P_p} \quad (2.24)$$

Figura 7 – Teoria da linha de escoamento.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Definido $\lambda n'$, Fisher e Kloiber abordam ainda que a espessura das chapas de base solicitadas axialmente a compressão devem ser adotadas tomando o maior valor de espessura calculada pelas equações 2.20, 2.21 e 2.25.

$$t_p = 1,5 \lambda n' \sqrt{\frac{f_p}{F_y}} \quad (2.25)$$

2.1.2 Dimensionamento para força axial de tração

O método de dimensionamento de ligações para forças axiais de tração consiste na determinação da espessura mínima de chapa necessária para resistir à flexão gerada pela reação dos chumbadores na chapa de base, conforme ilustrado na Figura 8.

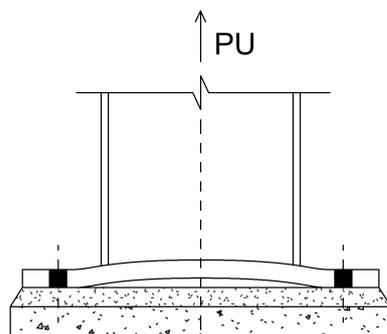
Além do mais, para solicitações axiais de tração sem a presença de momentos fletores na base, de modo geral, as dimensões de largura e comprimento da chapa são tomadas a partir das distâncias mínimas construtivas dos chumbadores, logo, o número e o diâmetro dos chumbadores necessários para resistir as solicitações influenciam diretamente nas dimensões da chapa de base.

2.1.2.1 Flexão da chapa de base

Assim como nas solicitações de compressão, para tração, os momentos gerados na chapa de base estão estritamente ligados à definição da sua espessura. Para a definição do momento na chapa de base deve-se observar a disposição dos chumbadores com relação ao perfil, pois os métodos de dimensionamento divergem com relação ao seu posicionamento.

Apresentado por Fisher e Kloiber (AISC, 2006), o cálculo do momento solicitante na chapa de base para chumbadores localizados entre as mesas do perfil (M_{pi}) é dado

Figura 8 – Flexão causada na chapa



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

pela equação:

$$M_{pi} = T_r \left(\frac{a_2 - t_w}{2} \right) \quad (2.26)$$

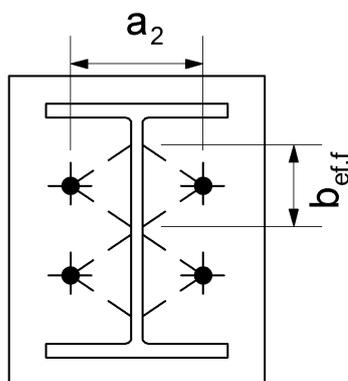
Onde:

T_r é a força de tração solicitante por chumbador;

a_2 é a distância entre chumbadores, conforme abordado na Figura 9;

t_w é a espessura da alma do perfil.

Figura 9 – Posição dos chumbadores para cálculo do momento na chapa.



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Para as ligações de bases com os chumbadores localizados do lado externo do perfil, o momento gerado na chapa pela tração dos chumbadores é dado pela seguinte equação:

$$M_{pe} = T_u x \quad (2.27)$$

Onde:

T_u é a força de tração na linha dos chumbadores;

x é a distância do eixo dos chumbadores ao eixo da mesa do perfil;

A distância do eixo da mesa do perfil ao eixo dos chumbadores (x) é dada pela Equação 2.28, e também ilustrada pela Figura 10 :

$$x = f - \frac{d}{2} + \frac{t_f}{2} \quad (2.28)$$

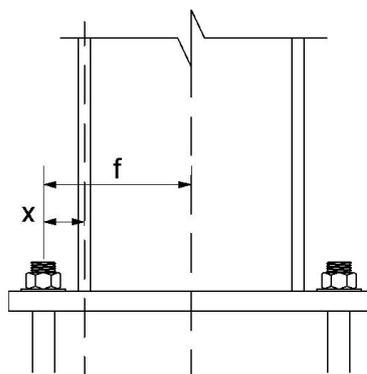
Onde:

f é a distância do eixo do perfil até o eixo dos chumbadores;

d é a altura do perfil;

t_f é a espessura da mesa do perfil.

Figura 10 – Distância x .



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

2.1.2.2 Espessura da chapa de base

Assim como o cálculo dos momentos, a espessura da chapa base é determinada considerando a disposição dos chumbadores na chapa.

Para chumbadores localizados no interior das mesas do perfil, a espessura definida por Fisher e Kloiber (AISC, 2006) para o limite plástico da seção é dada pela equação que segue:

$$t_{min} = 2,11 \sqrt{\frac{M_{pi}}{b_{eff} F_y}} \quad (2.29)$$

Onde:

M_{pi} é o momento na chapa causado pelos chumbadores;

ϕ é o fator de redução do método dos estados limites igual a 0,90;

F_y é a tensão de escoamento do material da chapa base;

b_{eff} é o comprimento efetivo resistente à flexão.

O comprimento efetivo resistente à flexão na chapa de base gerada pela tração dos chumbadores é dado por Fisher e Kloiber (AISC, 2006) como o comprimento de linha que intercepta na face da alma do perfil a projeção da distribuição de carregamento à 45° do eixo dos chumbadores, melhor ilustrado na Figura 9, e definido pela seguinte equação:

$$b_{eff,f} = 2 \left(\frac{a_2}{2} - \frac{t_w}{2} \right) \quad (2.30)$$

Onde:

a_2 é a distância entre os chumbadores;

t_w é a espessura da alma do perfil.

Já para as situações em que os chumbadores estão localizados do lado externo do perfil, a espessura da chapa é definida por:

$$t_{min} = 2,11 \sqrt{\frac{M_{pe}}{B F_y}} \quad (2.31)$$

Onde:

M_{pe} é o momento na chapa causado pelos chumbadores;

B é a largura de chapa base

F_y é a tensão de escoamento do material da chapa

2.1.3 Dimensionamento para pequenos momentos

Apesar da primeira versão do *"Steel Design Guide 1"* (AISC, 1990) abordar ligações de chapas de base de pilares submetidos a flexo-compressão, para Fisher e Kloiber (AISC, 2006) apenas em 1999 Drake e Elkin introduziram uma metodologia de dimensionamento de ligações com base no equilíbrio estático que fosse consistente com os estados limites.

Drake e Elkin (1999) propuseram que uma distribuição uniforme da tensão resultante de compressão do concreto fosse mais apropriada para o método dos estado limites, pois assumir uma distribuição triangular da tensão de compressão resultante implicaria em uma falta de capacidade adicional da chapa de base após a fibra mais extrema atingir o limite da capacidade do concreto.

Na segunda edição do *"Steel Design Guide 1"* (AISC, 2006), Fisher e Kloiber abordaram ambos os métodos de distribuição da tensão de compressão resultante,

distribuição uniforme e triangular para o dimensionamento de ligações de base submetidas as forças axiais de compressão com momentos fletores. Serão abordados no presente trabalho apenas os métodos de dimensionamento de ligações com tensões de compressão resultante uniformes, ilustradas na Figura 11, que são consistentes com os métodos de dimensionamento de chapas de base adotados pela NBR 16239 (ABNT, 2013) e pelo projeto da NBR 8800 (ABNT) em revisão.

Via de regra, a metodologia para determinação da espessura da chapa de base submetida a solicitações axiais de pequenas excentricidades deve ser aplicada quando a excentricidade da força axial (e) for menor que a excentricidade crítica da ligação (e_{crit}), para esses casos as forças axiais são resistidas pela distribuição uniforme de tensões entre a chapa de base e a base de concreto, os chumbadores não são solicitados à tração, uma vez que o equilíbrio do sistema se mantém apenas com a reação do concreto.

2.1.3.1 Excentricidade da carga

Para os casos em que a excentricidade da carga (e) possuir valor menor ou igual ao seu valor crítico (e_{crit}) considera-se que estrutura está sob solicitações de pequenos momentos, já para as situações em que a excentricidade (e) for maior que seu valor crítico (e_{crit}), a carga (q) terá seu valor máximo atingindo ($q = q_{max}$), e os chumbadores serão necessários para que o equilíbrio da estrutura seja atingido, tal combinação é definida como grandes momentos.

A excentricidade da força solicitante é dada por:

$$e = \frac{M_u}{P_u} \quad (2.32)$$

Onde:

P_u é a força axial solicitante na base do pilar;

M_u é o momento solicitante na base do pilar.

O valor crítico da excentricidade (e_{crit}) para que não haja tendencia de tombamento da estrutura é dado por:

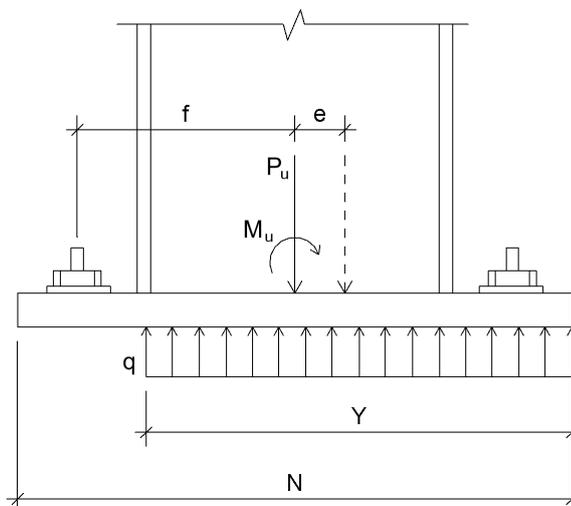
$$e_{crit} = \frac{N}{2} - \frac{P_u}{2 q_{max}} \quad (2.33)$$

Onde:

N é o comprimento da chapa de base;

q_{max} é a carga linear resistente do concreto por unidade de comprimento.

Figura 11 – Chapa base submetida a força de excentricidade pequena



Fonte: Adaptado de Fisher e Kloiber (AISC, 2006)

2.1.3.2 Carga linear

A carga linear por unidade de comprimento de chapa base (q) proveniente da tensão de compressão resultante entre a chapa e a base de concreto é dada por:

$$q = f_p B \quad (2.34)$$

Onde:

f_{pu} é a tensão de compressão solicitante do concreto, dada pela Equação 2.5;

B é a largura da chapa base.

A carga linear máxima por unidade de medida de chapa (q_{max}) definida a partir da tensão máxima da base de concreto é dada por:

$$q_{max} = f_{p(max)} B \quad (2.35)$$

Onde:

$f_{p(max)}$ é a tensão resistente de compressão do concreto dada na equação ??

2.1.3.3 Comprimento da carga linear

Para valores de excentricidade (e) menores que a excentricidade crítica (e_{crit}), o comprimento da carga (Y) será maior que o seu valor mínimo, e a carga (q) será menor que seu valor máximo (q_{max}), logo as tensões de contato entre o concreto e a chapa

são suficientes para resistir as solicitações.

Assumindo que a tensão de contato é uniformemente distribuída sob a chapa, conforme Figura 11, tem-se que o comprimento da carga (Y), para os caso em que a excentricidade (e) é menor que seu valor crítico (e_{crit}), é dado por:

$$Y = N - 2e \quad (2.36)$$

Onde:

N é o comprimento da chapa de base;

e é a excentricidade da força axial.

Para os casos em que a excentricidade for igual a excentricidade crítica ($e = e_{crit}$), o valor do comprimento da carga é dado por:

$$Y = \frac{P_u}{q_{max}} \quad (2.37)$$

2.1.3.4 Tensão de compressão solicitante

Por fim, a tensão de compressão resultante do contanto entre a chapa de base e a base de concreto, responsável por gerar flexão nas chapas de base é dada por:

$$f_p = \frac{P_u}{B Y} \quad (2.38)$$

2.1.3.5 Espessura da chapa de base

Para as ligações de base de pilares inerentes ao método definido como momentos pequenos, Fischer e Kloiber (AISC, 2006) apresentam as seguintes equações para a determinação da espessura da chapa de base a partir do limite plástico do material:

Para $Y \geq m$, onde m é dado pela Equação 2.8, tem-se que:

$$t_{min} = 1,5m \sqrt{\frac{f_p}{F_y}} \quad (2.39)$$

Para $Y < m$:

$$t_{min} = 2,11 \sqrt{\frac{f_p Y \left(m - \frac{Y}{2}\right)}{F_y}} \quad (2.40)$$

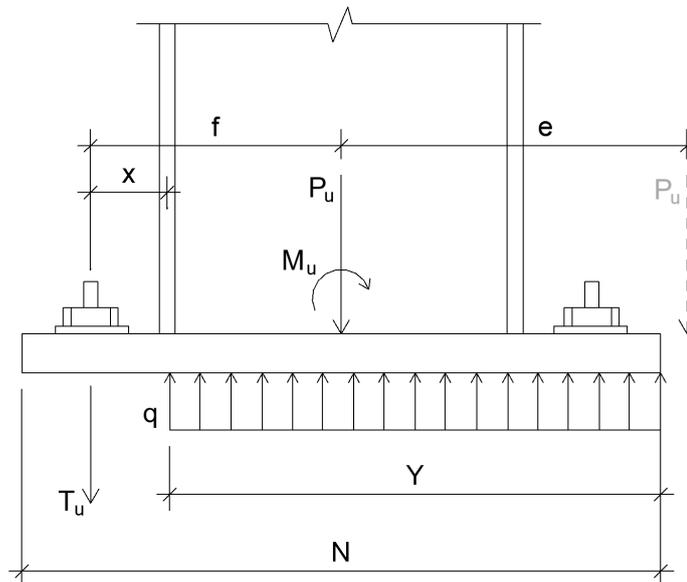
O método descrito por Fisher e Kloiber (AISC, 2006) ainda indica que para condições em que n for maior do que m a espessura da chapa será regida por n , então deve-se substituir m nas equações 2.39 e 2.40 por n .

2.1.4 Dimensionamento para grandes momentos

Para as combinações de solicitações em que a excentricidade (e) da força axial tiver seu valor maior que o valor crítico (e_{crit}), haverá a tendência de tombamento da ligação, e os chumbadores serão solicitados para que o equilíbrio da estrutura seja mantido. O método para dimensionamento denominado chapas de base com grandes momentos considera uma pressão uniforme distribuída sob a chapa, de valor igual a tensão de compressão resistente do concreto, a fim de tornar o sistema isostático permitindo a fácil determinação das suas incógnitas.

$$e > e_{crit} \quad (2.41)$$

Figura 12 – Chapa base com grandes momentos



Fonte: Adaptado de Fisher e Kloiber (AISC, 2006)

Para o equilíbrio das forças verticais, há a necessidade que as equações seguintes sejam satisfeitas:

$$\sum F_{vertical} = 0 \quad (2.42)$$

$$T_u = q_{max} Y - P_u \quad (2.43)$$

Onde:

P_u é a força axial solicitante da estrutura

T_u é a força axial dos chumbadores

Y é comprimento da carga de contato do concreto q

2.1.4.1 Comprimento da carga linear

A equação para determinar o comprimento da carga linear resultante da compressão entre a chapa e a base de concreto varia do que foi apresentado anteriormente para o método de pequenos momentos. O comprimento é obtido por meio de uma dedução detalhada apresentada por Fisher e Kloiber (AISC, 2006), a abordagem proposta pelos autores oferece uma análise aprofundada que resulta na equação apresentada a seguir:

$$Y = \left(f + \frac{N}{2}\right) \pm \sqrt{\left(f + \frac{N}{2}\right)^2 - \frac{2P_u(e + f)}{q_{max}}} \quad (2.44)$$

Onde:

f é a distância do chumbador ao eixo do perfil;

N é o comprimento da chapa base;

P_u é a força axial solicitante;

q_{max} é a carga máxima de contato entre a chapa e o concreto.

Deve-se observar que para a Equação 2.44 resulte em um valor real é importante que a Equação 2.45 seja satisfeita.

$$\left(f + \frac{N}{2}\right)^2 \geq \frac{2P_u(e + f)}{q_{max}} \quad (2.45)$$

2.1.4.2 Espessura da chapa de base

A determinação da espessura para o método de grandes momentos passa pela verificação da seção comprimida e da seção tracionada da chapa de base, a espessura a ser adotada deve ser a maior entre os dois valores.

Tratando-se da seção comprimida, a equação para determinar a espessura da chapa de base é similar ao método de pequenos momentos, com exceção da tensão, que para grandes momentos tem seu valor máximo ($f_p = f_{p(max)}$). Já para o lado tracionado a espessura da chapa é determinada com base no momento que a força de tração dos chumbadores produz na placa, e tem como base a Equação 2.27.

Para o lado comprimido da chapa de base, a espessura é dada por:

Para $Y \geq m$:

$$t_{min} = 1,5m \sqrt{\frac{f_{p(max)}}{F_y}} \quad (2.46)$$

Para $Y < m$:

$$t_{min} = 2,11 \sqrt{\frac{f_{p(max)} Y \left(m - \frac{Y}{2}\right)}{F_y}} \quad (2.47)$$

Para o lado tracionado da chapa de base, a espessura da chapa é definida por:

$$t_{min} = 2,11 \sqrt{\frac{T_u x}{B F_y}} \quad (2.48)$$

A espessura final deve ser o maior valor entre as duas espessuras.

2.2 DIMENSIONAMENTO DA ANCORAGEM

Responsáveis por manter a fixação da chapa de base com a estrutura de concreto nos casos em que há esforços de tração, flexão com grande excentricidade ou cortante, os chumbadores são fundamentais para o equilíbrio das ligações de bases de pilares, e assim como outros componentes das ligações, devem ser dimensionados de forma a resistir às solicitações.

2.2.1 Força resistente à tração das barras de ancoragem

Importante para os casos em que há força de tração nas ligações de base de pilares, a determinação da força resistente de tração dos chumbadores pode influenciar diretamente o dimensionamento das ligações, uma vez que, quando não atendidas as verificações de resistência, diâmetros maiores deverão ser utilizados nas ligações, resultando em maiores dimensões de chapas de base.

A força nominal de tração resistente de cálculo para os chumbadores (R_n) é dada no "Specification for Structural Steel Buildings" (AISC, 2016) por:

$$R_n = \phi 0,75 F_u A_b \quad (2.49)$$

Onde:

F_u é a tensão resistente do material do chumbador;

A_b é a área nominal do chumbador;

ϕ é o fator de redução LRFD = 0,75.

2.2.2 Resistência ao cisalhamento das barras de ancoragem

Apesar do "Steel Design Guide 1" apresentar diferentes soluções para o dimensionamento de ligações de bases de pilares para solicitações de forças horizontais, serão abordadas apenas as verificações para o cisalhamento dos chumbadores, por se tratar de uma configuração usual de ligações.

Ao realizar o dimensionamento das ligações para solicitações de forças horizontais, Fisher e Kloiber (AISC, 2006) recomendam que, conservadoramente, apenas dois chumbadores sejam considerados recebendo os esforços cortantes da estrutura, dado que a folga entre a furação da chapa de base e o diâmetro dos chumbadores poderia resultar em um leve deslocamento da placa.

Para que os chumbadores atendam os critérios de dimensionamentos para esforços cortantes é fundamental que a seguinte equação seja satisfeita:

$$f_v \leq F_{nv} \quad (2.50)$$

Onde:

f_v é a tensão solicitante de cisalhamento nos chumbadores;

F_{nv} é a tensão resistente de cisalhamento dos chumbadores.

A tensão solicitante de cisalhamento nos chumbadores é dada por:

$$f_v = \frac{V_u}{A_v} \quad (2.51)$$

Onde:

V_u é a força de cisalhamento na base;

A_v é a área dos chumbadores resistentes ao cisalhamento.

A tensão resistente de cisalhamento dos chumbadores definida na Tabela J3.2 da AISC 360-16 é dada por:

$$F_{nv} = \phi 0,45F_u \quad (2.52)$$

Onde:

F_u é a tensão resistente do material do chumbador.

Nota-se que a resistência de atrito foi desprezada para a determinação da tensão solicitante de cisalhamento dos chumbadores, porém para casos mais críticos, e em conformidade com a ACI 318-19 (ACI, 2019), ela pode ser considerada para redução da tensão nos chumbadores.

Cabe destacar que a equação da resistência ao cisalhamento para cortante na seção da rosca dos parafusos dada pela AISC 360-16 (AISC, 2016) foi incluída no projeto de norma da NBR 8800 da ABNT, no entanto, no mesmo projeto da norma brasileira uma metodologia diferente está sendo proposta as quais estabelecem diferentes resistências ao esforço cortante para cada conjunto de solicitações na base do pilar, englobando tração, compressão, com ou sem momentos.

2.2.3 Barras de ancoragem submetidas a tração e cisalhamento

Para os casos em que os chumbadores estão submetidos a tração e ao cisalhamento simultaneamente, o dimensionamento é dado a partir da verificação da tensão solicitante com a tensão resistente de tração, conforme equação:

$$f_t \leq \phi F'_{nt} \quad (2.53)$$

Onde:

f_t é a tensão de tração solicitante nos chumbadores;

$\phi F'_{nt}$ é a tensão resistente de tração modificada para incluir a tensão de cisalhamento.

Definida na seção J3 da AISC 360-16, a tensão resistente de tração para os casos em que os chumbadores estão sendo solicitados por forças axiais e cortante é dada por:

$$\phi F'_{nt} = \phi \left[1, 3F_{nt} - \frac{F_{nt}}{\phi F_{nv}} f_v \right] \leq \phi F_{nt} \quad (2.54)$$

Onde:

F_{nt} é a tensão nominal resistente de tração dos chumbadores;

F_{nv} é a tensão resistente de cisalhamento;

f_v é a tensão solicitante de cisalhamento.

A tensão nominal resistente de tração dos chumbadores, também definida na seção J3.2 da AISC 360-16, é dada por:

$$F_{nt} = \phi 0,75 F_u \quad (2.55)$$

Considerando que apenas dois chumbadores serão solicitados ao cisalhamento, conforme sugerido por Fisher e Kloiber (AISC, 2006), é recomendado que a tensão solicitante de cisalhamento seja majorada, sendo assim, a tensão solicitante de cisalhamento dos chumbadores é dada por:

$$f_v = \frac{1,25 V_u}{A_v} \quad (2.56)$$

2.2.4 Comprimento de ancoragem

Segundo NBR 8800 (ABNT, 2008), quando aplicável, a ancoragem dos chumbadores no bloco de concreto deve obedecer às prescrições da ABNT NBR 6118, que aborda a ancoragem das armaduras no concreto por meio de aderência, dispositivos mecânicos ou ambos combinados, de forma que todas as forças sejam integralmente transmitidas para o concreto.

2.2.4.1 Comprimento de ancoragem básico

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), o comprimento de ancoragem básico é definido como o comprimento reto de uma barra de armadura necessário para ancorar a força-limite $A_s f_{yd}$ nessa barra, admitindo-se, ao longo desse comprimento, resistência de aderência uniforme e igual a f_{bd} .

O comprimento de ancoragem básico é dado por:

$$l_b = \frac{\phi f_{yd}}{4 f_{bd}} \geq 25 \phi \quad (2.57)$$

Onde:

ϕ é o diâmetro da barra;

f_{yd} é a resistência ao escoamento do aço;

f_{bd} é a resistência de aderência de cálculo dada pela Equação 2.58.

2.2.4.2 Resistência de aderência

A resistência de aderência de cálculo é obtida pela seguinte equação:

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} \quad (2.58)$$

Onde:

η_1 é o coeficiente de rugosidade da barra, dado na tabela 1;

η_2 é o coeficiente que considera a posição da barra na peça;

η_3 é o coeficiente de diâmetro da barra;

f_{ctd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto dado pela Equação 2.59.

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (2.59)$$

Onde:

$f_{ctk,inf}$ é a resistência à tração direta característica;

γ_c é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

Tabela 1 – Coeficiente para cálculo da tensão de aderência (η_1)

Tipo de superfície	η_1
Lisa	1,0
Entalhada	1,4
Nervurada	2,25

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

2.2.4.3 Coeficiente para cálculo da tensão de aderência η_2

O coeficiente para cálculo da tensão de aderência apropria-se de dois valores que levam em conta duas situações de aderência, $\eta_2=1,0$ quando considerada boa, $\eta_2=0,7$ quando considerada má aderência. As considerações de aderência são definidas na seção 9.3.1 da ABNT NBR 6118:2014.

2.2.4.4 Coeficiente para cálculo da tensão de aderência η_3

O coeficiente η_3 leva em consideração o diâmetro da barra para definição do seu valor, $\eta_3=1,0$ para diâmetros de barras menores que 32mm, para diâmetros maiores η_3 é definido pela equação 2.60

$$\eta_3 = \frac{(132 - \phi)}{100} \quad (2.60)$$

2.2.4.5 Comprimento de ancoragem necessário

O comprimento de ancoragem necessário pode ser calculado por:

$$l_{b,nec} = \alpha l_b \frac{A_{b,calc}}{A_{b,ef}} \geq l_{b,min} \quad (2.61)$$

Onde:

α é 0,7 para o caso de chumbadores;

l_b é o comprimento de ancoragem calculado em 2.57;

$A_{b,calc}$ é a área de chumbador necessária;

$A_{b,ef}$ é a área de chumbador utilizada na ligação.

$l_{b,min}$ é o maior valor entre $0,3 l_b$, 10ϕ e 100 mm.

2.2.5 Disposições construtivas

As disposições construtivas das barras de ancoragem influenciam diretamente o tamanho das chapas de base e, conseqüentemente, a sua espessura. Tanto a NBR 16239 (ABNT, 2013) quanto a NBR 8800 (ABNT, em revisão) abordam as dimensões mínimas necessárias para o dimensionamento de ligações de bases de pilares, melhorando as condições de montagem das ligações. As dimensões abordadas no presente trabalho estão representadas na figura 18 do Anexo A, que ilustra a tabela retirada da NBR 16239 (ABNT, 2013).

2.3 VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO PERFIL

Para os casos em que há a atuação de forças axiais e momentos fletores simultaneamente nos perfis foram aplicados os limites definidos pelas expressões de interação de esforços da seção 5.5.1 da NBR 8800 (ABNT, 2008). As condições a serem atendidas estão resumidamente exemplificadas pelas equações que seguem:

Para os casos em que a força axial solicitante de cálculo seja igual ou superior à 20% da força axial resistente de cálculo, ou seja:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 \quad (2.62)$$

A seguinte expressão deve ser obedecida:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (2.63)$$

Para os casos em que a força axial solicitante seja menor que 20% da força axial resistente:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2 \quad (2.64)$$

$$\frac{N_{Sd}}{2 N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (2.65)$$

Onde:

N_{Sd} é a força axial solicitante de cálculo;

N_{Rd} é a força axial resistente de cálculo;

$M_{x,Sd}$ é o momento fletor solicitante de cálculo em relação ao eixo x;

$M_{y,Sd}$ é o momento fletor solicitante de cálculo em relação ao eixo y;

$M_{x,Rd}$ é o momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo x;

$M_{y,Rd}$ é o momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo y;

A implementação dos limites das forças axiais e momentos atuantes simultaneamente nos pilares visa oferecer uma condição de contorno ao projeto das bases dos pilares implementadas nesse trabalho, uma vez que não seria factível um projeto de base de pilar para um conjunto de esforços cujo próprio pilar não suporte. Além disso, é importante mencionar que esses limites de resistência implementados estão associados aos limites de plastificação total da seção do pilar, portanto, é muito provável que a real resistência da barra (que não é de interesse direto deste trabalho) seja menor do que o limite de resistência em questão. Nesse caso, os valores apresentados pelo programa servem apenas como referência para auxiliar a definição dos parâmetros iniciais de projeto da ligação de base.

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com o objetivo de analisar o comportamento das ligações de base de pilares de aço para diferentes combinações de solicitações, dentro dos limites das forças axiais e momentos fletores abordados na Seção 2.3, serão apresentados e analisados no presente capítulo os resultados obtidos do dimensionamentos de diferentes tipos de ligações e seções de pilares utilizando o software desenvolvido neste trabalho como ferramenta para extração das principais dimensões dos elementos que compõem as ligações de base de pilares.

Na tentativa de compreender o desempenho das ligações, inicialmente foi realizada a análise dos valores das espessuras das chapas de base para ligações de quatro diferentes seções de pilares, conforme abordado na Figura 13. Nesse contexto, os valores das variáveis que exercem influência direta sobre o comportamento das ligações, como a resistência característica da base de concreto (f'_c), a resistência ao escoamento do material da chapa de base (F_y), a proporção entre as áreas da chapa e da base de concreto (A_2/A_1), entre outras variáveis, foram mantidos fixos para que não houvesse interferência desses valores nos resultados das espessuras das chapas. Posteriormente, as principais variáveis ligadas aos métodos de dimensionamento das ligações de base de pilares vieram a sofrer variações para que observações mais minuciosas pudessem ser realizadas, o que pode ser observado nas Figuras 14, 15 e 16, onde estão apresentadas os comportamentos das variações das espessuras das chapas de base para ligações, de uma mesma seção de pilar, dimensionadas com diferentes solicitações de forças axiais e momentos fletores, diante da modificação de variáveis especificadas em cada uma das figuras.

Os gráficos da Figura 13 ilustram as variações dos valores das espessuras das chapas de base para ligações de base de pilares de seção W200x35,9(H), W310x38,7, W410x60,0 e W530x74,0, pela variação das solicitações de forças axiais de compressão e momentos fletores sob as condições de contorno impostas pelos limites de resistência conforme já abordado anteriormente na Seção 2.3, o que pode ser observado nos eixos que apresentam as proporções de forças axiais e momentos fletores solicitantes e resistentes, (N_{Sd}/N_{Rd}) e (M_{Sd}/M_{Rd}) , respectivamente. As espessuras apresentadas nos gráficos representam os valores obtidos no dimensionamento das ligações realizadas no software desenvolvido neste trabalho, que tem como premissa a adoção de menores áreas de chapas, quando possível, para as base dos pilares. Conforme abordado antes, as variáveis de dimensionamento fixadas para que não influenciassem os resultados das espessuras das ligações foram: resistência característica da base de concreto (f'_c) igual a 20 MPa; resistência ao escoamento do aço da chapa de base (F_y) de 250 MPa;

resistência ao escoamento do aço do perfil do pilar de 345 MPa; resistência à ruptura do material das barras de ancoragem (f_u) de 400 MPa; e proporção da área da base de concreto para a área de chapa (A_2/A_1) igual a 2.

Para melhor interpretação, as linhas que representam as espessuras das chapas de base foram segmentadas em duas partes, segmento 1 e seguimento 2, os quais abrangem conjuntos de resultados para diferentes estados limites de dimensionamento. Essa distinção será apresentada a seguir:

- Segmento 1

Estão dentro das delimitações de dimensionamento de ligações para pequenos momentos, por outras palavras, a excentricidade da ligação tem seu valor menor ou igual a excentricidade crítica ($e \leq e_{crit}$).

As dimensões de largura e comprimento das chapas de base estão relacionadas à tensão de compressão solicitante da base de concreto (f_p) que tem como valor limite a tensão de compressão resistente da base de concreto ($f_{p(max)}$), ou seja, ($f_p \leq f_{p(max)}$), além disso, as dimensões mínimas da chapa de base estão restritas às dimensões mínimas construtivas impostas pelas dimensões dos chumbadores, conforme Figura 18 do Anexo A, o que pode resultar em tensões solicitantes de compressão substancialmente menores do que as resistentes, ocasionando áreas de chapa de base maiores do que as necessárias para que a condição de tensão solicitante menor do que resistente, ($f_p \leq f_{p(max)}$), seja atendida. As espessuras das chapas, por sua vez, estão diretamente ligadas à tensão de compressão solicitante (f_p) obtida da relação entre a força axial e a área de contato entre a chapa de base e a base de concreto, o que pode ser facilmente observado na Equação 2.39.

Observa-se que ao longo do primeiro segmento, há dois tipos de comportamento das espessuras das chapas de base à medida em que aumenta a participação do momento fletor no conjunto de solicitações. Pode ser observado que as espessuras das chapas tiveram uma variação moderada, ou nula, neste primeiro segmento, o motivo para esse resultado está relacionado ao fato da tensão de compressão solicitante (f_p) apresentar pequenas mudanças, e por estar diretamente ligada à definição das espessuras das chapas, no contexto da atuação de pequenos momentos, conforme Equação 2.39, resulta em baixas variações de espessuras. Para os casos em que não há uma variação perceptível das espessuras das chapa de base, mais evidentes nos perfis W410x60,0 e W530x74,0, entre os valores de relação $M_{sd} / M_{Rd} = 0$ a 0,34 e 0 a 0,16, respectivamente, ocorre que as tensões de compressão solicitantes (f_p) resultam em valores maiores que as tensões de compressão resistentes ($f_{p(max)}$) para as dimensões mínimas

construtivas das chapas de base impostas pelos chumbadores, o que não é observado para as ligações dos perfis W200x35,9(H) e W310x38,7, levando o método implementado no software a buscar maiores áreas de chapas de base, com a finalidade de que a tensão de compressão solicitante (f_p) não exceda o valor da resistente ($f_{p(max)}$). É importante ser abordado que ao buscar áreas maiores para as chapas de base, o método implementado busca aumentar a dimensão que resulta em um menor comprimento de "balanço" (m e n) da chapa de base, o que explica o fato de não haver variações de espessuras das chapas para os casos indicados, uma vez que a dimensão crítica do "balanço" da chapa de base e a tensão solicitante não apresentam variações, o que pode ser observado na Equação 2.39.

- Segmento 2

Delimitam-se pelo dimensionamento de ligações para grandes momentos, ou seja, as excentricidades das ligações têm seus valores maiores do que os valores críticos ($e > e_{crit}$), e além disso, as tensões de compressão solicitantes têm seu valor igual ao valor limite ($f_p = f_{p(max)}$).

Para o segmento 2 percebe-se a existência de três padrões nas variações dos resultados obtidos para as espessuras das chapas de base para diferentes solicitações das ligações: trechos onde não há variações das espessuras das chapas de base com o aumento da participação do momento fletor no conjunto de solicitações, trechos onde há grandes transições nas espessuras das chapas, e também trechos onde percebe-se uma leve redução nos valores das espessuras com a variação das solicitações.

As regiões onde não se tem variações das espessuras estão relacionadas ao fato das equações para a sua determinação estarem sob influência da tensão máxima de resistências do concreto ($f_{p(max)}$), que não depende das solicitações para sua determinação, ou seja, não há variação dos parâmetros que determinam as espessuras das chapas, conforme pode ser verificado na Equação 2.46.

Os trechos nos quais há o acréscimo dos valores das espessuras das chapas de base estão correlacionados aos limites de resistência das barras de ancoragem, que quando atingidos requerem diâmetros maiores para a estabilidade das ligações, o que, por questões construtivas, resultam em chapas de maiores dimensões, conforme Figura 18 do Anexo A, e conseqüentemente mais espessas. Ao se aumentar a participação dos momentos fletores no conjunto de solicitações atuantes nas ligações se tem um acréscimo na força de tração solicitante nas barras de ancoragem (T_u), que para os casos analisados, demonstraram ser os valores limitantes para o dimensionamento das ligações para o método

dos grandes momentos, uma vez que atingida a força resistente de tração dos chumbadores surge a necessidade do aumento do diâmetro das barras buscando maiores resistências. Porém levando em consideração que as forças de tração solicitantes das barras de ancoragem estão associadas à sua distância ao eixo do perfil, torna-se atrativo aumentar este afastamento com a finalidade de reduzir as tensões solicitantes, o que também resulta em chapas de base maiores e mais espessas, mas com menores diâmetros de ancoragem. Sendo assim ao se atingir o limite de resistência das ancoragens, o método implementado no software trabalha com o aumento das dimensões das chapas de base, buscando menores tensões de tração nos chumbadores, porém dentro do limite de largura e comprimento mínimo de chapa de base que diâmetros maiores de chumbadores necessitariam, ou seja, as chapas de base têm suas dimensões ampliadas até os valores mínimos que diâmetros maiores de chumbadores necessitam, a partir desse ponto troca-se o diâmetro das barras de ancoragem buscando maiores resistências à tração e uma economia de chapa de base. Tal acontecimento pode ser evidenciado na Figura 13, onde no segmento 2, observa-se variações positivas lineares nas espessuras das chapas de base intercaladas com trechos de espessuras constantes, mesmo com o acréscimo da participação do momento fletor no conjunto de solicitações.

Os intervalos nos quais ocorre a redução das espessuras das chapas, perceptíveis nos trechos finais das linhas que representam as espessuras das chapas de base na Figura 13, são caracterizados pelo fato do comprimento da carga resultante de contato entre a chapa de base e a base de concreto ser menor do que a maior dimensão de flexão da chapa de base, ou seja $Y < m$. Portanto, o comportamento desses intervalos está sob influência da Equação 2.47. Uma vez que o valor de Y tende a diminuir com a redução da força axial e aumento do momento no conjunto de solicitações, o que pode ser observado na Equação 2.44, ocorre uma redução nas espessuras das chapas de base.

Das conclusões que podem ser extraídas da Figura 13, destaca-se o comportamento da excentricidade crítica diante da variação da seção transversal dos pilares, mais especificamente a redução do valor crítico da excentricidade (e_{crit}) com o aumento da capacidade de carga dos perfis. Observa-se que ao empregar pilares com maiores capacidades, ocorre uma redução do valor máximo que a excentricidade crítica pode alcançar, resultando em uma alteração antecipada dos limites que regem o dimensionamento da espessura necessária para a chapa de base. Esse padrão pode ser observado ao se analisar a Equação 2.33, e está diretamente relacionado à variação das dimensões dos perfis e, conseqüentemente, das variações das dimensões das chapas de base, que não são proporcionais à variação da força resistente de compressão

do perfil, resultando em excentricidades críticas menores.

No que se refere ao comportamento das dimensões das chapas de base com as variações das seções dos perfis dos pilares, é relevante destacar que as dimensões das chapas dependem igualmente das dimensões dos perfis e do diâmetro dos chumbadores adotados nas ligações, uma vez que os comprimentos dos "balanços" (m e n) são definidos a partir de uma proporção da altura e largura da seção do perfil do pilar, juntamente com as dimensões mínimas construtivas dos chumbadores, conforme abordado na Figura 6 e na Figura 18 do Anexo A. Portanto, ao se adotar seções de pilares maiores, estaremos aumentando as dimensões críticas das chapas de base, diretamente ligadas à definição da sua espessura, tal comportamento pode ser observado na diferença de espessuras do segmento 1 nos perfis W410x60,0 e W530x74,0 da Figura 13.

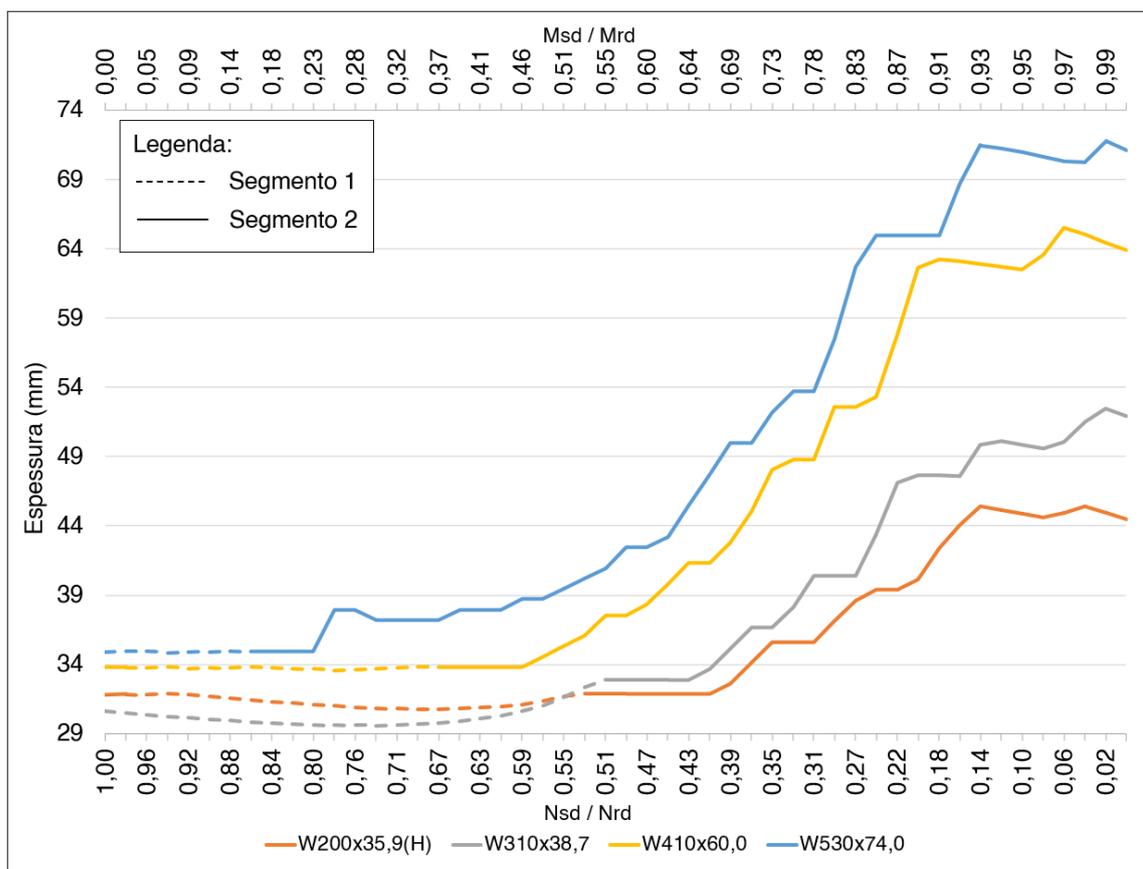
O gráfico da Figura 13 permite, ainda, analisar o padrão de variação da dispersão dos resultados das espessuras para diferentes seções de pilares, especialmente quando se considera o método de dimensionamento para grandes momentos. Em outras palavras, é visível como seções de pilares com maiores dimensões tendem a apresentar espessuras de chapas superiores, e como essa divergência se amplifica à medida que os valores dos momentos fletores do conjunto de solicitações aumentam.

Esse fato está intimamente ligado ao fato de que apesar de apresentarem forças axiais e momentos fletores solicitantes e resistentes de mesmas proporções, perfis maiores têm seus valores com magnitudes mais expressivas. Tal fato resulta em maiores forças de tração nos chumbadores, levando a maiores diâmetros, o que, por consequência, gera chapas de bases de maiores dimensões de "balanço", logo mais espessas. Tais observações destacam a complexidade e a influência de diversos fatores no dimensionamento das espessuras das chapas de base e na seleção dos chumbadores adequados para diferentes seções de pilares.

Ao alterar determinadas variáveis que desempenham um papel essencial no processo de dimensionamento das conexões de base de pilares, procedeu-se a uma análise mais aprofundada do comportamento dessas ligações. Nesse contexto, as Figuras 14, 15 e 16 evidenciam observações acerca da influência exercida pela tensão de compressão resistente de cálculo ($f_{p(max)}$) nas espessuras das chapas de base. Essa influência é decorrente da relação direta entre as variáveis estudadas e a tensão de compressão resistente. Os gráficos retratam os resultados que contrariam intuições convencionais no âmbito do dimensionamento.

A Figura 14 aborda a influência da variação da resistência característica à compressão do concreto (f'_c) sobre as espessuras das chapas de base para uma seção de pilar W310x38,7. Os segmentos 1 e 2, assim como na Figura 13, representam as ligações dentro dos limites que regem o dimensionamento para pequenos e grandes

Figura 13 – Variação da espessura para diferentes seções



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

momentos, respectivamente. Nota-se que no segmento 1 da Figura, as espessuras das chapas de base obtidas nas variações das solicitações resultaram nos mesmos valores para diferentes resistências características à compressão do concreto (f'_c), tal comportamento deve-se ao fato das áreas mínimas construtivas governadas pelos diâmetros dos chumbadores, conforme já abordado, terem resultado em áreas de chapas de mesmas medidas para as diferentes ligações de base, ocasionando tensões solicitantes (f_p) iguais e também inferiores as tensões resistentes ($f_{p(max)}$), permitindo ligações com mesmas dimensões, logo, mesmas espessuras.

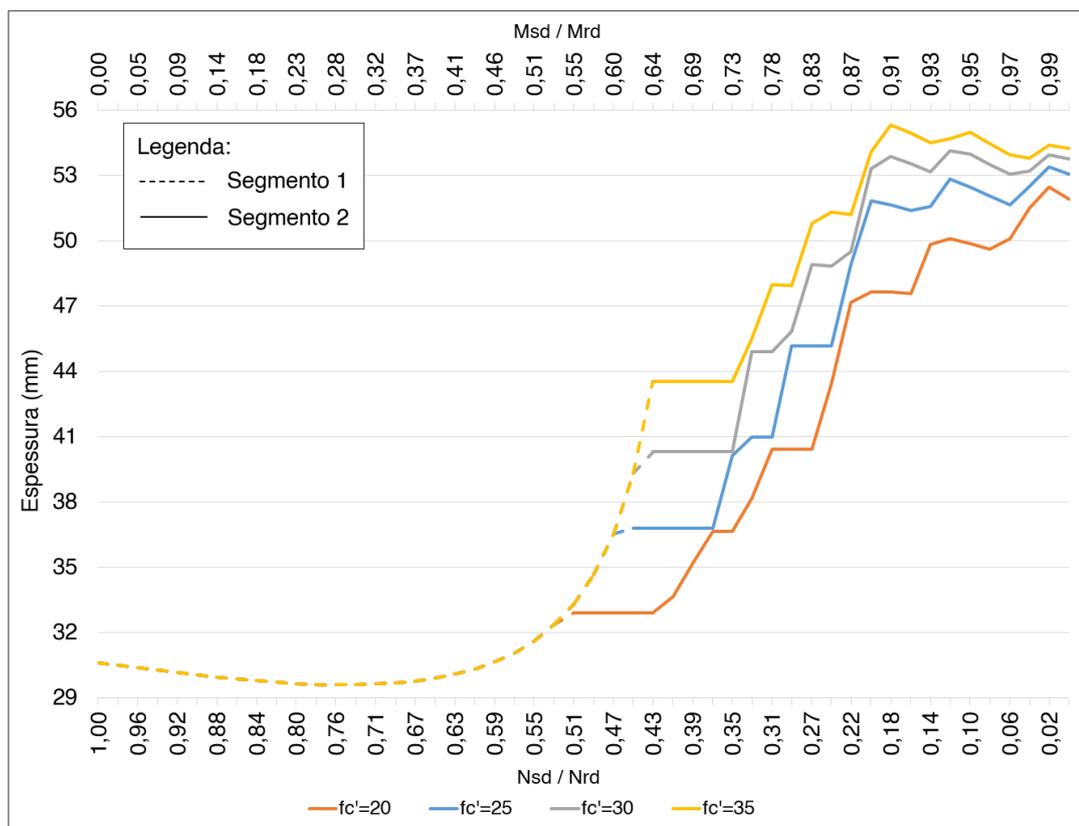
Das observações que também podem ser extraídas deste primeiro segmento, está o atraso na transição entre os limites que condicionam o dimensionamento das espessuras mínimas das chapas de base, o que resulta em chapas de maiores espessuras para mesmas combinações de solicitações, como pode ser visualizado no final do segmento 1 de cada uma das curvas do gráfico da Figura 14. Tal postergação está relacionada à duas variáveis essenciais: a tensão de compressão resistente da base de concreto ($f_{p(max)}$) e a excentricidade crítica (e_{crit}). Ao ter valores de resistências maiores, a base de concreto permite ligações com tensões solicitantes (f_p) também maiores, por isso percebe-se, na Figura 14, que as espessuras das ligações com resistências

características das bases de concreto maiores, atingiram valores superiores, já que no contexto das ligações dimensionadas pelo método de pequenos momentos, a tensão solicitante (f_p) está diretamente vinculada às espessuras das chapas, o que pode ser observado na Equação 2.39. Quanto a relação da excentricidade crítica (e_{crit}) e as espessuras das chapas de base, pode-se dizer que ao resultar em valores superiores por razão do acréscimo de resistência da base de concreto, como pode ser observado nas Equações 2.33 e 2.35, permite que as solicitações trabalhem dentro de limites maiores de excentricidade (e), o que acaba, por consequência, resultando em valores de tensão solicitantes (f_p) superiores, logo maiores espessuras são esperadas dessas ligações.

No segundo segmento, constata-se que as bases de concreto com resistências características à compressão (f'_c) mais elevadas resultaram em valores de espessuras de chapas de base superiores. Essa relação é atribuída ao fato da tensão resistente à compressão da base de concreto ($f_{p(max)}$) estar condicionada aos valores da resistência característica à compressão (f'_c), o que pode ser constatado na Equação 2.4. Logo, ao resultar em valores superiores, a tensão de compressão resistente da base de concreto ($f_{p(max)}$) acaba por originar chapas de base mais espessas, uma vez que o dimensionamento das espessuras mínimas das chapas de base para as ligações representadas pelo segmento 2 do gráficos da Figura 14, estão sob controle do método dimensionamento para grandes momentos.

A Figura 15 amplia a análise dos resultados abordando como as alterações nas áreas das bases de concreto influenciam as variações das espessuras das chapas de base para uma seção de pilar W310x38,7. É notável observar que a tensão de compressão solicitante (f_p) deve permanecer abaixo do limite estabelecido pela tensão resistente ($f_{p(max)}$). Por essa razão, se observa que para as proporções de áreas menores, ($A_2/A_1 = 1$ e 1,25), o método resultou em espessuras de chapas mais finas e constantes com a variação das solicitações. Tal comportamento, já abordado na análise do segmento 1 da Figura 13, deve-se ao fato das tensões solicitantes (f_p) para as dimensões iniciais de chapas de base resultarem em valores maiores do que as tensões resistentes ($f_{p(max)}$), uma vez que a redução na proporção das áreas das bases (A_2/A_1), abordadas no gráfico, estar diretamente ligada a redução da tensão resistente de compressão da base de concreto ($f_{p(max)}$), o que pode ser observado na Equação 2.4. Logo, ao ter seus valores inferiores, as tensões resistentes ($f_{p(max)}$) resultam abaixo dos valores das tensões solicitantes, o que leva o método empregado no software buscar maiores valores de áreas de chapa de base visando a redução da tensão (f_p). Consequentemente com tensões solicitantes menores, as espessuras das chapas de base acabam por resultar em valores inferiores, como observado na Equação 2.39. Contudo, apesar das menores proporções de áreas (A_2/A_1) apresentarem espessuras de chapas mais finas, as áreas das chapas de base resultam em maiores valores, logo

Figura 14 – Variação das espessuras das ligações do W310x38,7 com a variação da resistência característica do concreto à compressão do concreto.



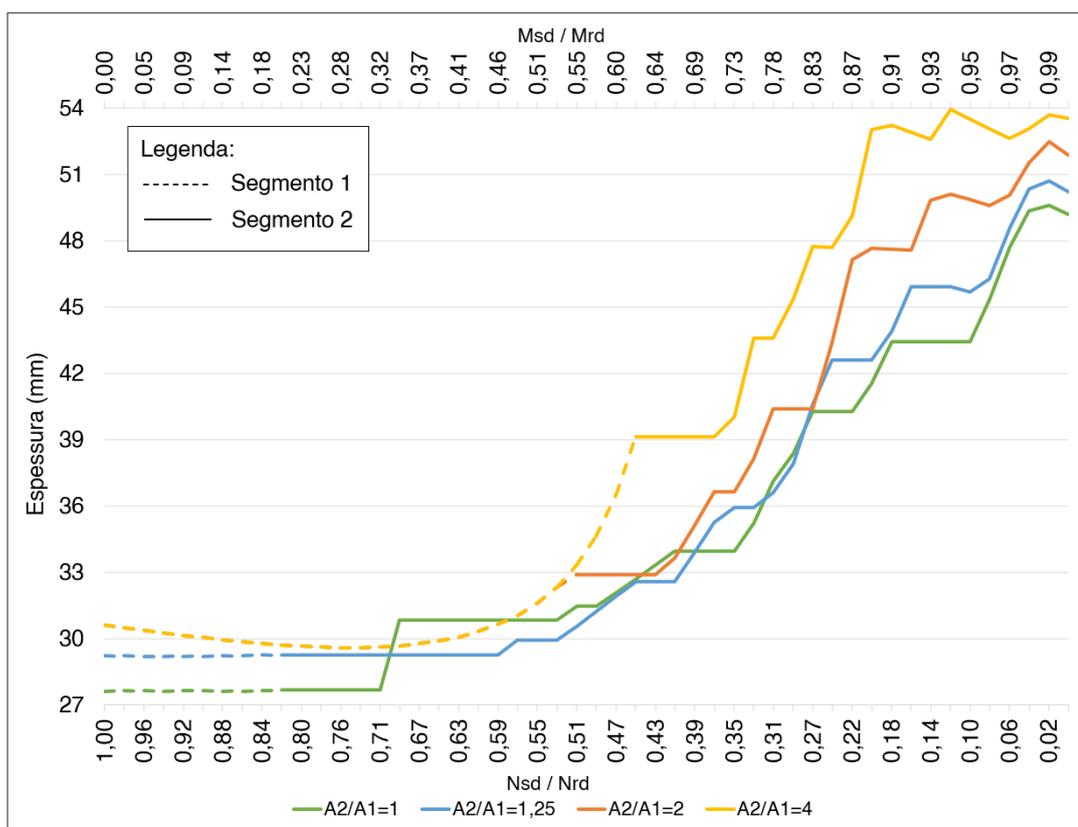
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

tais proporções não resultariam necessariamente em uma economia de volume de chapa. Vale destacar novamente que ao ampliar as dimensões das chapas de base buscando maiores áreas, a metodologia de dimensionamento das ligações de base de pilares empregada no software busca aumentar a menor dimensão de "balanço" da chapa de base, uma vez que não resultaria na variação das espessuras, o que pode ser observado ao se analisar a Equação 2.39.

Além disso, a Figura 15 ainda ressalta o que foi discutido previamente, o aumento da tensão de compressão resistente na base de concreto resulta no aumento das espessuras das chapas de base, principalmente quando dimensionadas no contexto da atuação de grandes momentos ($e > e_{crit}$).

A Figura 16 também exemplifica a variação das espessuras das chapas de base para uma seção de pilar W310x38,7 tendo como referência a variação das proporções das áreas da base de concreto. Entretanto, nesta ocasião, as dimensões das áreas das chapas foram mantidas constantes, ou seja, foram adotadas dimensões de bases compatíveis com as maiores dimensões necessárias para cada conjunto de esforços estudados, com o propósito de evitar interferências nos resultados que possíveis variações das áreas das chapas de base pudessem gerar. Assim, através dessa abordagem

Figura 15 – Variação da espessura pela proporção da áreas para seção W310x38,7



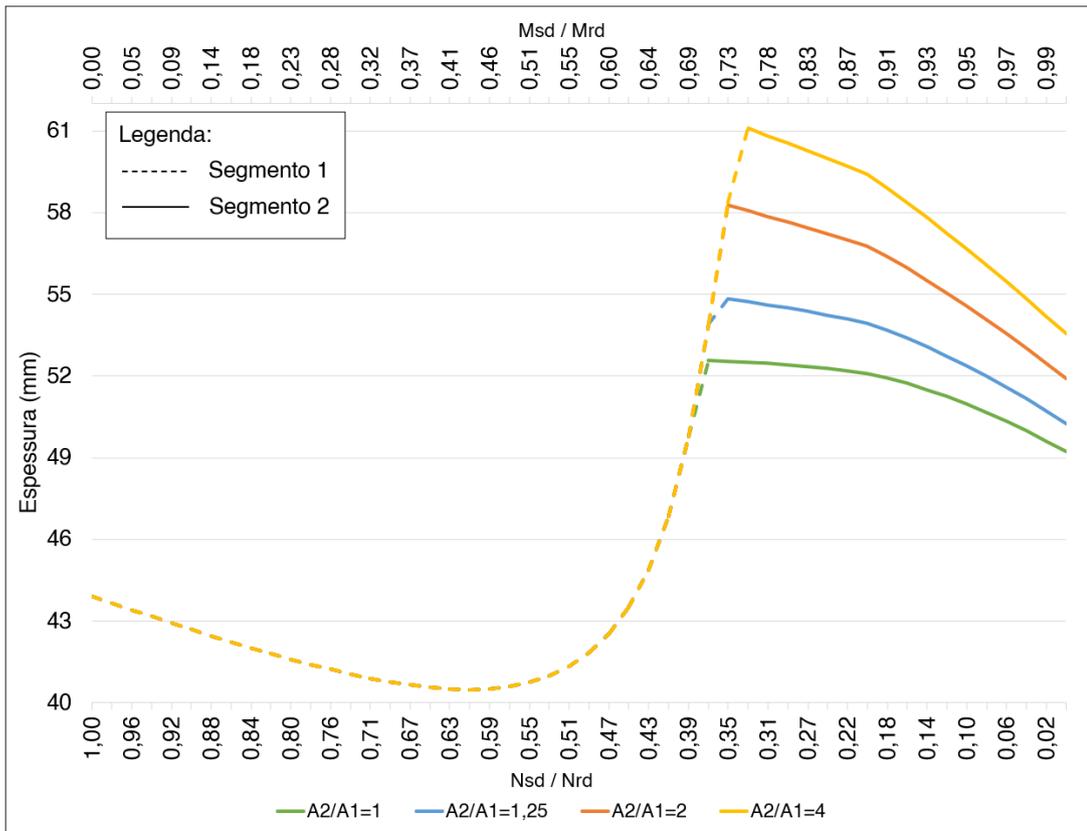
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

torna-se possível observar que as espessuras das chapas estão mais suscetíveis a variações nas proporções das área das bases de concreto (A_2/A_1), particularmente em ligações que são dimensionadas pelo método de grandes momentos.

Com o objetivo de investigar possibilidades de tornar as ligações de bases de pilares mais econômicas, quando viável, a Figura 17 exemplifica que em certos cenários, a variação na quantidade de chumbadores pode conduzir a chapas de base menos espessas. Observa-se que nos casos analisados, os chumbadores desempenharam um papel preponderante no dimensionamento das espessuras das chapas. Deste modo, pode-se concluir que, em certas situações, a adoção de chumbadores de menores diâmetros pode resultar em espessuras de chapas menores, já que, conforme visto anteriormente, os diâmetros dos chumbadores são os responsáveis pelos comprimentos mínimos dos "balanços" das chapas de base (dimensões m e n conforme Figura 6), logo, aumentar os diâmetros dos chumbadores pode resultar em uma maior espessura necessária para que não haja a plastificação da seção em balanço da chapa de base.

Em suma, embora possa parecer intuitivo considerar um acréscimo nas dimensões e resistências das bases de concreto nas ligações de base de pilares, com o propósito de estabelecer conexões mais seguras, é essencial a sua verificação com

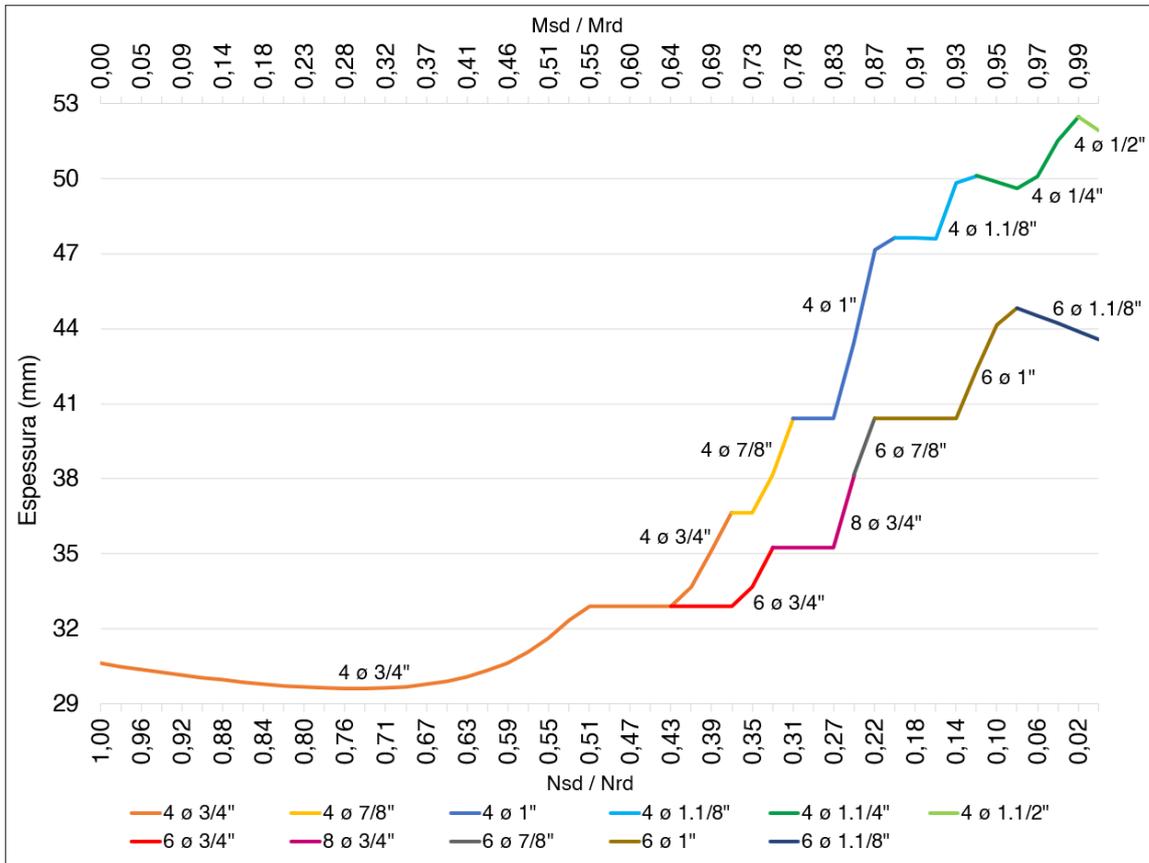
Figura 16 – Variação da espessura pela proporção da áreas para seção W310x38,7



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

o dimensionamento das chapas de base. Visto que o método abordado revelou um comportamento contraintuitivo, resultando em maiores espessuras de chapas para bases de concretos maiores ou mais resistentes. Essa observação enfatiza a importância de uma abordagem criteriosa, considerando a relação entre as diferentes variáveis envolvidas no processo de dimensionamento das ligações de bases de pilares.

Figura 17 – Variação da espessura por chumbadores



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste trabalho envolveu a análise de ligações de base de pilares metálicos explorando as metodologias para o dimensionamento das ligações indicadas pelas normas atuais, com o propósito de criar um software de interface gráfica que auxiliasse profissionais da área de projetos de estruturas metálicas e também estudantes de engenharia. Por meio da revisão bibliográfica, buscou-se compreender a função e a importância das ligações de base de pilares possibilitando a avaliação das dimensões e características necessárias para o dimensionamento dessas ligações, bem como as metodologias empregadas pelas bibliografias.

Neste trabalho foram abordadas os procedimentos de dimensionamento de ligações de bases de pilares de aço conforme descrito por Fischer e Kloiber (AISC, 2006), ainda assim, buscando uma compreensão mais completa e aprofundada no assunto também foram analisadas as metodologias de dimensionamento de ligações de base de pilares abordadas pelo Projeto de Norma da NBR8800 (ABNT), o que possibilitou a observação da grande similaridade entre seus métodos. Das divergências observadas constataram-se que os coeficientes de ponderação das resistências, apesar de apresentarem valores próximos, geraram resultados distintos entre os métodos, esse aspecto abre espaço para futuras investigações mais detalhadas sobre o assunto.

Além disso, no âmbito das análises apresentadas neste estudo, destaca-se a correlação entre as variações dos principais parâmetros necessários para o dimensionamento das ligações e os resultados das espessuras das chapas de base. De forma mais específica, demonstrou-se a sensibilidade da variação das espessuras das chapas de base em resposta a alteração de alguns parâmetros das ligações sob a influência dos conjuntos limites de esforços solicitantes.

Das principais conclusões que se delinearam deste estudo extraíndo-se uma variedade de resultados utilizando o software desenvolvido foi a notável relação entre a tensão de compressão resistente da base de concreto e as espessuras das chapas de base, particularmente para os casos de ligações dimensionadas pelo método dos grandes momentos. Tornou-se claro que ao aumentar a resistência do concreto, as chapas de base tendem a resultar em espessuras maiores. Esse fato ressalta a importância de considerar cuidadosamente a resistência da base de concreto durante o projeto das ligações de chapas de base.

Verificou-se também que o aumento nas dimensões do perfil do pilar, resultando em uma maior capacidade de carga, impactou significativamente a redução do valor da excentricidade crítica. A equação da excentricidade crítica, apesar de mais sensível a

mudanças no comprimento da chapa (associado à altura do perfil), foi notavelmente influenciada pelo acréscimo considerável da capacidade de carga do pilar. Esse efeito resultou na redução dos valores da excentricidade crítica, aumentando a sensibilidade à aplicação de momentos para a determinação da espessura de chapas de base em perfis maiores.

Por fim, o software desenvolvido demonstrou ser uma ferramenta prática e eficaz para engenheiros e estudantes, automatizando cálculos em conformidade com as normas e fornecendo resultados rápidos e confiáveis, agilizando os processos de dimensionamento. A capacidade do programa em acelerar o processo de cálculo representa uma contribuição prática e permite a avaliação eficiente de diversos cenários de projeto. Ao conduzir análises aprofundadas e extrair percepções dos resultados gerados pelo software, foi possível destacar a importância da análise criteriosa das chapas de base nas ligações de pilares metálicos. Observou-se que diferentes configurações desses elementos podem influenciar significativamente o desempenho estrutural das conexões.

Para finalizar, é importante ressaltar que uma apresentação mais detalhada do software desenvolvido neste trabalho pode ser observada no Anexo B deste documento, o qual oferece informações mais abrangentes sobre a interface do software e sobre o seu compartilhamento.

4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo, embora busque abordar o desenvolvimento de um software para o dimensionamento de ligações de base de pilares de aço do tipo W, também serve como ponto de partida para futuras explorações e implementações. Através desta seção, algumas direções possíveis para futuros trabalhos que possam aprofundar este estudo serão delineadas. As sugestões apresentadas não apenas oferecem novas maneiras de expandir esse estudo, mas também podem proporcionar a oportunidade para a avaliação de novas premissas e metodologias traçadas nesses trabalho.

- Estudo e implementação de metodologias para dimensionamento de ligações solicitadas simultaneamente a forças axiais de tração e momentos fletores;
- Análise dos comportamentos da ligações de base de pilares com elementos de enrijecimento;
- Abordar diferentes metodologias para resistências ao cisalhamento nas ligações de base de pilares.

- Analisar com maior profundidade as semelhanças e divergências entre os procedimentos abordados por Fisher e Kloiber (AISC, 2006) e o Projeto de Norma da NBR8800 (ABNT).

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI 318-19*: Building code requirements for structural concrete. Michigan, 2020. 623 p.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *AISC 360-16*: Specification for structural steel buildings. Chicago, 2016. 620 p.
- ARAÚJO, A. d.; SARMANHO, A.; BATISTA, E. d. M.; REQUENA, J. A. V.; FAKURY, R.; PIMENTA, R. J. Projeto de estruturas de edificações com perfis tubulares de aço. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 8800*: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008. 237 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 16239*: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. Rio de Janeiro, 2013. 83 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *PROJETO DA ABNT NBR 8800*: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, Em Revisão. 277 p.
- BLODGETT, O. W. Design of welded structures. *Cleveland: James F. Lincoln Arc Welding Foundation*, 1966.
- DEWOLF, J. T.; RICKER, D. T. *Column base plates*: American institute of steel construction. Chicago, 1990. 55 p.
- DEWOLF, J. T.; SARISLEY, E. F. Column foot plates with axial loads and moments. *Journal of the Structural Division*, v. 106, p. p63–65, 1980.
- DRAKE, R. M.; ELKIN, S. J. Beam-column base plate design-lrfd method. *Engineering Journal-American Institute of Steel Construction*, AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, INC., v. 36, p. 29–38, 1999.
- FAKURY, R. H.; SILVA, A.; CALDAS, R. B. Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto. *São Paulo: Person Education do Brasil*, 2016.
- FISHER, J. M.; KLOIBER, L. *Steel Design Guide 1*: Base plate and anchor rod design, american institute of steel construction. Chicago, 2006. 62 p.
- MICHILLO, D. *Estudo de comportamento de ligações de placa de base para estruturas metálicas tubulares*. Campinas: Unicamp, 2003.
- MURRAY, T. M. Design of lightly loaded steel column base plates. *Engineering Journal*, AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, Chicago, v. 20, n. 4, p. 143–152, 1983.

OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION AND OTHERS. *Safety Standards for Steel Erection*. Washington, 2001.

PIANA, I.; CALENZANI, A. Estudo de metodologias para o dimensionamento de bases de pilares de aço. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, SciELO Brasil, v. 11, p. 203–243, 2018.

PIMENTA, R. J.; ARAÚJO, A. H. M. d.; SARMANHO, A. M. C.; BATISTA, E. d. M.; REQUENA, J. A. V.; FAKURY, R. H. Ligações de apoio de pilares em perfil tubular. 2010.

REQUENA, J.; SANTOS, A. Dimensionamento de ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas. *Coleção Técnico-Científica V&M do Brasil*. Ed, v. 1, 2007.

SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E. *Steel structures: design and behavior: emphasizing load and resistance factor design*. 2009.

THORNTON, W.; KREPS, R. W.; AHMED, S. *Design of Small Base Plates for Wide Flange Columns*: Steel committee of california. California, 1990.

ANEXO A – DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS

Figura 18 – Disposições construtivas dos chumbadores

Dimensões															Armadura mínima do bloco ^f	
d_b ^a		a_1	a_2 ^g	a_3	h_1	h_2	r_1	r_2	d_f	Arruelas especiais ^{a,c,d,h}		e_n	$f_{ck,min.}$ ^b	$N_{b,min.}$ ^e	S	ϕ
pol	mm									Espessura	Dimensões					
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	MPa	mm	mm	mm
3/4	19	40	80	120	450	150	175	50	33	6,3	50 × 50	40	20	900	100	10
7/8	22	45	90	140	465	200	225	50	40	6,3	65 × 65	50	20	900	100	10
1	25	50	100	160	465	200	225	50	45	8	75 × 75	60	20	900	125	12,5
1 1/4	32	65	130	190	525	225	250	60	50	9,5	75 × 75	60	20	1100	125	12,5
1 1/2	38	80	160	230	610	250	275	70	60	9,5	90 × 90	70	25	1300	150	16
1 3/4	44	90	180	270	700	300	325	70	70	12,5	100 × 100	80	25	1600	150	16
2	50	100	200	300	850	350	375	100	80	16	125 × 125	90	30	1800	150	16

a As disposições construtivas são válidas somente para chumbadores em aço ASTM A36, arruelas especiais de aço com $f_y = 345$ MPa e para um número mínimo de quatro e um número máximo de oito chumbadores;

b $f_{ck,min.}$ é o menor valor de f_{ck} para não ocorrer esmagamento do concreto na região da porca de ancoragem dos chumbadores.

c O diâmetro do furo das arruelas especiais deve ser igual a $d_b + 1,5$ mm.

d As arruelas especiais não precisam ser soldadas à placa de base, exceto quando necessário para transmitir a força cortante aos chumbadores (ver 8.2.3).

e O bloco deve ser devidamente dimensionado conforme os critérios da ABNT NBR 6118, porém respeitando-se as seguintes dimensões mínimas:

N_b = maior valor entre $N_{b,min.}$, $\ell_x + 2e_n$ e $\ell_x + 2(a_3 - a_1)$

B_b = maior valor entre $\ell_y + 2e_n$ e $\ell_y + 2(a_3 - a_1)$

A_b = maior valor entre $h_1 + 100$ mm e N_b

Nas expressões acima, para ligação tipo 3 (Figura 14), substituir ℓ_x e ℓ_y por ℓ_d

f A armadura do bloco deve ser devidamente dimensionada conforme os critérios da ABNT NBR 6118, porém respeitando-se os valores mínimos apresentados nesta Tabela.

g Para a ligação tipo 3 (Figura 14), a dimensão a_2 deve ser entendida como a distância mínima exigida entre dois chumbadores consecutivos.

h Para assegurar melhores condições de montagem, arruelas especiais devem ser colocadas também entre a face inferior da placa de base e a porca inferior.

Fonte: NBR 16239 (ABNT, 2013)

ANEXO B – SOFTWARE CHAPA BASE

B.1 INTERFACE GRÁFICA

Apresentada na Figura 19 a interface gráfica do software desenvolvido neste trabalho tem como objetivo proporcionar aos usuários uma abordagem simplificada e intuitiva para o dimensionamento das ligações de bases de pilares metálicos.

Dentre as funcionalidades do software, além do dimensionamento, destaca-se a possibilidade de verificação das ligações, permitindo que os usuários verifiquem ligações existentes adotando as dimensões desejadas para os elementos das ligações, além disso, ao retornar um breve memorial descritivo o programa possibilita uma análise mais detalhada do comportamento das ligações, auxiliando os usuários na compressão dos resultados.

Figura 19 – Interface gráfica do software desenvolvido no trabalho

The screenshot shows the 'Chapa Base' software interface. It is divided into several functional areas:

- Procedimento:** Radio buttons for 'Dimensionamento' (selected) and 'Verificação'.
- Solicitações:** Input fields for axial force (Pu) in kN, horizontal force (Vu) in kN, and bending moment (Mu) in kNm.
- Perfil:** Radio buttons for 'Tabelado' (selected) and 'Usuário'. Below are dropdowns for 'Família' and 'Perfil W', and input fields for 'Altura (d)', 'Largura (bf)', 'Esp. alma (tw)', 'Esp. mesa (tf)', 'Área do perfil (Ag)', and 'Resist. do aço (fyk)'.
- Base de concreto:** Input fields for 'Resist. do concreto' (MPa), 'Proporção da base' (slider set to 1.00), and 'Área de concreto' (cm²).
- Chapa base:** Input fields for 'Resist. do aço' (MPa), 'Comprimento (N)', 'Largura (B)', and 'Espessura (tp)'.
- Chumbadores:** Radio buttons for 'Engaste' (selected) and 'Articulação'. Below are input fields for 'Quantidade' (4), 'Material: F1554', 'Diâmetro', 'Embutimento (hef)', 'Distância (a1)', and 'Distância (a2)'.
- Diagrama:** A technical drawing of a column base connection showing forces (Vu, Pu, Mu) and dimensions (a1, d, Chumb., N, a2).
- Resumo:** A table summarizing key parameters:

Parâmetro	Unidade	Valor	Unidade	Valor
Comprimento da chapa (N)	mm		Área de chapa	cm²
Largura da chapa (B)	mm		Área de concreto	cm²
Espessura da chapa (tp)	mm			
Diâmetro dos chumbadores	mm		Distância (a2)	mm
- Memorial:** A large empty text area for a descriptive report.
- Botões:** 'Dimensionar', 'Cancelar', 'Sobre', 'Salvar', and 'Limpar'.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

No que diz respeito as informações das seções dos pilares, com a finalidade de tornar o processo mais eficiente aos usuários, foram acrescentados as propriedades das principais famílias de perfis W laminados comercializados atualmente no Brasil, porém o software também permite aos usuários adicionar dados específicos de

pilares, garantindo a flexibilidade de adaptações das informações de acordo com as necessidades de cada projeto.

Das restrições que o programa apresenta encontram-se os limites nos números de chumbadores adotados por ligação, que variam de quatro a um máximo de dez chumbadores, além disso o material dos chumbadores também apresenta restrições e podem ser observados no software.

Por fim, referente aos elementos da interface gráfica que possibilitam o fácil entendimento do software, destaca-se a ilustração que aborda os significados das abreviações das variáveis para o dimensionamento, e também o quadro de status que tem o objetivo de indicar aos usuários possíveis erros ou incoerências nas entradas das variáveis. Os demais elementos do programa baseiam-se em caixas de entradas de valores que possibilitam o cálculo das ligações, e não apresentam características relevantes a serem abordadas.

B.2 COMPARTILHAMENTO

Com o intuito de promover a colaboração entre a comunidade de projetos de estruturas de aço, o software desenvolvido como parte deste trabalho está sendo disponibilizado no GitHub, uma plataforma amplamente reconhecida para compartilhamento e colaboração de projetos de código aberto.

A disponibilização do software no GitHub tem como objetivo criar uma oportunidade para engenheiros, projetistas e estudantes interessados na área de ligações de base de pilares metálicos acessarem, utilizarem e até mesmo aprimorarem o software. A natureza colaborativa da plataforma GitHub permite que a comunidade contribua com melhorias, correções e expansões, agregando valor contínuo ao programa.

A todos os interessados, é possível visitar o repositório do software no GitHub, acessando o seguinte link: <https://github.com/petrick-santos/chapa_base>. Lá, informações sobre como baixar, usar e contribuir com o software estão disponíveis.

ANEXO C – EXEMPLOS DE VALIDAÇÃO

A título de validação dos resultados obtidos a partir da utilização do software desenvolvido neste trabalho, serão abordados a seguir quatro exemplos de dimensionamento elaborados por Fisher e Kloiber (AISC, 2006). Os exemplos exploram as metodologias de dimensionamento para solicitações de compressão simples, compressão com momentos fletores e também solicitações de forças axiais de tração juntamente com esforços cortantes nas ligações de base de pilares de aço.

Por questões de simplificação e para facilitar o entendimento, os resultados obtidos nos exemplos elaborados serão exibidos em figuras extraídas de tabelas, onde estão abordados os principais valores das variáveis de dimensionamento das ligações, além disso as figuras abordam os valores dos exemplos nas unidades imperiais, fornecidas pelo guia de dimensionamento, e unidades internacionais, fornecidas pelo software, para que a devida comparação pudesse ser feita. Adicionalmente, em cada um dos exemplos abordados a seguir as dimensões de largura e comprimento de chapa de base tiveram seus valores pré-definidos no software para os mesmos valores estipulados por Fisher e Kloiber, com a intenção de que as variáveis necessárias para o dimensionamento das ligações fossem iguais e seus resultados não divergissem.

- **Exemplo 4,1 do "Steel Design Guide 1"**: O exemplo 4,1 elaborado por Fisher e Kloiber (AISC, 2006) aborda o dimensionamento de uma ligação de base para um pilar W12X96 com solicitação de força axial de compressão (P_u) de 700 kips, solicitações de momentos fletores (M_u) e esforços cortantes (V_u) igual a zero, resistência característica da base de concreto (f'_c) de 3 ksi e resistência de escoamento do material da chapa de base (F_y) de 36 ksi, além disso o exemplo adota a proporção entre as áreas da chapa de base e da base de concreto igual a um. A Figura 20 aborda os resultados obtidos, para esse exemplo, por Fisher e Kloiber e também pelo software desenvolvido neste trabalho, nota-se que a divergência entres os valores obtidos para a força resistente da base de concreto (P_p) é devida a aproximação numérica da conversão das unidades dos resultados, já os demais resultados foram semelhantes.

- **Exemplo 4,6 do "Steel Design Guide 1"**: O exemplo 4,6 elaborado por Fisher e Kloiber (AISC, 2006) aborda o dimensionamento de uma ligação de base para um pilar W12X96 pelo método dos pequenos momentos, com solicitação de força axial de compressão (P_u) de 376 kips, solicitação de momento fletor (M_u) de 940 kip-in., solicitação de cortante (V_u) igual a zero, resistência característica da base de concreto (f'_c) de 4 ksi, resistência de escoamento do material da chapa de base (F_y) de 36

ksi e proporção da área da chapa de base para a área da base de concreto igual a um. A Figura 21 aborda a comparação dos resultados obtidos por Fisher e Kloiber e pelo software desenvolvido neste trabalho, para o exemplo 4,6. Na comparação dos resultados não foram observadas divergências entres os valores obtidos.

Figura 20 – Resultados obtidos no exemplo 4,1

Exemplo 4,1 - Steel Design Guide 1			Software
Força axial de compressão (P_u)	700 kips	3113,76 kN	3113,76 kN
Resistência característica da base de concreto (f'_c)	3 ksi	20,68 MPa	20,68 MPa
Resistência ao escoamento da chapa de base (F_y)	36 ksi	248,21 MPa	248,21 MPa
Proporção das áreas (A_2/A_1)	1	1	1
Altura do perfil do pilar (d)	12,7 in.	322,58 mm	322,58 mm
Largura do perfil do pilar (bf)	12,2 in.	309,88 mm	309,88 mm
Comprimento da chapa de base (N)	22 in.	558,80 mm	558,80 mm
Largura da chapa de base (B)	20 in.	508,00 mm	508,00 mm
Força resistente da base de concreto (P_p)	729 kips	3244,09 kN	3243,42 kN
Dimensão m	4,97 in.	126,17 mm	126,17 mm
Dimensão n	5,12 in.	130,05 mm	130,05 mm
X	0,96	0,96	0,96
λ	1	1	1
Dimensão $\lambda n'$	3,11 in.	79,04 mm	79,04 mm
Espessura da chapa (t_p)	1,60 in.	40,75 mm	40,75 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

- **Exemplo 4,7 do "Steel Design Guide 1"**: O exemplo 4,7 elaborado por Fisher e Kloiber (AISC, 2006) aborda o dimensionamento de uma ligação de base para um pilar W12X96 pelo método dos grandes momentos, com solicitação de força axial de compressão (P_u) de 376 kips, solicitação de momento fletor (M_u) de 3600 kip-in., solicitação de cortante (V_u) igual a zero, resistência característica da base de concreto (f'_c) de 4 ksi, resistência de escoamento do material da chapa de base (F_y) de 36 ksi e proporção da área da chapa de base para a base de concreto igual a um. A Figura 22 aborda a comparação entre os resultados obtidos pelos autores (Fisher e Kloiber) e pelo programa desenvolvido. Das divergências observadas nos resultados, pode-se constatar que são devidas as imprecisões nas conversões de unidades imperiais para o sistema internacional.

- **Exemplo 4,11 do "Steel Design Guide 1"**: Por fim, o exemplo 4,11 elaborado por Fisher e Kloiber (AISC, 2006) aborda o dimensionamento de uma ligação de base para um pilar W10X45 pelo método de dimensionamento dos chumbadores solicitados por forças axiais de tração simultaneamente à esforços de cisalhamento. Com solicitação de tração (P_u) de 69,8 kips, solicitação de momento fletor (M_u) igual a zero e solicitação de cortante (V_u) igual a 36,8 kips, o exemplo não aborda o dimen-

Figura 21 – Resultados obtidos no exemplo 4,6

Exemplo 4,6 - Steel Design Guide 1			Software
Força axial de compressão (Pu)	376 kips	1672,53 kN	1672,53 kN
Momento fletor (Mu)	940 kip-in.	106,21 kN.m	106,21 kN.m
Resistência característica da base de concreto (fc')	4 ksi	27,58 MPa	27,58 MPa
Resistência ao escoamento da chapa de base (Fy)	36 ksi	248,21 MPa	248,21 MPa
Proporção das áreas (A2/A1)	1	1	1
Altura do perfil do pilar (d)	12,7 in.	322,58 mm	322,58 mm
Largura do perfil do pilar (bf)	12,2 in.	309,88 mm	309,88 mm
Comprimento da chapa de base (N)	19 in.	482,60 mm	482,60 mm
Largura da chapa de base (B)	19 in.	482,60 mm	482,60 mm
Excentricidade (e)	2,50 in.	63,50 mm	63,50 mm
Excentricidade crítica (ecrit)	5,02 in.	127,58 mm	127,58 mm
Carga linear máxima (qmax)	42,0 kips/in.	7,35 kN/mm	7,35 kN/mm
Carga linear atuante (q)	26,9 kips/in.	4,70 kN/mm	4,70 kN/mm
Tensão resistente de compressão (fp(max))	2,21 ksi	15,24 MPa	15,24 MPa
Tensão solicitante (fp)	1,41 ksi	9,75 MPa	9,75 mm
Comprimento da tensão de contato entre a chapa de base e a base de concreto (y)	14,00 in.	355,60 mm	355,59 mm
Dimensão (m)	3,47 in.	88,07 mm	88,07 mm
Dimensão (n)	4,62 in.	117,35 mm	117,35 mm
Espessura da chapa (tp)	1,36 in.	34,88 mm	34,88 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

sionamento da chapa de base em si, mas busca apresentar as metodologias para o dimensionamento dos chumbadores. A Figura 23 apresenta os resultados obtidos pelo dimensionamento realizado pelos autores (Fisher e Kloiber) e pelo software desenvolvido. Ao se analisar os resultados percebe-se que há discordâncias entre os valores da tensão resistente ao cisalhamento e também nos valores de tensão de tração final, tal ocorrência é devida ao fato de Fisher e Kloiber adotar o valor de $0,4 F_u$ para a tensão resistente ao cisalhamento dos chumbadores, onde F_u é a resistência a ruptura do material das barras de ancoragem, já o programa desenvolvido neste trabalho adota o valor de tensão resistente ao cisalhamento dos chumbadores igual a $0,45 F_u$, valor indicado na norma americana (AISC 360, 2016) com publicação posterior ao guia de dimensionamento elaborado por Fisher e Kloiber. Dito isso, este é o motivo ao qual deve-se as divergências nestes dois resultados, já os demais valores do exemplo apresentaram total semelhança.

Figura 22 – Resultados obtidos no exemplo 4,7

Exemplo 4,7 - Steel Design Guide 1			Software
Força axial de compressão (P_u)	376 kips	1672,53 kN	1672,53 kN
Momento fletor (M_u)	3600 kip-in.	406,75 kN.m	406,75 kN.m
Resistência característica da base de concreto (f_c')	4 ksi	27,58 MPa	27,58 MPa
Resistência ao escoamento da chapa de base (F_y)	36 ksi	248,21 MPa	248,21 MPa
Proporção das áreas (A_2/A_1)	1	1	1
Altura do perfil do pilar (d)	12,7 in.	322,58 mm	322,58 mm
Largura do perfil do pilar (bf)	12,2 in.	309,88 mm	309,88 mm
Comprimento da chapa de base (N)	20 in.	508,00 mm	508,00 mm
Largura da chapa de base (B)	20 in.	508,00 mm	508,00 mm
Excentricidade (e)	9,57 in.	243,19 mm	243,19 mm
Excentricidade crítica (e_{crit})	5,75 in.	145,96 mm	145,97 mm
Carga linear (q_{max})	44,2 kips/in.	7,74 kN/mm	7,74 kN/mm
Tensão resistente de compressão ($f_{p(max)}$)	2,21 ksi	15,24 MPa	15,24 MPa
Distância dos chumbadores ao eixo do perfil (f)	8,5 in.	215,90 mm	215,90 mm
Distância dos chumbadores ao centro da mesa do perfil (x)	2,15 in.	54,61 mm	54,61 mm
Comprimento da tensão de contato entre a chapa de base e a base de concreto (y)	12,61 in.	320,19 mm	320,17 mm
Força de tração nos chumbadores (T_u)	181,19 kips	805,96 kN	805,87 kN
Dimensão (m)	3,97 in.	100,77 mm	100,77 mm
Dimensão (n)	5,12 in.	130,05 mm	130,05 mm
Espessura da chapa (t_p)	1,90 in.	48,33 mm	48,33 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 23 – Resultados obtidos no exemplo 4,11

Exemplo 4,11 - Steel Design Guide 1			Software
Força axial de tração (P_u)	69,8 kips	310,49 kN	310,49 kN
Força horizontal (V_u)	36,8 kips	163,69 kN	163,69 kN
Resistência característica da base de concreto (f_c')	4 ksi	27,58 MPa	27,58 MPa
Resistência ao escoamento da chapa de base (F_y)	36 ksi	248,21 MPa	248,21 MPa
Proporção das áreas (A_2/A_1)	1	1	1
Altura do perfil do pilar (d)	12,7 in.	322,58 mm	322,58 mm
Largura do perfil do pilar (bf)	12,2 in.	309,88 mm	309,88 mm
Comprimento da chapa de base (N)	19 in.	482,60 mm	482,60 mm
Largura da chapa de base (B)	19 in.	482,60 mm	482,60 mm
Chumbadores de 1.1/2"			
Tensão de cisalhamento (f_v)	12,99 ksi	89,59 MPa	89,59 MPa
Tensão resistente de cisalhamento (F_{nv})	23,20 ksi	159,96 MPa	180,00 MPa
Tensão de tração (f_t)	9,86 ksi	67,97 MPa	67,97 MPa
Tensão de tração total (f_t)	9,86 ksi	67,97 MPa	67,97 MPa
Tensão resistente de tração (F_{nt})	43,50 ksi	299,92 MPa	300,00 MPa
Tensão de tração reduzida (ΦF_{nt})	32,62 ksi	224,94 MPa	225,00 MPa
Tensão de tração final ($\Phi F'_{nt}$)	18,00 ksi	124,44 MPa	143,18 MPa

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)