



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
ENGENHARIA CIVIL

JACKSON DELIZ DITZ

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE FLAMBAGEM EM CANTONEIRAS  
CONECTADAS POR UMA ABA**

Trabalho de Conclusão de Curso

Alegrete  
2012

**JACKSON DELIZ DITZ**

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE FLAMBAGEM EM CANTONEIRAS  
CONECTADAS POR UMA ABA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como parte das atividades  
para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Civil na Universidade Federal  
do Pampa.

Orientador: Prof. Dr. Almir Barros da Silva  
Santos Neto

Co-orientador: Prof. Me. André Lubeck

**Alegrete  
2012**

**JACKSON DELIZ DITZ**

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE FLAMBAGEM EM CANTONEIRAS  
CONECTADAS POR UMA ABA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como parte das atividades  
para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Civil na Universidade Federal  
do Pampa.

Área de concentração: Estruturas  
metálicas, Flambagem.

Trabalho apresentado e aprovado em: 19 de outubro de 2012.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Almir Barros da Silva Santos Neto  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Me. André Lubeck  
Coorientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Gihad Mohamad  
UFSM

*Dedico este trabalho aos meus amados pais, Luiz e Inêz, fortes incentivadores e fontes de muito amor, carinho, apoio e compreensão.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por ter me permitido chegar até aqui e atingir um de meus objetivos na vida.

A meu pai Luiz, minha mãe Inêz e meu irmão Júnior que sempre manifestaram seu imenso apoio, amor e compreensão, tornando este sonho possível.

A minha colega e namorada Ana Paula pelo apoio motivacional, pelo carinho, pelo amor e pelo apoio técnico.

Aos meus sogros, Pedro e Diva, que me acolhem e me apoiam nestes quase cinco anos.

Ao meu orientador, professor Almir, e ao meu co-orientador, professor André, deixo aqui o meu sincero muito obrigado pela dedicação e pela paciência. Aos professores Ederli, Diego e Tonilson meu agradecimento pelo apoio técnico.

Aos técnicos de laboratório Marcelo, Adir, Dieison e Mozer e aos colegas de faculdade Ricardo e Jackson pela ajuda técnica.

Aos demais colegas, amigos e amigas de curso, com quem compartilhei bons e maus momentos, deixo meu agradecimento pela amizade e pelo companheirismo.

As pessoas que duvidaram e/ou criticaram este trabalho eu agradeço, pois me deram força para que eu pudesse continuar.

A Gerdau pela doação das cantoneiras e a Lopes Estruturas pela doação das bases de ligação.

A todas as demais pessoas e instituições que, diretamente ou indiretamente, contribuíram à execução desta pesquisa.

*“Seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em “Deus”, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”*

*Ayrton Senna*

## RESUMO

As vantagens das estruturas metálicas vêm atraindo cada vez mais pesquisadores e profissionais a investirem nesse tipo de solução, pois sua montagem é rápida, metódica e passível de menos erros. O presente estudo, encaixado nesse contexto, visa, segundo dois métodos especificados na norma brasileira NBR 8800 (2008), realizar o dimensionamento de cantoneiras conectadas por uma aba submetidas à compressão e comparar à esses métodos a carga de ruptura obtida através de ensaios laboratoriais, onde a flambagem da peça é determinante tanto na análise teórica quanto na experimental. Além do mais, como parte dos experimentos práticos, ao realizar-se a compressão das cantoneiras mede-se o deslocamento sofrido por ambas as abas da peça a fim de obter-se a deformação em cada sentido e, portanto, verificar o processo de cálculo e modelo de flambagem mais adequado à este caso. Após a realização dos cálculos e exames experimentais, verificou-se que o método de dimensionamento que considera um comprimento equivalente de flambagem mais se aproximou da carga de ruptura obtida em laboratório e que a deslocabilidade da cantoneira foi predominante paralelamente à aba conectada.

Palavras-chave: Dimensionamento. Cantoneira. Flambagem.

## **ABSTRACT**

The advantages of steel structures are increasingly attracting researchers and professionals to invest in this kind of solution, because its assembly is fast, methodical and less susceptible to errors. This study, embedded in this context, aims, according to two specified methods in Brazilian code NBR 8800 (2008), to perform the sizing of angle bars connected in one flap submitted to compression and to compare this results with the breaking load obtained through laboratory testing, where buckling is decisive both in theoretical and the experimental analysis. Moreover, how part of measured the displacement suffered by two flaps of bar seeking to obtain the strain in each direction and, consequently, to check the design process and model of buckling more appropriate in this case. After performing the calculations and experimental tests, checked that method of calculus that consider a equivalent length of buckling more approached of breaking load obtained in laboratory and that the displaceability of angle bar was predominantly parallel to connected flap.

Keywords: Design. Angle bar. Buckling.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Comportamento tensão x esbeltez para elementos comprimidos .....	22
Figura 2: Flambagem por flexão .....	23
Figura 3: Flambagem por flexotorção .....	24
Figura 4: Flambagem por torção .....	24
Figura 5: Flambagem local .....	25
Figura 6: Simetria de perfil cantoneira .....	26
Figura 7: Dimensões da cantoneira utilizada .....	34
Figura 8: Comprimento da cantoneira e comprimento de cálculo da cantoneira .....	36
Figura 9: Prensa para ensaio dos corpos de prova .....	38
Figura 10: Célula de carga <i>Kratos CCI-30T</i> .....	39
Figura 11: Corpos de prova cortados e base para fixação das cantoneiras .....	40
Figura 12: Esquema de instalação dos LVDT's .....	41
Figura 13: Cantoneiras de reforço nas mesas das bases .....	42
Figura 14: Ligações parafusadas .....	42
Figura 15: Eixos de referência em cantoneira .....	43
Figura 16: Detalhamento das ligações parafusadas .....	51
Figura 17: Ensaio de compressão nas cantoneiras conectadas por uma aba .....	52
Figura 18: Colocação das bases magnéticas e LVDT's .....	53
Figura 19: Curvas carga de ruptura <i>versus</i> esbeltez .....	54
Figura 20 a: Esbeltez 90, lado A .....	56
Figura 20 b: Esbeltez 90, lado B .....	56
Figura 21 a: Esbeltez 100, lado A .....	56
Figura 21 b: Esbeltez 100, lado B .....	56
Figura 22 a: Esbeltez 110, lado A .....	57
Figura 22 b: Esbeltez 110, lado B .....	57
Figura 23 a: Esbeltez 120, lado A .....	57
Figura 23 b: Esbeltez 120, lado B .....	57
Figura 24: Deslocamentos horizontais paralelos à aba conectada .....	58
Figura 25: Deslocamentos horizontais perpendiculares à aba conectada .....	58
Figura 26: Cantoneira no estado original e estado deformado para esbeltez 90 .....	60
Figura 27: Cantoneira no estado original e estado deformado para esbeltez 100 .....	60

Figura 28: Cantoneira no estado original e estado deformado para esbeltez 110 ...61

Figura 29: Cantoneira no estado original e estado deformado para esbeltez 120 ...61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades de resistência mecânica de alguns tipos de parafusos .....	31
Tabela 2: Propriedades da cantoneira adotada .....	35
Tabela 3: Comprimentos de cálculo e comprimentos de corte das cantoneiras .....	36
Tabela 4: Esforço normal resistente de cálculo (kgf) em relação à esbeltez e ao método de dimensionamento .....	48
Tabela 5: Resultados dos ensaios de compressão nas cantoneiras conectadas por uma aba .....	54
Tabela 6: Deslocamentos laterais para o ensaio que obteve maior carga resistente em função da esbeltez e da carga de ruptura .....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\lambda$  - Índice de esbeltez;

$\lambda_{pl}$  - Esbeltez de plastificação;

$r$  - Raio de giração;

$L$  - Comprimento da peça;

$k$  - Coeficiente de flambagem, que dependo da vinculação;

$E$  - Módulo de elasticidade;

$I$  - Momento de inércia da peça;

$f_y$  - Tensão de escoamento do aço;

$N_{cr}$  - Carga crítica de flambagem;

$\sigma_{cr}$  - Tensão crítica de flambagem;

$N_e$  - Força axial de flambagem elástica;

$I_{x1}$  - Momento de inércia da seção transversal do perfil em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico e é paralelo à aba conectada;

$K_{x1}L_{x1}$  - Comprimento de flambagem equivalente;

$L_{x1}$  - Comprimento da cantoneira, tomado entre os pontos de trabalho situados nos eixos longitudinais das cordas;

$r_{x1}$  - Raio de giração da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico e é paralelo à aba conectada;

$N_{ex}$  ( $N_{ey}$ ;  $N_{et}$ ;  $N_{ew}$ ) - Força axial de flambagem elástica por flexão;

$N_{ez}$  - Força axial de flambagem elástica por torção;

$N_{etz}$  - Força axial de flambagem elástica por flexotorção;

$r_x$  - Raio de giração na direção "x";

$r_y$  - Raio de giração na direção "y";

$r_w$  - Raio de giração na direção "w";

$I_x$  - Momento de inércia na direção "x";

$I_y$  - Momento de inércia na direção "y";

$I_w$  - Momento de inércia na direção "w";

$I_t$  - Momento de inércia na direção "t";

$K_x$  - Coeficiente de flambagem na direção "x";

$K_y$  - Coeficiente de flambagem na direção "y";

$K_w$  - Coeficiente de flambagem na direção “w”;

$L_x$  - Comprimento destravado da peça na direção “x”;

$L_y$  - Comprimento destravado da peça na direção “y”;

$L_w$  - Comprimento destravado da peça na direção “w”;

$r_0$  - Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento;

$C_w$  - Constante de empenamento da seção transversal;

$G$  - Módulo de elasticidade transversal do aço;

$J$  - Constante de torção da seção transversal;

$y_0$  - Coordenada do centro de cisalhamento na direção “y”;

$x_0$  - Coordenada do centro de cisalhamento na direção “x”;

$t_0$  - Coordenada do centro de cisalhamento na direção “t”;

$\lambda_0$  - índice de esbeltez reduzido;

$Q$  - Fator de redução associado à flambagem local;

$A_g$  - Área bruta da seção transversal;

$\chi$  - Índice de redução associado à resistência à compressão;

$N_{c,Rd}$  - Força axial resistente de cálculo;

$N_{c,Sd}$  - Força axial solicitante de cálculo;

$\gamma_{a1}$  - Coeficiente de segurança ao escoamento;

$R_{cd}$  - Resistência de cálculo devido ao corte no parafuso;

$R_d$  - Resistência de cálculo devido à pressão de contato na parede de um furo;

$R_{fd}$  - Resistência ao deslizamento do parafuso;

$A_b$  - Área bruta do parafuso;

$f_{ub}$  - Resistência à ruptura do aço do parafuso;

$f_{yb}$  - Resistência ao escoamento do aço do parafuso;

$\gamma_{a2}$  - Coeficiente de segurança à ruptura;

$l_f$  - Distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre;

$t$  - Espessura da parte ligada;

$f_u$  - Resistência à ruptura do aço da parede do furo;

$d_b$  - Diâmetro do parafuso;

$d_f$  - Diâmetro do furo;

$\mu$  - Coeficiente médio de atrito;

$C_h$  - Fator de furo;

$F_{Tb}$  - Força de protensão mínima por parafuso;

$n_s$  - Número de planos de deslizamento;

$F_{t,sd}$  - Força de tração solicitante de cálculo no parafuso que reduz a força de protensão;

$\gamma_e$  - Coeficiente de ponderação da resistência;

$b$  - Comprimento da aba da cantoneira;

$t_1$  - Espessura da cantoneira;

$W$  - Módulo resistente ou módulo elástico;

$r_{z \min}$  - Raio de giração mínimo;

$x$  - Distância do centro de gravidade até a extremidade da peça;

CV – Coeficiente de variação;

LVDT – Linear Variable Differential Transformer.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA DA PESQUISA</b>	<b>16</b>
<b>1.2 OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
1.2.1 Objetivos gerais	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
<b>1.3 JUSTIFICATIVA</b>	<b>18</b>
<b>1.4 SISTEMATIZAÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
<b>2.1 ESTRUTURAS METÁLICAS</b>	<b>20</b>
2.1.1 Vantagens e desvantagens das estruturas metálicas	20
2.1.1.1 Vantagens	20
2.1.1.2 Desvantagens	20
<b>2.2 O AÇO COMO MATERIAL ESTRUTURAL</b>	<b>21</b>
<b>2.3 ESTRUTURAS DE AÇO SUBMETIDAS À COMPRESSÃO</b>	<b>21</b>
2.3.1 Flambagem de perfis metálicos	22
2.3.1.1 Flambagem em cantoneiras	25
a) Critérios de dimensionamento, segundo a NBR 8800 (2008)	26
a.1) Cantoneiras simples conectadas por uma aba	26
a.2 Seções monossimétricas, exceto o caso de cantoneiras simples previsto em E.1.4 do anexo E da NBR 8800 (2008)	27
a.3) Verificação da flambagem local	28
2.3.1.2 Deslocamento horizontal do perfil	29
<b>2.4 LIGAÇÕES PARAFUSADAS</b>	<b>29</b>
2.4.1 Vantagens e desvantagens das ligações parafusadas	29
2.4.1.1 Vantagens	29
2.4.1.2 Desvantagens	29
2.4.2 Parafusos comuns	30
2.4.3 Parafusos de alta resistência	30
2.4.4 Roteiro de dimensionamento, segundo a NBR 8800 (2008)	31
2.4.4.1 Resistência ao cisalhamento	31
2.4.4.2 Pressão de contato em furos	31

2.4.4.3 Resistência ao deslizamento em ligações por atrito.....	32
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 MODELOS DE CÁLCULO .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2 MODELOS DE ENSAIO E ESPECIFICAÇÃO DE MATEIRIAIS .....</b>	<b>33</b>
3.2.1 Cálculo do comprimento das cantoneiras .....	35
3.2.2 Ensaio de compressão .....	36
3.2.2.1 Montagem dos corpos de prova .....	39
3.2.3 Medição dos deslocamentos horizontais dos perfis .....	40
3.2.4 Ligações parafusadas.....	41
<b>3.3 DIMENSIONAMENTO DOS PERFIS .....</b>	<b>42</b>
3.3.1 Dimensionamento das cantoneiras – item E.1.2 .....	43
3.3.1.1 Verificação da flambagem local .....	44
3.3.1.2 Cálculo da estabilidade global .....	44
a) Perfis com esbeltez igual a 90 – item E.1.2 .....	45
3.3.2 Dimensionamento das cantoneiras – item E.1.4 .....	46
a) Perfis com esbeltez igual a 90 – item E.1.4 .....	47
3.3.3 Resumo das resistências à compressão .....	48
<b>3.4 DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS .....</b>	<b>48</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>52</b>
4.1 CARGA DE RUPTURA .....	53
4.2 DESLOCAMENTOS LATERAIS .....	57
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>62</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	62
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	63
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>66</b>
Anexo A .....	66
Anexo B .....	71



## 1. INTRODUÇÃO

As cantoneiras submetidas à compressão podem, segundo Pfeil (2010), sofrer flambagem por flexão – a qual é mais comum – flambagem por torção ou flexotorção, dependendo do tipo de vínculo (rotulada, livre ou esgastada), do tipo de aço e, sobretudo, da esbelteza. Além do mais, cantoneiras de abas iguais com esbelteza local (relação comprimento/espessura da aba) elevada podem estar sujeitas à perda da estabilidade dos elementos que compõem a seção transversal da barra, e que pode ocorrer antes que a tensão crítica determinada na análise global seja atingida (Souza, 2010), ou seja, a ocorrência de instabilidade local das abas. A mesma deve ser evitada reduzindo a relação comprimento/espessura da região instável.

Bellei (2010) deixa claro que somente barras muito curtas podem ser carregadas até o escoamento e que a maioria das rupturas se dão devido à flambagem por flexão.

De acordo com Pfeil (2010), as primeiras pesquisas sobre flambagem global de barras axialmente comprimidas foram de autoria de Leonhardt Euler (1707-1783), cujo qual investigou o equilíbrio de uma coluna comprimida na posição deformada com deslocamentos laterais. Os estudos de Euler obtiveram resultados e a carga crítica de flambagem ou carga crítica de Euler ficou conhecida como:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

sendo a mesma, portanto, diretamente proporcional ao módulo de elasticidade e ao momento de inércia e inversamente proporcional ao quadrado do comprimento de flambagem. A partir dessa carga não é mais possível o equilíbrio na configuração retilínea, estando a barra sujeita à deslocamentos laterais (Pfeil, 2010).

A NBR 8800 (2008) em seu anexo E – Força axial de flambagem elástica e coeficiente de flambagem – rege o dimensionamento de colunas ou demais barras de aço axialmente comprimidas. Os subitens deste anexo são de fundamental relevância para análise e compreensão dessa pesquisa e serão vistos de forma detalhada no decorrer do trabalho.

### 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA DA PESQUISA

A pesquisa refere-se ao dimensionamento de cantoneiras laminadas conectadas por uma aba submetidas à compressão segundo orientação da norma brasileira NBR 8800 (2008). O documento prevê o cálculo, no anexo E (Força axial de flambagem elástica e coeficiente de flambagem), dos elementos de aço com seção cantoneira de acordo com o item E.1.4 (Cantoneiras simples conectadas por uma aba). No entanto, grande parte dos projetistas consideram o perfil como monossimétrico, calculando de acordo com o item E.1.2 (Seções monossimétricas, exceto o caso de cantoneiras simples previsto em E.1.4) do anexo E. O primeiro modelo de cálculo, ao contrário do segundo, considera a cantoneira como ligada em apenas uma aba ao ser submetida aos esforços de compressão.

O projeto, então, compara os critérios de parte dos calculistas que utilizam como base o modelo do item E.1.2 do anexo E da norma NBR 8800 (2008) com o processo de cálculo que considera e calcula a seção como ligada por apenas uma aba (item E.1.4 do anexo E da norma NBR 8800 (2008)). Realizar-se-ão também ensaios de compressão em cantoneiras ligadas através de uma aba, verificando assim sua carga crítica de ruptura e podendo, portanto, comparar ambos os valores calculados pela norma à essa força de ruptura obtida em análises experimentais, além de realizar medições nos valores dos deslocamentos laterais da barra devido à sua flambagem.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

- Proporcionar uma análise comparativa entre os supracitados métodos teóricos de dimensionamento de cantoneiras simples conectadas por uma aba frente à compressão e a real carga crítica de ruptura, obtida em laboratório, através de ensaio prático com esse tipo de solicitação, variando-se a esbeltez dos perfis e, conseqüentemente, seu comprimento e sua resistência à flambagem.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Realizar o dimensionamento de cantoneiras submetidas à compressão, cujas quais considerar-se-ão conectadas por uma aba, seguindo as orientações da NBR 8800 (2008);
- Realizar ensaios de compressão em corpos de prova de aço (cantoneiras laminadas de abas iguais) carregados por uma aba com comprimentos de flambagem distintos;
- Dimensionar as ligações parafusadas nas extremidades do perfil, atendendo aos pré-requisitos básicos desse trabalho e possibilitando sua realização;
- Realizar medições nos valores dos deslocamentos laterais do perfil devido à flambagem proveniente do esforço de compressão, avaliando-se os mesmos no centro da barra, através de LVDT's (Linear Variable Differential Transformer);
- Construir curvas relacionando as esbeltezes com as respectivas cargas críticas de ruptura e os valores dos deslocamentos laterais.

### **1.3 JUSTIFICATIVA**

As estruturas de aço, em virtude da resistência, durabilidade, confiabilidade, leveza e praticidade são muito usadas em estruturas como coberturas de pavilhões industriais, edifícios, mezaninos, pilares, vigas, torres de transmissão de energia elétrica e estruturas provisórias. O estudo se justifica, então, pela possibilidade de propor uma comparação entre dois métodos teóricos de dimensionamento e, ao mesmo tempo, verificar a carga de ruptura à compressão dos perfis cantoneira.

Obtidos os valores de ruptura à compressão através dos ensaios em laboratório, buscar-se-á a comparação entre os mesmos e os valores das cargas de ruptura segundo na NBR 8800 (2008).

O estudo, assim, contribuirá ao dimensionamento das estruturas metálicas, verificando se ambos os métodos de cálculo apresentam igual segurança, se existe algum método mais conservador ou se algum dos métodos apresenta certa insegurança no cálculo dos perfis utilizados.

### **1.4 SISTEMATIZAÇÃO**

O trabalho está organizado em seis capítulos, constando o primeiro deles da introdução ao assunto, onde são apresentados o tema, os objetivos do trabalho, a justificativa e a sistematização da pesquisa.

Já no segundo capítulo, é feita uma revisão bibliográfica do assunto abordado no trabalho, ou seja, cantoneiras laminadas de abas iguais conectadas por uma aba submetidas a um esforço de compressão.

Após isso, na terceira parte do estudo, são feitas a metodologia e o programa experimental do trabalho, isto é, a esquematização dos trabalhos experimentais e o dimensionamento dos perfis e das ligações.

Na quarta parte do trabalho são apresentados os resultados da pesquisa, oferecendo os valores da resistência dos perfis através dos vários métodos de ensaio e dimensionamento, além de tabelas e gráficos comparativos.

A quinta parte do estudo consiste na formulação da conclusão sobre os métodos de dimensionamento e experiências laboratoriais, além de sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, na última parte do trabalho, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas e complementares, além de dois anexos.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 ESTRUTURAS METÁLICAS**

Em relação ao crescimento no uso das estruturas metálicas, Souza (2010) afirma que a realidade atual no uso do aço como material estrutural é bem diferente da de alguns anos atrás, deixando ele de ser utilizado predominantemente em edifícios industriais e grandes pavimentos, mas, atualmente, também em edifícios comerciais, shopping centers, edifícios residenciais, pontes, viadutos e passarelas.

#### **2.1.1 Vantagens e desvantagens das estruturas metálicas.**

As principais vantagens e desvantagens quanto ao uso de estruturas metálicas podem ser, segundo Pinheiro (2005), identificadas conforme segue.

##### **2.1.1.1 Vantagens**

- Estruturas com medidas precisas;
- Conhecimento correto nas características dos materiais;
- Material resistente a choques e vibrações;
- Execução das obras de forma mais rápida e mais limpa;
- Possibilidade de desmontagens e reaproveitamento dos elementos de aço;
- Alta resistência com menor massa.

##### **2.1.1.2 Desvantagens**

- Limitação da fabricação das peças em fábricas;
- Limitação no comprimento dos elementos, devido ao meio de transporte;
- Necessidade de tratamento anticorrosivo;
- Necessidade de mão de obra e equipamentos especializados para fabricação e montagem;
- Limitação no fornecimento dos perfis estruturais.

## 2.2 O AÇO COMO MATERIAL ESTRUTURAL

O aço, segundo Chiaverini (1996) *apud* Pfeil (2010), é uma liga formada basicamente por ferro e carbono, este variando entre 0,008% e 2,11%. O carbono aumenta a resistência do aço, porém torna-o mais frágil. Outros elementos químicos podem ser adicionados em pequenas quantidades para modificar algumas de suas propriedades químicas e mecânicas. Os mesmos podem ser manganês, cobre e silício, por exemplo.

Pfeil (2000) explica que, na natureza, o elemento ferro é encontrado na forma de hematita e o carbono acha-se na composição do carvão mineral. O principal processo de fabricação dá-se num forno denominado “alto forno”, onde ambos os materiais são levados a altas temperaturas, originando assim o material aço.

## 2.3 ESTRUTURAS DE AÇO SUBMETIDAS À COMPRESSÃO

Segundo Pfeil (2010), as barras de aço comprimidas podem ser encontradas em componentes de treliças, sistemas de travejamento e em pilares de sistemas contraventados de edifícios.

Esse tipo de sollicitação, dependendo do índice de esbeltez do perfil, pode gerar a ruptura por escoamento ou flambagem, sendo que o primeiro ocorre somente em barras curtas (Esbeltez real menor que esbeltez de plastificação) (Souza, 2010). A esbeltez real das barras depende essencialmente do seu comprimento e raio de giração, sendo dada por:

$$\lambda = \frac{kL}{r}$$

Já a esbeltez de plastificação é função direta do tipo de aço, pois varia de acordo com o módulo de elasticidade e resistência ao escoamento, sendo a mesma conhecida por:

$$\lambda_{pl} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{f_y}}$$

A figura 1 apresenta o gráfico tensão x esbeltez, exemplificando as esbeltezes reais e de plastificação. A curva “a” define a tensão crítica de flambagem e é dada por:

$$\sigma_{cr} = \frac{E\pi^2}{\lambda^2}$$

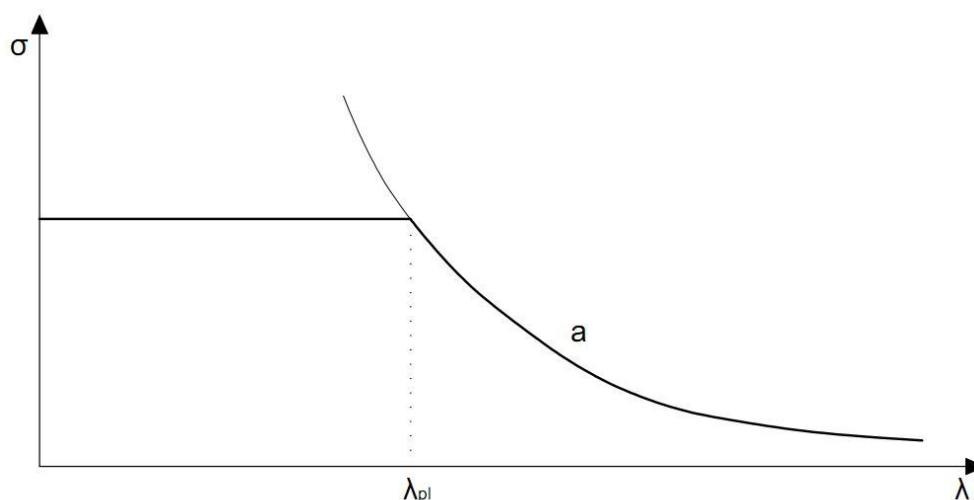


Figura 1 - Comportamento tensão x esbeltez para elementos comprimidos. Fonte: Souza (2010).

### 2.3.1 Flambagem de perfis metálicos

De acordo com Bellei (2010), a situação mais comum de ruptura em um perfil de aço é a sua flambagem ou flexão súbita. Somente em barras curtas a resistência é atingida antes que a mesma flambe.

No caso de instabilidade global do perfil, a flambagem pode se dar por flexão (que é o caso mais comum), por torção ou flexotorção (Souza, 2010). Em barras que apresentam seção transversal monossimétrica ou assimétrica, além de parede fina, todos os casos desse tipo de instabilidade devem ser considerados, especialmente em barras de pequena esbeltez, pois geralmente para esbeltez elevada, o caso tradicional é determinante. Já em perfis duplamente simétricos, há predominância do caso particular de flambagem por flexão, não havendo necessidade de verificação da flambagem à torção e flexo-torção.

Ainda segundo Souza (2010), a flambagem por torção está associada à rotações da seção transversal do elemento, enquanto a flambagem por flexotorção

se caracteriza pela combinação de flambagem por flexão e por torção nas seções transversais do elemento comprimido.

As figuras 2, 3 e 4 representam a seção transversal de um perfil metálico submetido à um carregamento de compressão. Em destaque o estado deformado e em tonalidade inferior a barra no estado original.

Na figura 2, a barra encontra-se deformada devido à flambagem por flexão e na figura 3, a mesma sofreu flexotorção. Já na representação 4, o perfil sofreu torção.

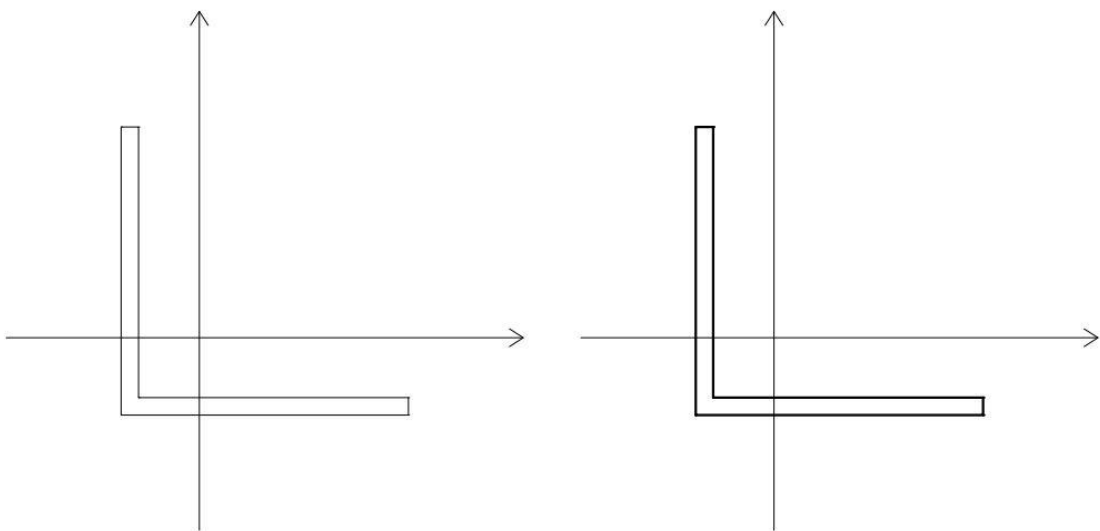


Figura 2 – Flambagem por flexão. Fonte: Souza (2010).



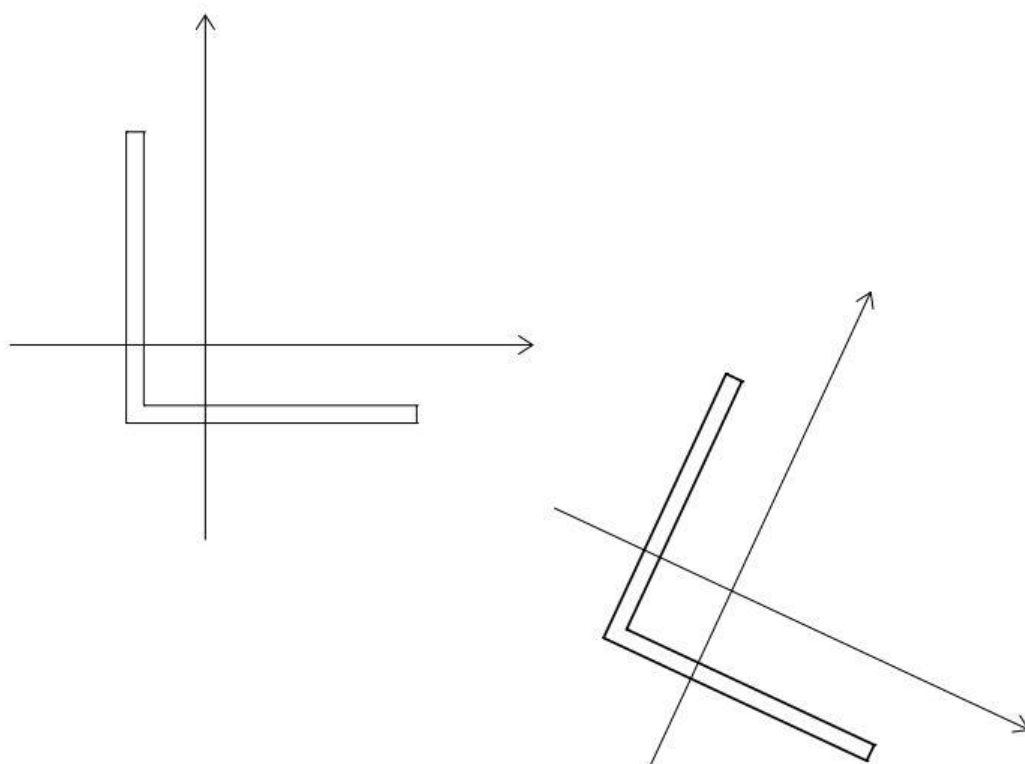


Figura 3 – Flambagem por flexotorção. Fonte: Souza (2010).

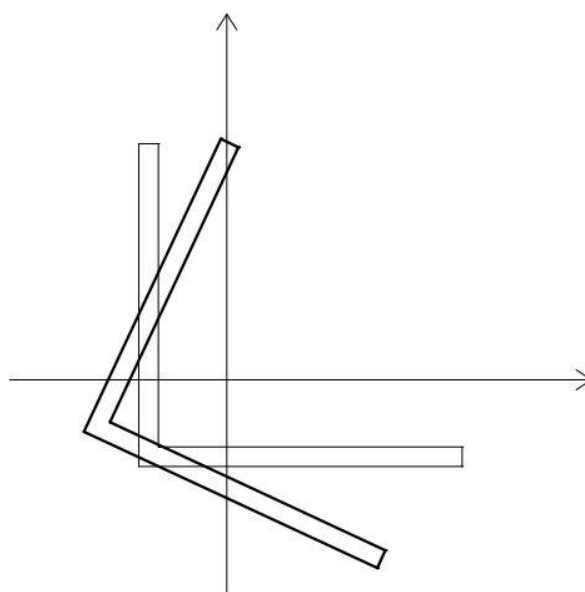


Figura 4 – Flambagem por torção. Fonte: Souza (2010).

Em perfis com paredes longas e finas (elevada relação largura/espessura) há a tendência de o perfil sofrer instabilidade local, ou seja, flambagem local das abas – no caso de cantoneiras – almas ou mesas. Nesse tipo de reação, as placas comprimidas apresentam deslocamentos laterais na forma de ondulação (Pfeil, 2010).

A figura 5 ilustra a seção transversal de uma cantoneira após sofrer flambagem local. Em destaque a barra deformada.

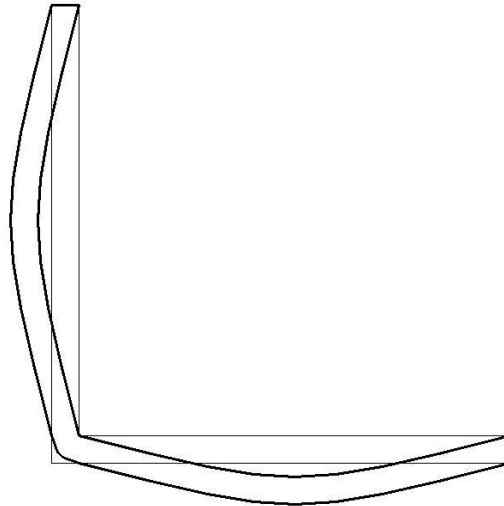


Figura 5 – Flambagem local. Fonte: Pfeil (2010).

### **2.3.1.1 Flambagem em cantoneiras**

As cantoneiras de aço se caracterizam por apresentar, segundo Pfeil (2010) e Souza (2010), um eixo de simetria não vertical ou horizontal em relação a sua aba, mas sim formando um ângulo de  $45^\circ$  com a mesma, conforme ilustra a figura 6. Há ainda quem trate esse tipo de perfil como assimétrico, ou seja, não levando em consideração o eixo diagonal de simetria.

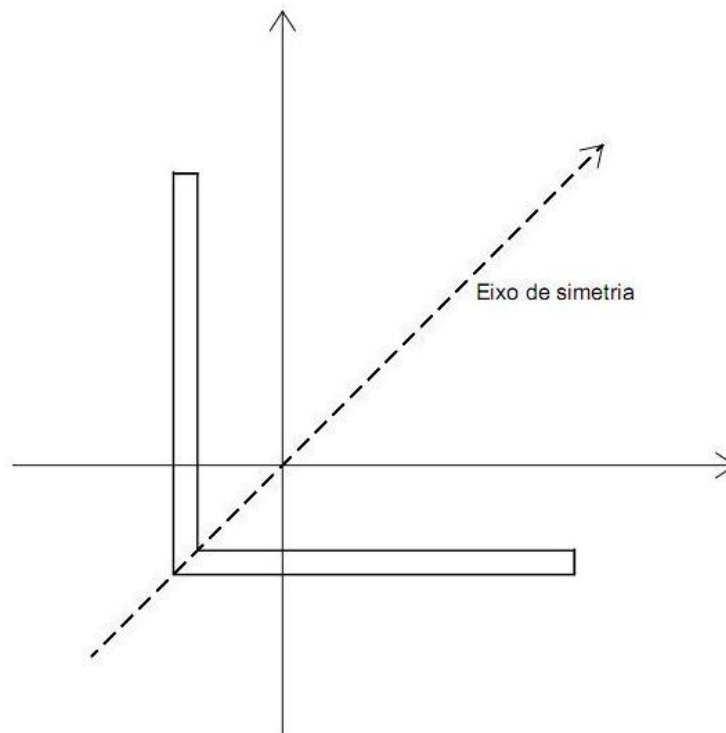


Figura 6 – Simetria de cantoneira. Fonte: Pfeil (2000).

Por se tratar de um perfil com seção monossimétrica – ou assimétrica – os três casos de flambagem devem ser verificados, além da análise de estabilidade local. Portanto, a forma com que ocorrerá a ruína de uma cantoneira dependerá essencialmente da sua esbeltez e, caso haja flambagem local, da largura e espessura da aba.

#### **a) Critérios de dimensionamento, segundo a NBR 8800 (2008)**

##### **a.1) Cantoneiras simples conectadas por uma aba**

A NBR 8800 (2008), em seu anexo E, prevê o cálculo dos perfis de seção cantoneira conectados através de uma aba. O item E.1.4, denominado “Cantoneiras simples conectadas por uma aba”, rege o dimensionamento. Segundo a norma, os efeitos da excentricidade da força de compressão atuante no perfil supracitado podem ser considerados por meio de um comprimento equivalente de flambagem. Para isso, a barra deve ser carregada nas extremidades através da mesma aba, ser conectada por solda ou por pelo menos dois parafusos na direção do carregamento e não estar sujeita à ações transversais intermediárias.

Nesse caso, a força axial de flambagem elástica,  $N_e$ , será:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI_{x1}}{(K_{x1}L_{x1})^2}$$

O comprimento de flambagem equivalente ( $K_{x1}L_{x1}$ ) dependerá do comprimento da cantoneira e do raio de giração em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico e é paralelo à aba conectada, sendo este dado e condicionado por:

Se:

$$0 \leq \frac{L_{x1}}{r_{x1}} \leq 80: K_{x1}L_{x1} = 72r_{x1} + 0,75L_{x1}$$

$$\frac{L_{x1}}{r_{x1}} > 80: K_{x1}L_{x1} = 32r_{x1} + 1,25L_{x1}$$

#### **a.2) Seções monossimétricas, exceto o caso de cantoneiras simples previsto em E.1.4 do anexo E da NBR 8800 (2008)**

O item E.1.2 da NBR 8800 (2008) não propõe o cálculo, para o tipo de cantoneira mencionado, através desse método. Entretanto, autores como Pfeil (2010) e Souza (2010) o fazem. O mesmo trata de verificar a força axial de flambagem elástica determinando-se esse carregamento para flambagem por flexão, torção e flexotorção. Considerando “y” o eixo de simetria, as equações a seguir relatam os três casos.

Para flambagem elástica por flexão, a equação é:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2}$$

Já para flambagem por torção (em relação ao eixo da torção, denominado eixo “z”), a equação da carga axial de flambagem é:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$$

No caso da flambagem por flexotorção, a equação é:

$$N_{eyz} = \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2 \left[ 1 - \left( \frac{y_0}{r_0} \right)^2 \right]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ey}N_{ez} \left[ 1 - \left( \frac{y_0}{r_0} \right)^2 \right]}{(N_{ey} + N_{ez})^2}} \right]$$

A NBR 8800 (2008) explica que, caso o eixo “x” fosse o eixo de simetria, bastaria substituir os coeficientes “x” por “y” na equação da flambagem elástica por flexão e “y” por “x” na equação da flambagem por flexotorção.

Conhecida a força axial de flambagem elástica, parte-se agora para o cálculo do índice de esbelteza reduzido, o qual é definido como:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}}$$

Feito isso, calcula-se o fator  $\chi$ , que é o índice de redução associado à resistência à compressão.

$$\text{Para } \lambda_0 \leq 1,5: \chi = 0,658\lambda_0^2$$

$$\text{Para } \lambda_0 \geq 1,5: \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$$

Após, então, a força axial resistente de cálculo é calculada:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi QA_g f_y}{\gamma_{a1}}$$

### a.3) Verificação da flambagem local

Para não haver limitações no uso dos perfis decorrentes de falhas locais, deve-se limitar a relação largura/espessura da aba/alma/mesa de acordo com o anexo F – Flambagem local de barras axialmente comprimidas – da norma NBR 8800 (2008).

Para cantoneiras, a relação largura/espessura máxima é dada por:

$$\left( \frac{b}{t_1} \right)_{lim} = 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Caso esse valor supere a relação largura/espessura do perfil deve-se calcular o fator de redução associado à flambagem local, encontrado no anexo F da norma NBR 8800 (2008). Caso contrário, considera-se o índice  $Q$  como igual a um.

### **2.3.1.1 Deslocamento horizontal do perfil**

Como, em perfis com esbeltez maior que a esbeltez de plastificação, há flambagem – por flexão, torção ou flexotorção – há a tendência de o mesmo sofrer um deslocamento horizontal, estando a máxima deformação, para ligações birrotuladas, situada em  $L/2$ , ou seja, na metade do comprimento da barra.

A medida que vai-se aumentando o carregamento, aumenta o deslocamento horizontal, até a completa ruína.

## **2.4 LIGAÇÕES PARAFUSADAS**

### **2.4.1 Vantagens e desvantagens das ligações parafusadas**

Segundo Bellei (2010), as principais vantagens e desvantagens das ligações parafusadas em relação às rebitadas e soldadas são:

#### **2.1.1.1 Vantagens**

- Rapidez nas ligações de campo;
- Economia em relação ao consumo de energia, podendo ser empregadas em locais em que há pouca energia disponível;
- Uso de poucas pessoas (duas), não muito qualificadas, como é o caso dos soldadores;
- Melhor resposta às tensões de fadiga.

#### **2.4.1.1 Desvantagens**

- Necessidade de verificação de áreas líquidas e esmagamentos das peças, o que muitas vezes exige reforço dessas partes;

- Necessidade de previsão antecipada, para evitar falta de parafusos na obra;
- Necessidade, em alguns casos, de se realizar uma pré-montagem de fábrica para casamento perfeito dos furos.

#### **2.4.2 Parafusos comuns**

Os parafusos comuns feitos de aço carbono, segundo Pfeil (2010) com baixo teor de carbono, são os de mais baixo custo, porém, devido a sua baixa resistência, podem não produzir ligações econômicas (Bellei, 2010).

Bellei (2010) ainda explica que os vínculos gerados com parafusos comuns (ASTM A307) são mais empregados em estruturas leves, membros secundários, terças, pequenas treliças e/ou aonde as cargas são de pequena intensidade e de natureza estática.

#### **2.4.3 Parafusos de alta resistência**

Os parafusos de alta resistência são usados, segundo Bellei (2010), em estruturas pesadas, quando existem grandes cargas nas peças a ligar e nas ligações principais das estruturas sujeitas a cargas dinâmicas. Os tipos básicos de parafusos são: ASTM A325 e ASTM A490, com tensão de ruptura de, respectivamente, 82,5 KN/cm<sup>2</sup> a 72,5 KN/cm<sup>2</sup>, dependendo do diâmetro e 103,5 KN/cm<sup>2</sup> (tabela 1). Há ainda o parafuso DIN-ISO 898 classe 8.8, similar ao ASTM A325, porém com tensão de escoamento e tensão de ruptura pouco diferentes.

Os parafusos de alta resistência podem ser aplicados de duas maneiras: quando se deseja ligação que impeça qualquer movimento entre as chapas de conexão, os mesmos devem ser dimensionados com um coeficiente de segurança contra o deslizamento, sendo assim chamadas de *ligações tipo atrito*, cujas quais apresentam maior resistência mecânica, devido ao atrito chapa-parafuso. Outro modo de conexão é denominado *ligação tipo apoio (ou contato)*, onde pequenos deslizamentos são toleráveis (Pfeil, 2010).

O primeiro caso supracitado necessita protensão especial, que pode ser feita, segundo Bellei (2010), através de chave de torque calibrada ou de acordo com

o método de giro da porca, aceito pela norma NBR 8800 (2008). O segundo método dispensa protensão inicial, podendo ser feito com aperto normal (Pfeil, 2010).

A tabela 1 informa a resistência à ruptura e ao escoamento de alguns tipos de parafusos (Pfeil, 2010).

Tabela 1 – Propriedades de resistência mecânica de alguns tipos de parafusos.

Tipo de conector		$f_{yb}$ (MPa)	$f_{ub}$ (MPa)
Parafusos comuns ASTM A307	$d \leq 102 \text{ mm (4")}$		415
Parafusos de alta resistência ASTM A325	$12,7 \text{ mm (1/2")} \leq d \leq 25,4 \text{ mm (1")}$	635	825
	$25,4 \text{ mm (1")} \leq d \leq 38,1 \text{ mm (1.1/2")}$	560	725
Parafusos de alta resistência ASTM A490	$12,7 \text{ mm (1/2")} \leq d \leq 38,1 \text{ mm (1.1/2")}$	895	1035
DIN-ISO 898 Classe 8.8	$12,7 \text{ mm (1/2")} \leq d \leq 38,1 \text{ mm (1.1/2")}$	640	800

Fonte: Pfeil (2010).

## 2.4.4 Roteiro de dimensionamento, segundo a NBR 8800 (2008)

### 2.4.4.1 Resistência ao cisalhamento

A resistência de cálculo devido ao corte no parafuso é dada por:

- Para parafuso comum e parafuso de alta resistência, quando o plano de corte passa pela rosca:

$$R_{cd} = 0,4 \frac{A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}}$$

- Para parafuso de alta resistência, quando o plano de corte passa pelo fuste:

$$R_{cd} = 0,5 \frac{A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}}$$

### 2.4.4.2 Pressão de contato em furos

A força resistente de cálculo à pressão de contato na parede de um furo – rasgamento e esmagamento da chapa ligada – para furos-padrão e considerando



que a deformação no furo para forças de serviço é uma limitação de projeto é dada por:

$$R_d = \frac{1,2l_f t f_{ub}}{\gamma_{a2}} (\text{rasgamento}) \leq \frac{2,4d_b t f_{ub}}{\gamma_{a2}} (\text{esmagamento})$$

#### 2.4.4.3 Resistência ao deslizamento em ligações por atrito

Quando se usar parafusos de alta resistência com ligação por atrito, para se garantir o preestabelecido, deve-se realizar a verificação da resistência ao deslizamento, cuja qual, para o estado-limite último, é dada por:

$$R_{fd} = \frac{1,13\mu C_h F_{Tb} n_s}{\gamma_e} \left( 1 - \frac{F_{t,Sd}}{1,13F_{Tb}} \right)$$

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são descritos os procedimentos metodológicos da pesquisa, como o dimensionamento teórico por ambos os métodos citados, o cálculo das ligações parafusadas base-cantoneira, além da especificação e detalhamento do ensaio de compressão em cantoneiras laminadas conectadas por uma aba, assim como as medições de deslocamento lateral do perfil devido à flambagem.

#### 3.1 MODELOS DE CÁLCULO

Para o dimensionamento dos perfis é utilizada a norma brasileira NBR 8800 (2008), no item 5.3 – Barras prismáticas submetidas à força axial de compressão – o anexo E – Força axial de flambagem elástica e coeficiente de flambagem e o anexo F – Flambagem local de barras axialmente comprimidas.

No caso das ligações parafusadas nas extremidades da barra, a NBR 8800 (2008), no item 6.3 – Parafusos e barras redondas rosqueadas – estabelece os critérios para o dimensionamento dos parafusos, roteiro cujo qual será adotado nesse trabalho.

#### 3.2 MODELOS DE ENSAIO E ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAIS

Para o dimensionamento e consequente realização dos ensaios de compressão, são adotados diferentes índices de esbeltez, os quais são 90, 100, 110 e 120. Esses valores foram arbitrados levando em consideração a capacidade da Máquina Universal de Ensaio, a esbeltez máxima aceitável em edificações de aço e a esbeltez de plastificação (calculada a seguir).

O aço utilizado é, segundo nomenclatura brasileira e de acordo com especificações técnicas da fabricante das cantoneiras, o MR-250, com tensão de escoamento igual a 250 MPa e módulo de elasticidade de 205 GPa.

$$\lambda_{pl} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{f_y}} = \sqrt{\frac{\pi^2 * 205000 \text{ MPa}}{250 \text{ MPa}}} = 89,96$$

Para haver flambagem, é necessário que a esbeltez da peça seja maior que a esbeltez de plastificação (Souza, 2010). Daí o fato da esbeltez mínima adotada no trabalho ser igual a 90.

Segundo a NBR 8800 (2008), a esbeltez máxima em uma peça de aço submetida à compressão é, exceto para pontes, igual a 200. Porém, não são ensaiados corpos de prova com tamanha esbeltez em virtude de limitações na Máquina Universal de Ensaio. Estimou-se esbeltezes intermediárias, com variação igual a 10, para assim poder obter o conhecimento do modelo de ruptura para esbeltezes diversificadas.

Feita essa primeira escolha das esbeltezes, arbitra-se as cantoneiras e verificar-se o comprimento de cada perfil (calculado em 3.2.1). O comprimento da barra não pode exceder a distância útil na prensa.

Para não exceder essa distância, a cantoneira não pode ter um raio de giração muito considerável, ou seja, a peça deve ter aba não muito grande. Em contrapartida, seu comprimento não deve ser menor que a largura necessária requerida para a ligação parafusada.

Consciente desses pontos, a cantoneira adotada, proveniente da empresa Gerdau S.A. de Sapucaia do Sul/RS, possui aba de 1.½” e espessura de ⅛”, conforme a figura 7.

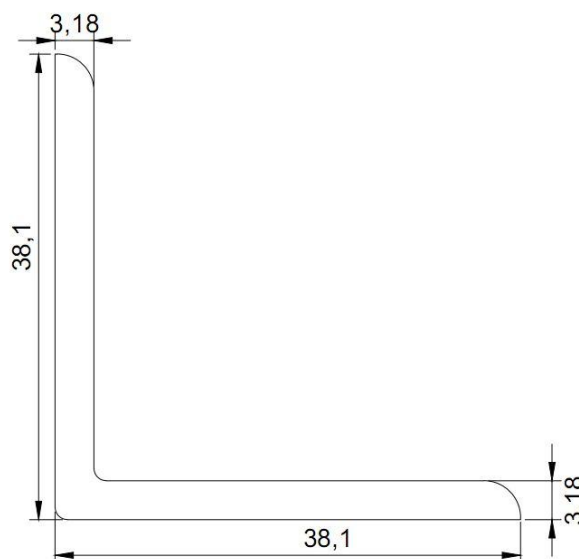


Figura 7 - Dimensões, em milímetros, da cantoneira utilizada. Fonte: Cantoneira de Abas Iguais Gerdau. Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-por-aplicacao-detalle-produto.aspx?familia=245>>. Acesso em: 04 de novembro de 2011.

A tabela 2 fornece as características da cantoneira, cujas quais são fornecidas pela fabricante.

Tabela 2 – Propriedades da cantoneira adotada.

b		Peso nominal	t <sub>1</sub>		Área	I <sub>x</sub> =I <sub>y</sub>	W <sub>x</sub> =W <sub>y</sub>	r <sub>x</sub> =r <sub>y</sub>	r <sub>z min</sub>	x
pol	mm	kg/m	pol	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm	cm
1.1/2	38,10	1,83	1/8	3,18	2,32	3,33	1,15	1,17	0,76	1,07

Fonte: Cantoneira de Abas Iguais Gerdau. Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-por-aplicacao-detalle-produto.aspx?familia=245>>. Acesso em: 04 de novembro de 2011.

### 3.2.1 Cálculo do comprimento das cantoneiras

Através do raio de giração mínimo da seção transversal e da esbeltez desejada, pode-se calcular o comprimento destravado de cálculo de cada perfil, conforme segue:

$$\lambda = \frac{kL}{r} \rightarrow L = r\lambda$$

onde o coeficiente de flambagem  $k$  é igual a 1, pois a ligação é birrotulada.

- Para esbeltez igual a 90:

$$L = r\lambda = 0,76 \text{ cm} * 90 = 68,4 \text{ cm}$$

- Para esbeltez igual a 100:

$$L = r\lambda = 0,76 \text{ cm} * 100 = 76,0 \text{ cm}$$

- Para esbeltez igual a 110:

$$L = r\lambda = 0,76 \text{ cm} * 110 = 83,6 \text{ cm}$$

- Para esbeltez igual a 120:

$$L = r\lambda = 0,76 \text{ cm} * 120 = 91,2 \text{ cm}$$

De fato, o comprimento de cálculo difere do comprimento da cantoneira. O primeiro é a distância entre os eixos das ligações, o qual é usado no dimensionamento da peça. Já o segundo é o comprimento total da barra, medida entre extremos, como indica a figura 8.

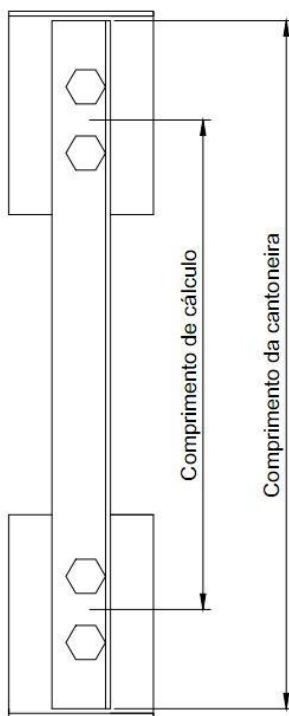


Figura 8 - Comprimento da cantoneira e comprimento de cálculo da cantoneira. Fonte: O autor.

A tabela 3 informa os comprimentos de cálculo e os comprimentos totais das cantoneiras de todas as esbeltezes usadas nesse estudo.

Tabela 3 – Comprimentos de cálculo e comprimentos de corte das cantoneiras

Esbeltez	Comprimento de cálculo (cm)	Comprimento da cantoneira (cm)
90	68,4	81,3
100	76	88,9
110	83,6	96,5
120	91,2	104,1

Fonte: O autor.

### 3.2.2 Ensaio de compressão

O ensaio a realizar-se na pesquisa consiste em aplicar uma carga de compressão normal à barra, ou seja, na direção axial da mesma (mede-se também o deslocamento horizontal devido à flambagem, e que está detalhado no subitem 3.2.3), estando esta conectada em uma aba através de parafusos, obtendo assim o módulo da força com que haverá a ruptura da cantoneira. A Máquina Universal de Ensaio usada nos experimentos trata-se de uma máquina da marca *EMIC*, modelo *DL 20.000* (figura 9), com capacidade de 200 KN e distância livre para ensaio de 117 cm.

Já a célula de carga, adaptada à Máquina Universal de Ensaio através de dispositivos especialmente fabricados a esse destino – por ser de marca diferente – trata-se de uma *Kratos*, modelo *CCI-30T* (figura 10), com capacidade de 300 KN. A altura da célula de carga influencia no comprimento dos corpos de prova, pois a distância livre para ensaio deve ser reduzida essa altura da célula de carregamento.

Além disso, foi realizada a calibração da célula de carga *Kratos CCI-30T* no laboratório de Materiais e Construção da Universidade Federal do Pampa em uma prensa marca *EMIC*, modelo *PC150C*.

Ligado à célula de carga está um Sistema de Aquisição de Dados, da marca *HBM*, modelo *Spider 8*, que fornece a carga aplicada instantaneamente ao longo do tempo de aplicação. O mesmo informa o valor do carregamento através de um *software* instalado em microcomputador de uso exclusivo.

A taxa de carregamento adotada na pesquisa segue o trabalho de Chodraui (2006), cujo qual utilizou 21 MPa/minuto como a taxa com que a força axial comprime a peça em estudo. A partir desse dado, encontrou-se, através de cálculos, uma velocidade de aproximação da célula de carga à cantoneira de 0,8 mm/minuto.

Além do mais, com o objetivo de amenizar possíveis imperfeições na mesa do perfil U da base da ligação com a célula de carga e com a parte inferior da prensa, são dispostas borrachas finas nesses locais a cumprir também o papel de facilitar a colocação do corpo de prova e a sua regulação e nivelamento.

São ensaiados cinco corpos de prova de cada esbeltez, visando, assim, conseguir resultados mais precisos, obtendo as médias das cargas críticas de ruptura para cada um dos ensaios.



Figura 9 - Prensa para ensaio dos corpos de prova. Fonte: O autor.



Figura 10 – Célula de carga *Kratos CCI-30T*. Fonte: O autor.

### **3.2.2.1 Montagem dos corpos de prova**

As cantoneiras provenientes da empresa Gerdau S.A vem originalmente em barras de comprimento igual a 6 metros. O primeiro passo, portanto, para a montagem dos corpos de prova é o seu corte nos comprimentos de execução de cada perfil. O procedimento é realizado no laboratório de engenharia mecânica da Universidade Federal do Pampa, com o auxílio de profissionais da área, bem como a furação, realizada em furadeira de coluna, no mesmo laboratório.

Feito isso, basta-se efetuar a montagem propriamente dita, ou seja, ligar através dos parafusos as extremidades – ou bases – e as cantoneiras.

A figura 11 mostra os corpos de prova cortados em seus respectivos comprimentos de execução mais uma das bases de fixação dos parafusos.





Figura 11 – Corpos de prova cortados e base para fixação das ligações parafusadas. Fonte: O autor.

### 3.2.3 Medição dos deslocamentos horizontais dos perfis

Com o auxílio de LVTD's (Linear Variable Differential Transformer), da marca *HBM*, modelo *WA*, ligados ao Sistema de Aquisição de Dados *HBM Spider 8* mede-se o deslocamento horizontal do perfil submetido à compressão ao longo da aplicação do carregamento, obtendo-se ao final um deslocamento horizontal em função do valor da força.

São instalados dois LVDT's perpendiculares à cada uma das abas e na metade do comprimento do corpo de prova (figura 12). Na aba conectada é utilizado como instrumento de medição um LVDT modelo *WA-50*, com comprimento de curso igual a 50 mm. Já na aba não conectada não há possibilidade de instalar um modelo idêntico ao anterior, pois a estrutura da Máquina Universal de Ensaio impede a instalação do mesmo, sendo usado, portanto, um LVDT *WA-20*, esse com comprimento de curso igual a 20 mm. Ambos os instrumentos são fixados através de bases magnéticas. Isso permite obter o deslocamento horizontal que cada aba sofrerá com a carga crescente aplicada à cantoneira.

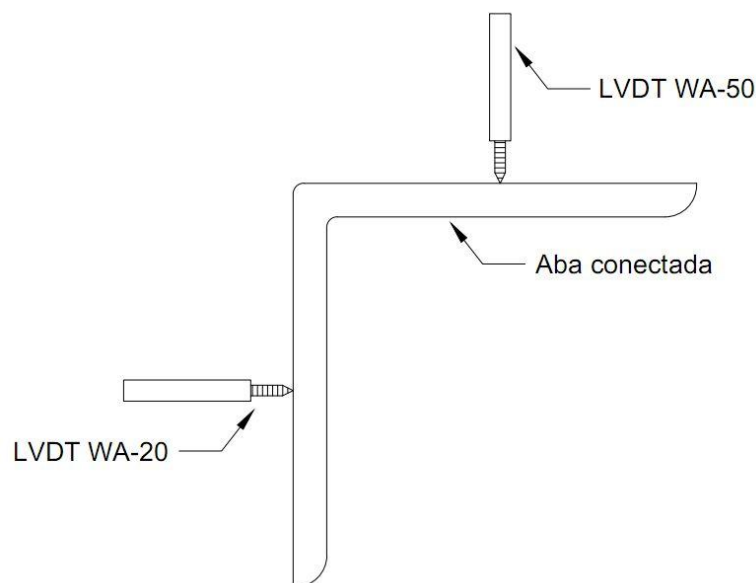


Figura 12 – Esquema de instalação dos LVDT's. Fonte: O autor.

### 3.2.4 Ligações parafusadas

Para garantir a vinculação desejada nas extremidades do perfil, são utilizadas ligações parafusadas, com bases formadas por perfis “U” laminados, visando também obter excentricidade igual a zero. A cantoneira base conecta a extremidade do perfil ensaiado por uma aba, pré-requisito supracitado nesse trabalho. Lembra-se, também, que deixa-se uma “folga” de 10 mm entre a extremidade do perfil e a base metálica, a fim de garantir os requisitos supracitados ao desenvolvimento do trabalho, ou seja, carregamento somente em uma aba.

Com o objetivo de proporcionar maior rigidez à base, pois a força de compressão atua igualmente distribuída sob esta, solda-se duas cantoneiras – mais robustas em relação às ensaiadas – nas extremidades laterais da mesma, de modo a evitar a flexão da mesa do perfil U, conforme a figura 13.

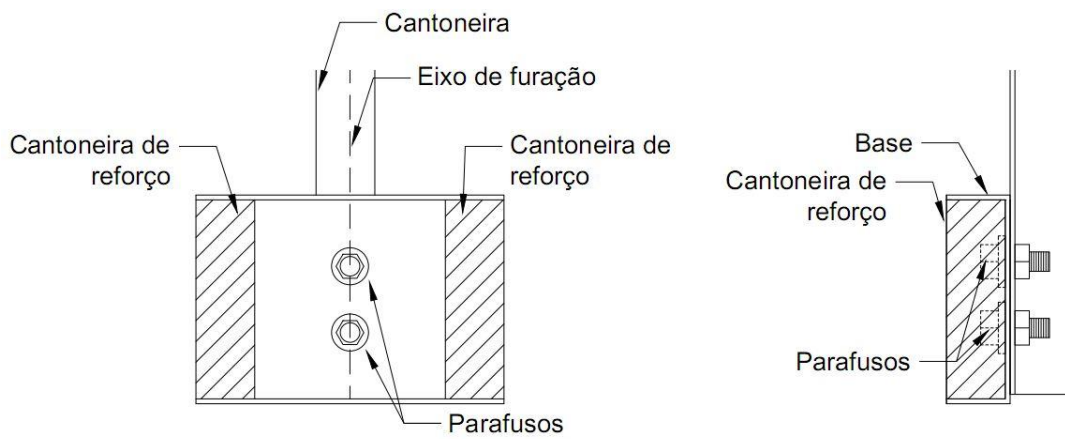


Figura 13 – Cantoneiras de reforço das mesas das bases. Fonte: O autor.

A figura 14 apresenta o esquema de ligação base-cantoneira para ambas as extremidades.

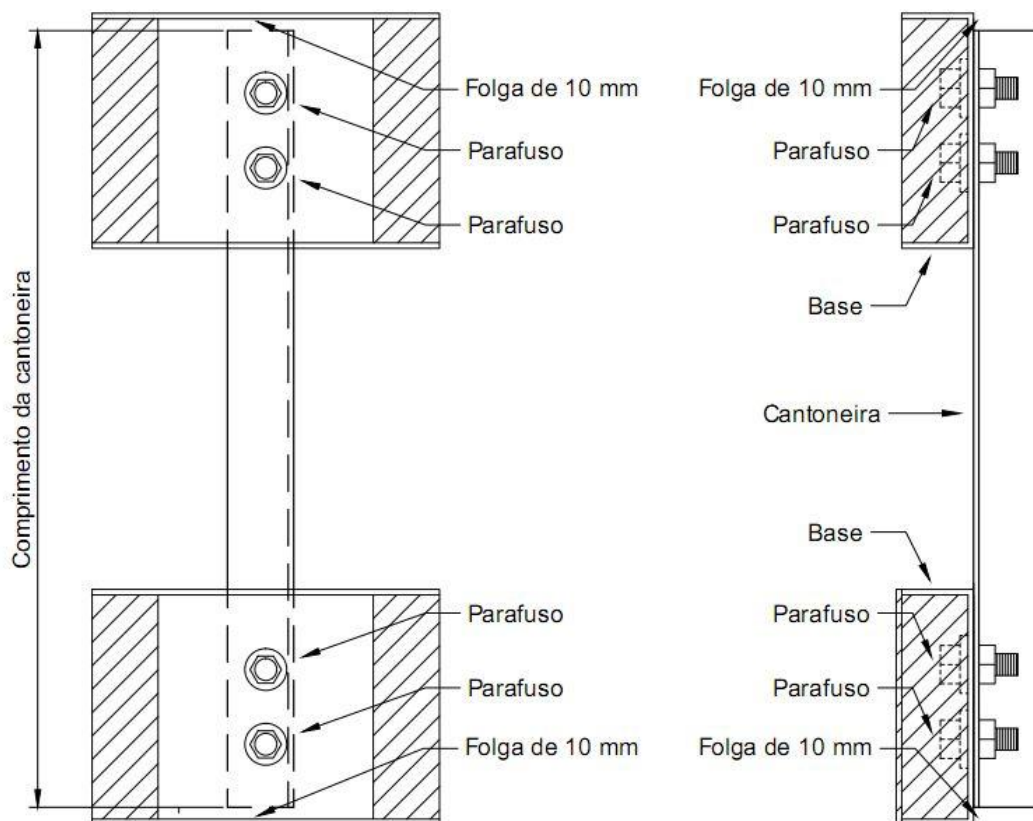


Figura 14 – Ligações parafusadas. Fonte: O autor.

### 3.3 DIMENSIONAMENTO DOS PERFIS

### 3.3.1 Dimensionamento das cantoneiras – item E.1.2

Nesta seção do trabalho está explícito o processo de dimensionamento das cantoneiras submetidas à compressão segundo o item E.1.2 (Seções monossimétricas, exceto o caso de cantoneiras simples previsto em E.1.4) da norma NBR 8800 (2008), anexo E.

Para esse método, admite-se um eixo de simetria inclinado  $45^\circ$  em relação à aba da cantoneira e outro eixo perpendicular a este, caracterizando assim, respectivamente, os eixos de maior e menor momento de inércia.

Os eixos de maior e menor inércia recebem no trabalho, respectivamente, os nomes de eixo “t” e eixo “w”, de acordo com a figura 15.

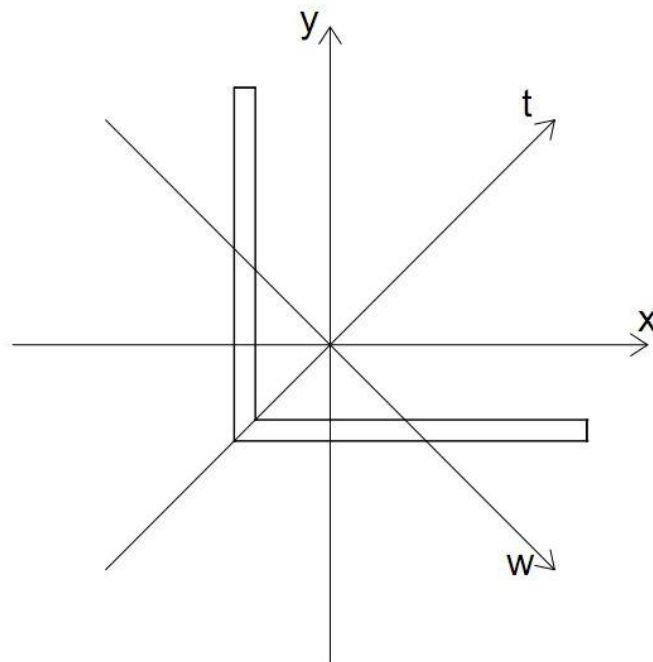


Figura 15 – Eixos de referência em cantoneiras. Fonte: O autor.

- Obtenção das propriedades geométricas do perfil

$$r_w = \sqrt{\frac{I_w}{A_g}} \rightarrow I_w = A_g * r_w^2 = 2,32 \text{ cm}^2 * (0,76 \text{ cm})^2 = 1,34 \text{ cm}^4$$

$$I_x + I_y = I_w + I_t \rightarrow I_t = (I_x + I_y) - I_w = (3,33 \text{ cm}^4 + 3,33 \text{ cm}^4) - 1,34 \text{ cm}^4 = 5,32 \text{ cm}^4$$

$$C_w = 0 \text{ cm}^6 \text{ (para cantoneiras)}$$

$$t_0 = \frac{b\sqrt{2}}{4} = \frac{3,81 \text{ cm} * \sqrt{2}}{4} = 1,347 \text{ cm}$$

$$J = \frac{t_1^3 b}{3} = \frac{(0,318 \text{ cm})^3 * 3,81 \text{ cm}}{3} = 0,0408 \text{ cm}^4$$

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} = \sqrt{(1,17 \text{ cm})^2 + (1,17 \text{ cm})^2 + (1,347 \text{ cm})^2 + (0 \text{ cm})^2}$$

$$= 2,133 \text{ cm}$$

$$G = 0,385E = 0,385 * 2000000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 770000 \text{ kgf/cm}^2$$

### 3.3.1.1 Verificação da flambagem local

$$\frac{b}{t_1} = \frac{3,81 \text{ cm}}{0,318 \text{ cm}} = 11,98$$

$$\left(\frac{b}{t_1}\right)_{lim} = 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,45 \sqrt{\frac{205000 \text{ MPa}}{250 \text{ MPa}}} = 12,88$$

Como  $\left(\frac{b}{t_1}\right)_{lim}$  é maior que a relação largura/espessura da aba da cantoneira, não há flambagem local no perfil e o coeficiente associado à flambagem local  $Q$  assume valor igual a um.

### 3.3.1.2 Cálculo da estabilidade global

O cálculo da instabilidade global é realizado para todos os diferentes índices de esbeltez.

A flambagem por flexão, devido ao menor momento de inércia, é governada pela instabilidade em torno do eixo “w”, ao contrário da flambagem por torção, que se dá sob o eixo de torção “z” e da flambagem por flexotorção, que ocorre primeiramente em torno dos eixos “z” e “t”.

Salienta-se, também, que as condições de vínculo nas extremidades são rótulas perfeitas, sendo, portanto, os coeficientes de flambagem igual a um.

Neste capítulo é apresentado apenas o dimensionamento para a esbeltez 90, estando os demais processos de cálculo apresentados ao final do trabalho, no anexo A.

### a) Perfis com esbeltez igual a 90

- Cálculo de  $N_e$

$$N_{ew} = \frac{\pi^2 EI_w}{(K_w L_w)^2} = \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{kgf}{cm^2} * 1,34 cm^2}{(1 * 68,4 cm)^2} = 5653,56 kgf$$

$$N_{et} = \frac{\pi^2 EI_t}{(K_t L_t)^2} = \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{kgf}{cm^2} * 5,32 cm^2}{(1 * 68,4 cm)^2} = 22445,49 kgf$$

$$\begin{aligned} N_{ez} &= \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \\ &= \frac{1}{(2,133 cm)^2} \\ &\quad * \left[ \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{kgf}{cm^2} * 0 cm^6}{(1 * 68,4 cm)^2} + 770000 \frac{kgf}{cm^2} * 0,0408 cm^4 \right] \\ &= 6905,09 kgf \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{etz} &= \frac{N_{et} + N_{ez}}{2 \left[ 1 - \left( \frac{t_0}{r_0} \right)^2 \right]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 N_{et} N_{ez} \left[ 1 - \left( \frac{t_0}{r_0} \right)^2 \right]}{(N_{et} + N_{ez})^2}} \right] \\ &= \frac{22445,49 kgf + 6905,09 kgf}{2 * \left[ 1 - \left( \frac{1,347 cm}{2,133 cm} \right)^2 \right]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 * 22445,49 kgf * 6905,09 kgf \left[ 1 - \left( \frac{1,347 cm}{2,133 cm} \right)^2 \right]}{(22445,49 kgf + 6905,09 kgf)^2}} \right] \\ &= 6023,86 kgf \end{aligned}$$

Analisando-se a força axial de flambagem para instabilidade por flexão, torção e flexotorção, adota-se a menor delas como a força que governa o dimensionamento.

$$N_e = 5653,56 \text{ kgf}$$

- O índice de esbeltez reduzido é:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{1 * 2,32 \text{ cm}^2 * 2500 \text{ kgf/cm}^2}{5653,56 \text{ kgf}}} = 1,0129 < 1,5$$

- O fator de redução associado à resistência à compressão é:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{1,0129^2} = 0,6509$$

- O esforço normal resistente de cálculo é:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi QA_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6509 * 1 * 2,32 \text{ cm}^2 * 2500 \text{ kgf/cm}^2}{1,1} = 3432,02 \text{ kgf}$$

Como supracitado, o dimensionamento dos demais perfis está exposto no anexo A, ao final desta pesquisa.

### 3.3.2 Dimensionamento das cantoneiras – item E.1.4

Para o modelo de cálculo a seguir, considera-se como referência o item E.1.4 (Cantoneiras simples conectadas por uma aba) do anexo E da norma NBR 8800 (2008).

Esse modelo de dimensionamento considera o momento de inércia e o raio de giração em relação ao centro geométrico, porém passando paralelamente à aba conectada, ou seja, ao contrário do método anterior, que busca uma simetria inclinada 45° em relação às abas.

A verificação da flambagem local foi realizada no item 3.3.4.1 e a mesma não difere em ambos os métodos, visto que os mesmos se referem apenas à estabilidade global.

Da mesma forma que no item anterior, apenas o dimensionamento de uma cantoneira é aqui mostrado, estando o restante no anexo B do trabalho.

- Obtenção das propriedades geométricas do perfil

$$I_{x1} = 3,33 \text{ cm}^4 (\text{tabela 2})$$

$$r_{x1} = 1,17 \text{ cm} (\text{tabela 2})$$

#### a) Perfis com esbeltez igual a 90 – item E.1.4

- Cálculo de  $N_e$

$$\frac{L_{x1}}{r_{x1}} = \frac{68,4 \text{ cm}}{1,17 \text{ cm}} = 58,46 < 80$$

$$K_{x1}L_{x1} = 72r_{x1} + 0,75L_{x1} = 72 * 1,17 \text{ cm} + 0,75 * 68,4 \text{ cm} = 135,54 \text{ cm}$$

$$N_e = \frac{\pi^2 EI_{x1}}{(K_{x1}L_{x1})^2} = \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * 3,33 \text{ cm}^4}{(135,54 \text{ cm})^2} = 3577,99 \text{ kgf}$$

- O índice de esbeltez reduzido é:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{1 * 2,32 \text{ cm}^2 * 2500 \text{ kgf/cm}^2}{3577,99 \text{ kgf}}} = 1,2732 < 1,5$$

- O fator de redução associado à resistência à compressão é:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{1,2732^2} = 0,5074$$

- O esforço normal resistente de cálculo é:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi QA_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,5074 * 1 * 2,32 \text{ cm}^2 * 2500 \text{ kgf/cm}^2}{1,1} = 2675,38 \text{ kgf}$$

Como dito anteriormente, os demais dimensionamentos estão explícitos no anexo B deste trabalho.



### 3.3.3 Resumo das resistências à compressão

A tabela 4 apresenta um resumo das resistências à compressão de cada perfil, em função da esbeltez e do método de dimensionamento.

A carga máxima resultante através do dimensionamento por ambos os métodos foi calculada desconsiderando-se o coeficiente de segurança, o que colocaria a barra em uma situação de Estado Limite Último, o que não é o desejado, pois busca-se a carga no momento da ruptura a fim de compará-la com a força de ruína obtida através dos exames laboratoriais.

Tabela 4 – Esforço normal resistente de cálculo (kgf) em relação à esbeltez e ao método de dimensionamento, desconsiderando-se o coeficiente de segurança.

Esbeltez	Dimensionamento das cantoneiras de acordo com o item E.1.2 – Seções monossimétricas, exceto o caso de cantoneiras simples previsto em E.1.4 – do anexo E da norma brasileira NBR 8800 (2008)	Dimensionamento das cantoneiras de acordo com o item E.1.4 – Cantoneiras simples conectadas por uma aba – do anexo E da norma brasileira NBR 8800 (2008)
90	3946,82	3076,69
100	3568,68	2902,47
110	3192,72	2731,63
120	2826,24	2564,68

Fonte: O autor.

### 3.4 DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS

Admite-se, para o dimensionamento, que o esforço solicitante de cálculo ( $N_{c,Rd}$ ) é a carga máxima de ruptura calculada para a menor esbeltez pelo método menos conservador, ou seja, a força axial resistente de cálculo para esbeltez igual a 90 pelo método E.1.2 é adotada como padrão de resistência para o parafuso. Isso é feito para padronizar a ligação para os diferentes comprimentos de flambagem e também para obter exatamente a mesma vinculação nas extremidades e não haver distorções nos resultados devido à incoerência entre ligações.

Portanto, o esforço axial solicitante de cálculo para os parafusos é:

$$N_{c,sd} = 3946,82 \text{ kgf} \approx 39,47 \text{ kN}$$

Adotando, primeiramente, dois parafusos DIN-ISO 898 Classe 8.8 de 1/2" por extremidade, verifica-se o cisalhamento do parafuso, o rasgamento e o esmagamento do perfil ligado, além da resistência ao deslizamento.

- Verificação do corte no parafuso

Admitindo o cisalhamento passando pela rosca do parafuso – situação mais crítica – a resistência do mesmo é dada por:

$$R_{cd} = 0,4 \frac{A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}}$$

$$A_b = \frac{\pi d_b^2}{4} = \frac{\pi * (1,27 \text{ cm})^2}{4} = 1,27 \text{ cm}^2$$

De acordo com a tabela 1, a tensão de ruptura do parafuso é de 800 MPa (80 kN/cm<sup>2</sup>). O coeficiente de segurança para ruptura, segundo a norma NBR 8800 (2008), é igual a 1,35.

$$R_{cd} = 0,4 \frac{A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} = 0,4 \frac{1,27 \text{ cm}^2 * \frac{80 \text{ kN}}{\text{cm}^2} * 2 \text{ parafusos}}{1,35} = 60,21 \text{ kN} > N_{c,Rd} (39,47 \text{ kN})$$

→ OK

- Verificação da pressão de contato em furos

$$R_d = \frac{1,2 l_f t f_{ub}}{\gamma_{a2}} (\text{rasgamento}) \leq \frac{2,4 d_b t f_{ub}}{\gamma_{a2}} (\text{esmagamento})$$

Segundo a tabela 12 da NBR 8800 (2008), o diâmetro do furo-padrão deve ser igual ao diâmetro do parafuso em milímetros mais 1,5 mm. Portanto:

$$d_f = 12,7 \text{ mm} + 1,5 \text{ mm} = 14,2 \text{ mm}$$

A norma NBR 8800 (2008) dita ainda que o espaçamento mínimo entre os eixos dos furos deve ser três vezes o diâmetro do furo. Sendo assim, o espaçamento furo-furo mínimo é:

$$\text{Esp. mínimo furo - furo} = 3d_f = 3 * 14,2 \text{ mm} = 42,6 \text{ mm} \approx 43 \text{ mm}$$

Pfeil (2010) aponta que a resistência à pressão de contato é o menor valor entre a resistência ao rasgamento ou esmagamento da chapa.

- Rasgamento furo-borda

$l_f$  é a distância da borda do furo à extremidade da chapa ligada, medida paralelamente ao sentido da força. O espaçamento arbitrado entre o eixo do furo e a borda da placa é igual ao espaçamento mínimo furo-furo. Portanto:

$$l_f = 43 \text{ mm} - \frac{14,2 \text{ mm}}{2} = 35,9 \text{ mm}$$

$$R_d = \frac{1,2l_f t f_{ub}}{\gamma_{a2}} = \frac{1,2 * 3,59 \text{ cm} * 0,318 \text{ cm} * 80 \text{ kN/cm}^2}{1,35} = 81,18 \text{ kN}$$

- Rasgamento furo-furo

$$l_f = 43 \text{ mm} - \frac{2 * 14,2 \text{ mm}}{2} = 28,8 \text{ mm}$$

$$R_d = \frac{1,2l_f t f_{ub}}{\gamma_{a2}} = \frac{1,2 * 2,88 \text{ cm} * 0,318 \text{ cm} * 80 \text{ kN/cm}^2}{1,35} = 65,13 \text{ kN}$$

- Esmagamento

$$R_d = \frac{2,4d_b t f_{ub}}{\gamma_{a2}} = \frac{2,4 * 1,27 \text{ cm} * 0,318 \text{ cm} * 80 \text{ kN/cm}^2}{1,35} = 57,44 \text{ kN}$$

Após a verificação de rasgamento e esmagamento, adota-se o menor valor como a resistência a pressão de contato. Assim sendo:

$$R_d = 57,44 \text{ kN} > N_{c,Rd} (39,47 \text{ kN}) \rightarrow OK$$

Portanto, diz-se que a ligação está dimensionada e aceita para tal carregamento.

Importante lembrar que, apesar dos parafusos utilizados serem de alta resistência, a ligação por atrito não é considerada. Isso pelo fato da não necessidade de maior resistência, visto que a carga resistente já é superior à carga atuante.

A ligação segue um gabarito de furação, fornecido por Bellei (2010), que indica a distância do eixo do furo à borda da cantoneira, medida transversalmente ao sentido do carregamento, a qual, segundo o autor, deve ser de 22 milímetros.

Além disso, a NBR 8800 (2008) indica distâncias mínimas do centro de um furo à borda do perfil, o que é função do diâmetro do parafuso e do acabamento do perfil metálico. Para parafusos de  $\frac{1}{2}$ " e cantoneira com borda laminada essa distância é de 19 mm.

A figura 16 detalha a vinculação perfil-base nas extremidades.

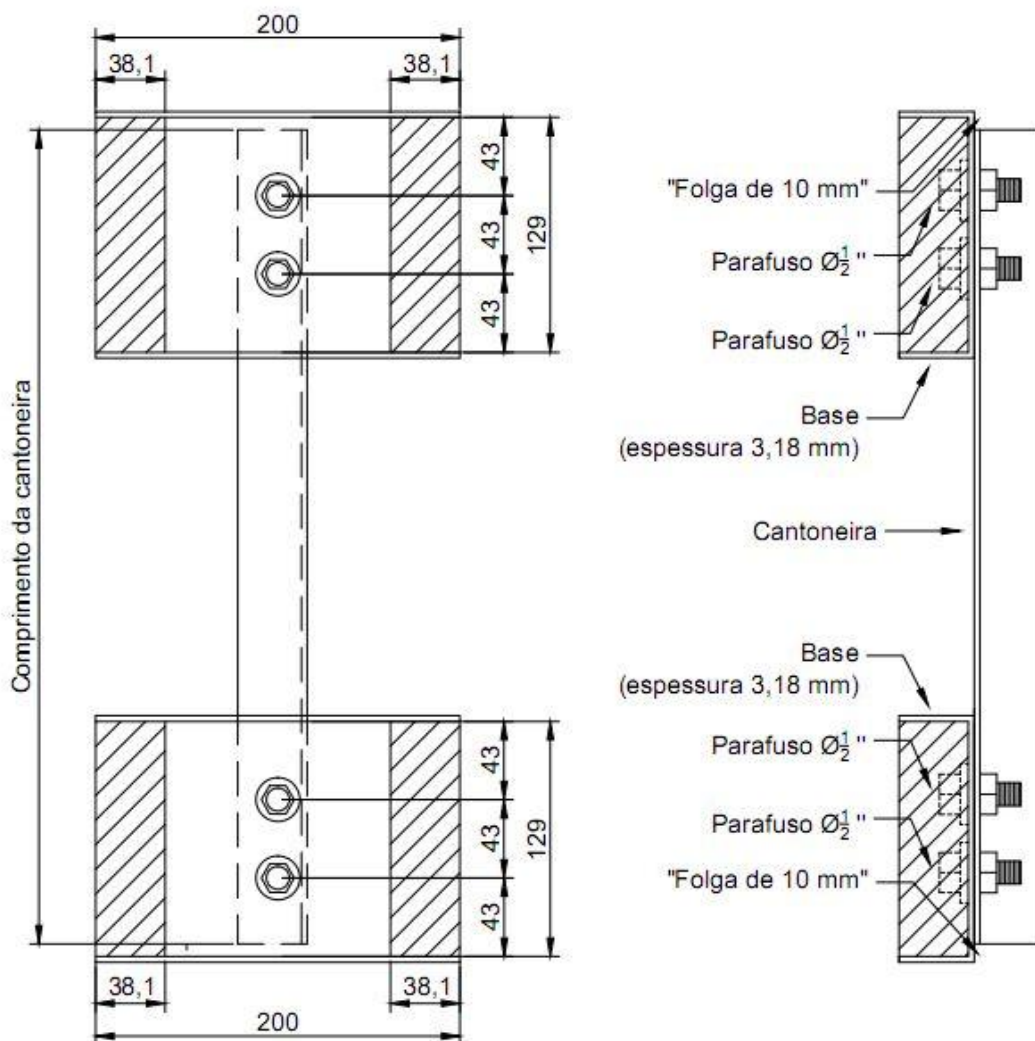


Figura 16 - Detalhamento das ligações parafusadas. Dimensões não mostradas em milímetros. Fonte: O autor.

#### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios laboratoriais de compressão em uma aba nas cantoneiras estudadas, vistos na forma de tabelas, gráficos e figuras. Além disso, é feita uma discussão referente a ambos os processos de cálculo e as cargas de ruptura obtidas através dos ensaios supracitados.

A figura 17 mostra a realização dos ensaios de compressão em uma aba nas cantoneiras pesquisadas.



Figura 17 – Ensaio de compressão nas cantoneiras conectadas por uma aba. Fonte: O autor.

A figura 18 ilustra, de forma mais aproximada, a instalação das bases magnéticas e LVDT's para medição dos deslocamentos horizontais devido à flambagem dos perfis.



Figura 18 – Colocação das bases magnéticas e LVDT's. Fonte: O autor.

#### **4.1 CARGA DE RUPTURA**

Os ensaios de compressão foram realizados no laboratório de Materiais e Construção da UNIPAMPA e obtiveram os resultados, para os quatro índices de esbeltez e os cinco corpos de prova, explícitos na tabela 5.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de compressão nas cantoneiras conectadas por uma aba (kgf).

Esbeltez/CP	1	2	3	4	5	Média	CV (%)
90	1797,73	1709,44	1773,01	1499,29	1402,16	1636,33	10,75
100	1561,10	1372,14	1721,80	1395,10	1423,35	1494,70	9,81
110	1501,05	1624,67	1591,12	1516,95	1380,97	1522,95	6,20
120	1280,31	1336,82	1296,2	1184,95	1336,82	1287,02	4,84

Fonte: O autor.

A carga de ruptura foi calculada de acordo com os itens E.1.2 e E.1.4 do anexo E da norma NBR 8800 (2008). Ambos os processos de cálculo, somados aos resultados médios das cargas de ruptura obtidos através dos ensaios laboratoriais, formam a figura 19, que, para os quatro índices de esbeltez, retornam os valores das referidas forças.

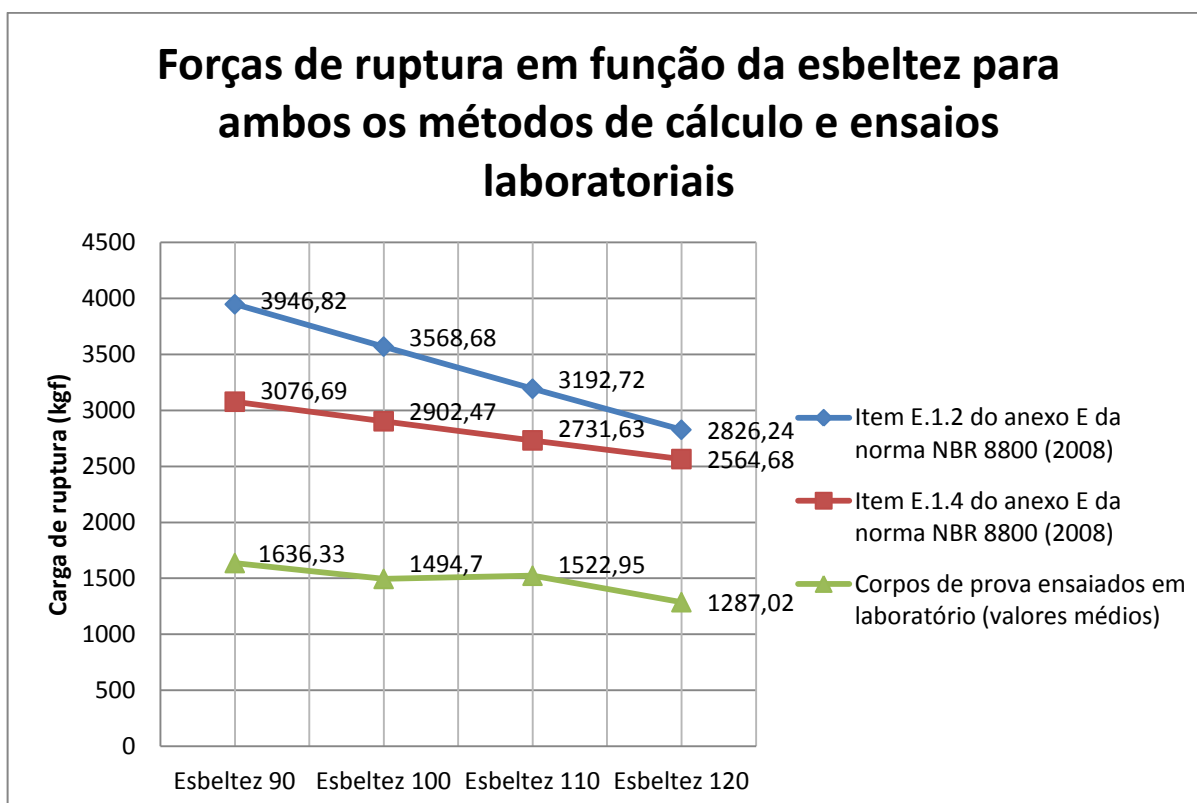


Figura 19 – Curvas carga de ruptura *versus* esbeltez. Fonte: O autor.

Verificou-se, ainda, a possível existência de valores espúrios nos resultados dos ensaios de compressão nas cantoneiras através do critério de Chauvenet.

Decidiu-se analisar essa possibilidade em virtude da variação dos resultados. Os cálculos informaram não haver nenhum valor espúrio e conseqüentemente os valores de média não se alteram. Além disso, o coeficiente de variação, dado na tabela 5, mostra que a máxima variação nos resultados é de 10,75%, tendo ocorrido na maior esbeltez.

Nas curvas do gráfico apontadas na figura 19 nota-se que nos métodos teóricos de dimensionamento ocorreu uma aproximação das mesmas, sendo que em algum momento, para uma esbeltez pouco superior a 120, há a tendência de ocorrer o encontro dessas curvas e então o modelo do item E1.4 que, antes mais conservador, agora torna-se mais ousado.

Observa-se que a resistência de cálculo por ambos os métodos de dimensionamento foi maior que a resistência atingida nos ensaios laboratoriais, sendo que o modelo indicado pela norma (item E.1.4 – Cantoneiras simples conectadas por uma aba – do anexo E da norma brasileira NBR 8800 (2008)) mais se aproximou, apontando que, segundo os ensaios desta pesquisa, o dimensionamento através desse método é mais aproximado.

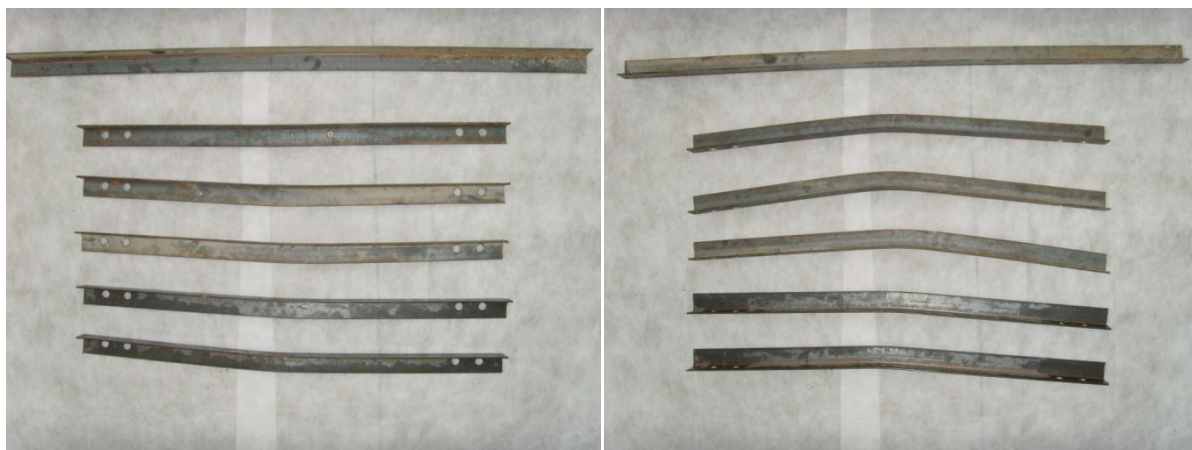
No caso das esbeltezes intermediárias ocorreu que a maior delas teve uma leve superioridade na resistência em relação à menor, ou seja, a barra de segundo maior comprimento, ao contrário do esperado, resistiu mais que a barra de terceiro maior comprimento. O que de certa forma explica isso é o fato das esbeltezes serem muito aproximadas, variando o seu comprimento em apenas 7,6 cm, sabendo que a variação dos resultados foi alta em comparação a essa diferença no comprimento. Todavia, a lógica mostra que não está correto, devendo a resistência ser inversamente proporcional à esbeltez.

As figuras a seguir (figuras 20 a e 20 b, 21 a e 21 b, 22 a e 22 b e 23 a e 23 b) mostram as cantoneiras rompidas por flambagem após a realização dos ensaios. Ao lado das mesmas, uma barra maior em seu estado original, cuja qual tem o objetivo de facilitar a visualização entre uma barra não deformada e outra deformada através dos ensaios anteriormente citados.

Nota-se nas fotografias que uma direção sofreu maior deslocamento horizontal e que esse maior movimento ocorreu paralelamente à aba conectada, cujo qual será melhor explicado através de gráficos e figuras no item 4.2. A posição



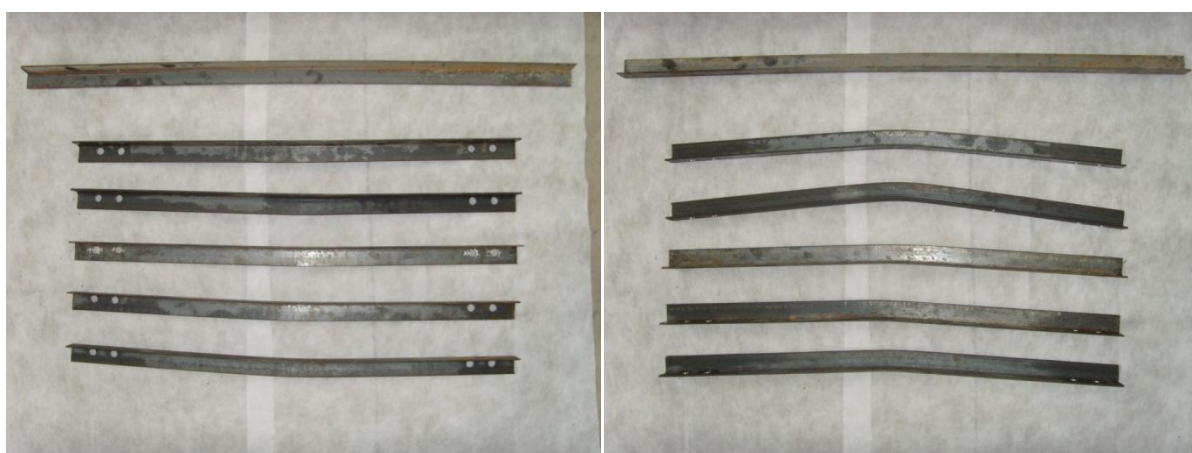
que menos deslocou recebe o nome de *Lado A*, enquanto a posição contrária, ou seja, a que mais sofreu deformação, recebe o nome de *Lado B*.



a)

b)

Figura 20 – (a) Esbeltez 90, lado A; (b) Esbeltez 90, lado B. Fonte: O autor.



a)

b)

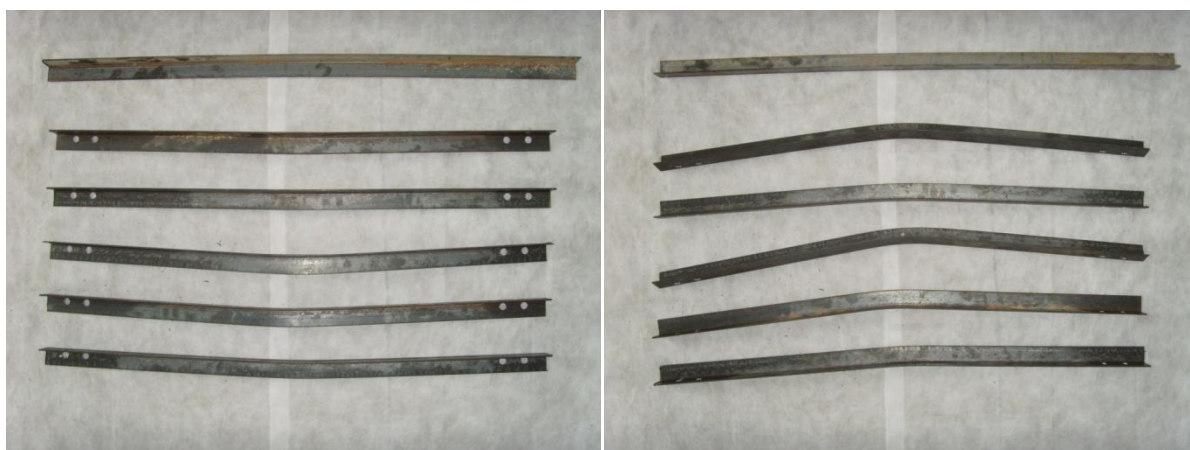
Figura 21 – (a) Esbeltez 100, lado A; (b) Esbeltez 100, lado B. Fonte: O autor.



a)

b)

Figura 22 – (a) Esbeltez 110, lado A; (b) Esbeltez 110, lado B. Fonte: O autor.



a)

b)

Figura 23 – (a) Esbeltez 120, lado A; (b) Esbeltez 120, lado B. Fonte: O autor.

## 4.2 DESLOCAMENTOS LATERAIS

Como citado anteriormente, através de LVDT's (Linear Variable Differential Transformer), mediu-se o deslocamento lateral do perfil devido à flambagem na metade do comprimento da cantoneira. Os mesmos foram fixados em bases magnéticas, como mostra a figura 18.

As figuras 24 e 25 apresentam as médias dos deslocamentos horizontais em função do carregamento para, respectivamente, a aba conectada e a aba não conectada.

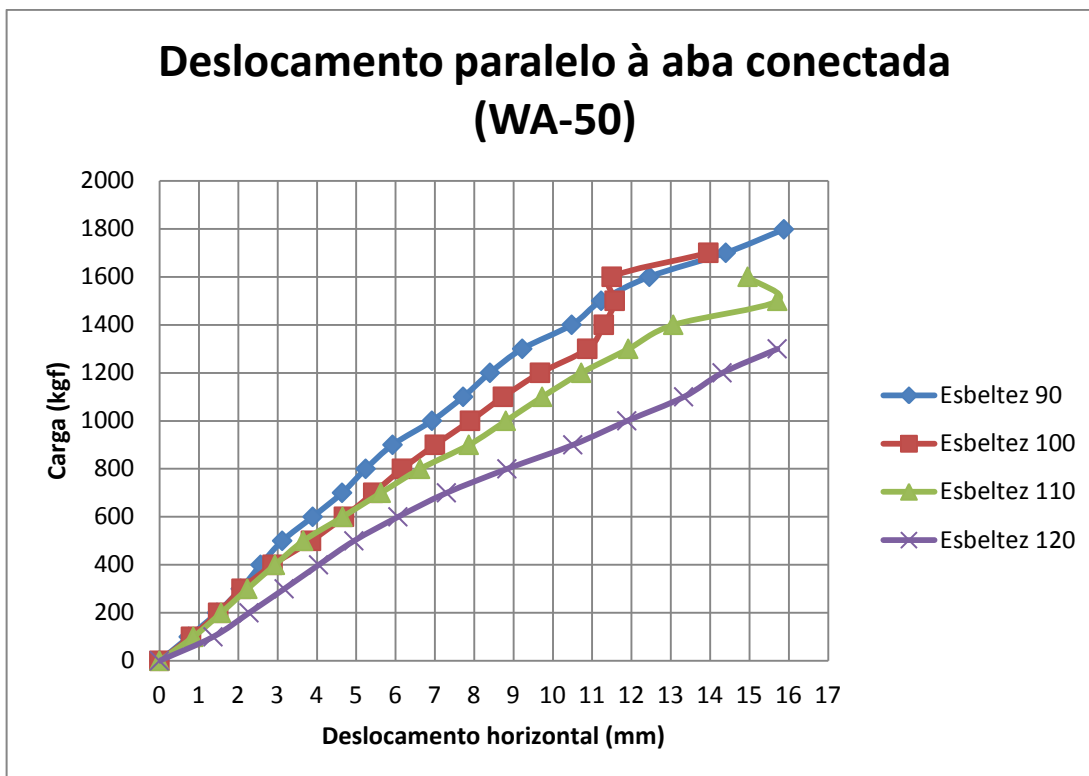


Figura 24 – Deslocamentos horizontais paralelos à aba conectada. Fonte: O autor.

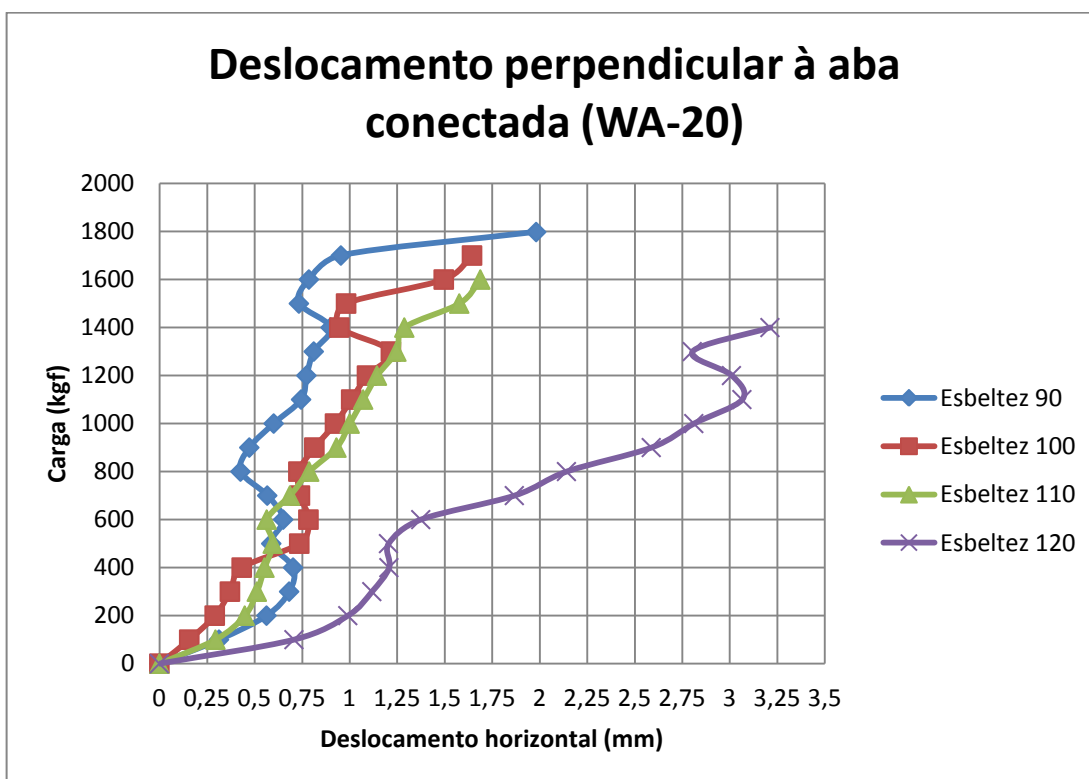


Figura 25 – Deslocamentos horizontais perpendiculares à aba conectada. Fonte: O autor.

Observando ambos os gráficos das figuras 24 e 25, percebe-se que o deslocamento horizontal no centro do perfil ocorreu mais significativamente na aba conectada para todos os índices de esbeltez.

Nota-se que em ambas as curvas, para o mesmo carregamento, o deslocamento lateral é maior em esbeltezes maiores. Explicando e exemplificando melhor isso, percebe-se que, no caso da figura 24, para esbeltez 90 a carga que proporcionou um deslocamento de aproximadamente 16 mm foi de 1800 kgf e para esbeltez 120 e mesmo deslocamento a força aplicada foi de 1300 kgf.

Além disso, observando-se as curvas carga *versus* deslocamento horizontal, nota-se que a flambagem na aba não conectada sofreu maior oscilação em relação à aba ligada, ou seja, o deslocamento não apresentou um elevado grau de linearidade como na aba perpendicular a esta, estando, portanto, a barra sujeita a deformações mais descontínuas na aba não ligada.

Como foram realizados cinco ensaios para cada esbeltez, apenas como medida de exemplificação traçou-se a tabela 6, que apresenta os deslocamentos laterais devido à flambagem das cantoneiras em função da esbeltez e da carga de ruptura para a cantoneira que obteve maior resistência para cada índice de esbeltez. Na tabela a seguir denomina-se D1 o deslocamento paralelo à aba conectada e D2 o deslocamento perpendicular à aba conectada.

Tabela 6 – Deslocamentos laterais para o ensaio que obteve maior carga resistente em função da esbeltez e da carga de ruptura para cada índice de esbeltez.

Esbeltez	Carga de ruptura (kgf)	D1 (mm)	D2 (mm)
90	1797,73	15,8813	1,9825
100	1718,27	15,2063	1,8013
110	1624,67	17,5125	2,0837
120	1336,82	18,1188	3,2125

Fonte: O autor.

As figuras 26, 27, 28 e 29, baseadas na tabela 6 mostram, respectivamente para as esbeltezes 90, 100, 110 e 120, a seção das cantoneiras em estado original e em estado deformado, exatamente no momento da ruptura.

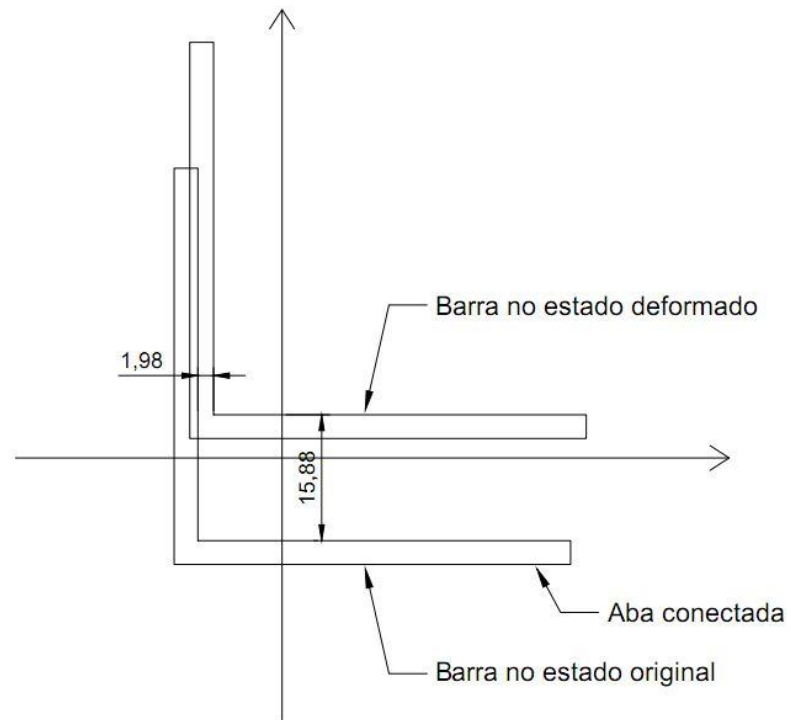


Figura 26 – Cantoneira no estado original e estado deformado para esbelteza 90. Fonte: O autor.

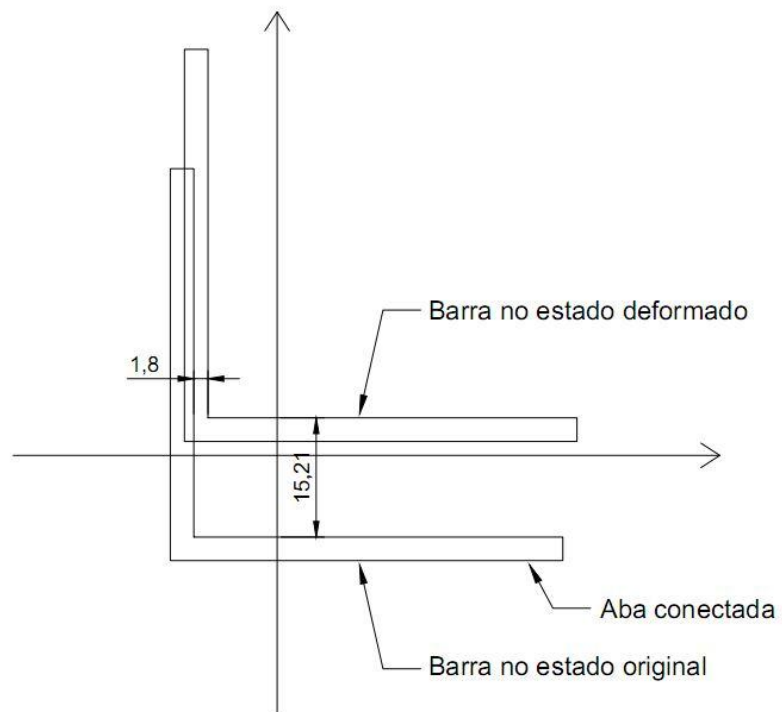


Figura 27 - Cantoneira no estado original e estado deformado para esbelteza 100. Fonte: O autor.

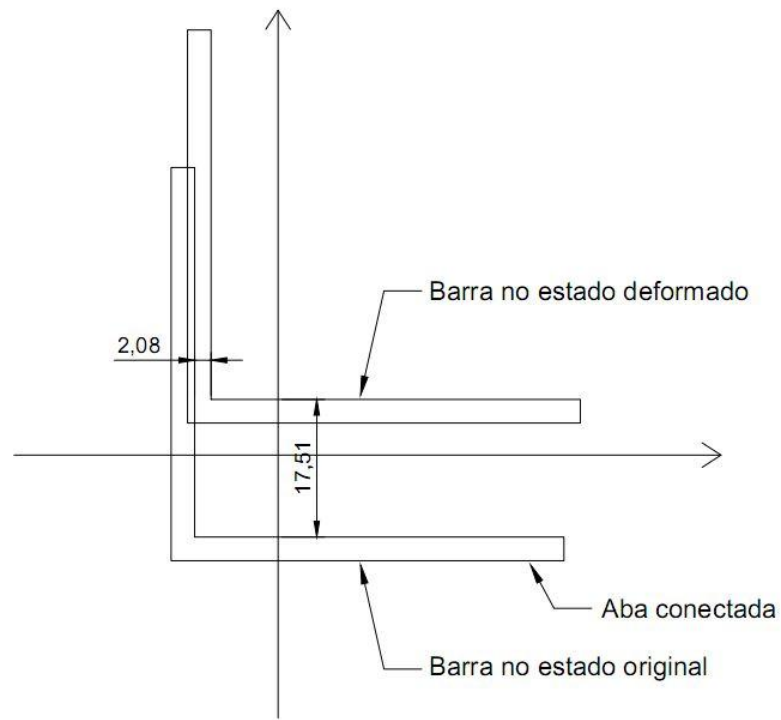


Figura 28 – Cantoneira no estado original e estado deformado para esbelteza 110. Fonte: O autor.

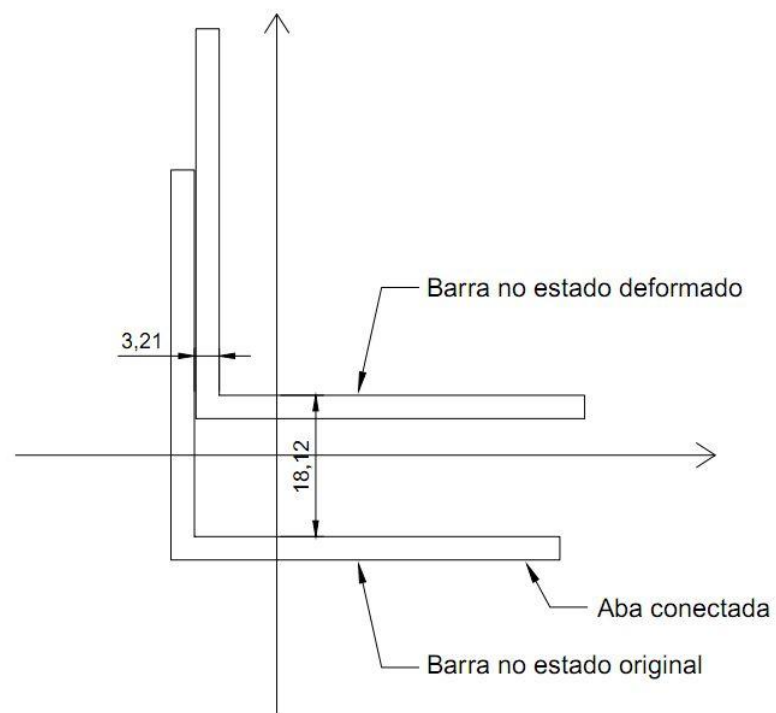


Figura 29 – Cantoneira no estado original estado deformado para esbelteza 120. Fonte: O autor.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo do trabalho são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir do dimensionamento das cantoneiras considerando-se ambos os métodos de cálculo citados anteriormente – Seções monossimétricas, exceto o caso de cantoneiras simples e cantoneiras simples conectadas por uma aba – cujos quais estão explícitos no anexo E da norma brasileira NBR 8800 (2008). Além do mais, mostra-se também as conclusões obtidas de acordo com o programa experimental de ensaios de compressão em cantoneiras conectadas por uma aba e a comparação entre ambos os resultados de cálculo e laboratoriais.

Além disso, na parte subsequente são efetuadas sugestões para trabalhos futuros, servindo o estudo atual como material de embasamento para pesquisas que poderão visar o aprofundamento sobre o tema estudado.

### **5.1 CONCLUSÕES**

O crescimento no uso das estruturas de aço em pavilhões industriais, edifícios comerciais e residenciais, além de torres de transmissão de energia elétrica, mezaninos, entre outros atrai trabalhos de pesquisa sobre o desempenho estrutural, desempenho perante situações de sinistros, avaliação do custo/benefício e rapidez de execução da estrutura. É pensando nisso que o presente trabalho buscou analisar o dimensionamento e verificar as cargas de ruptura obtidas em experiências laboratoriais, visando sempre o aumento da qualidade dos produtos e a redução dos custos.

O dimensionamento, para as cantoneiras estudadas nesta pesquisa, apresentou resultados distintos para cada um dos métodos. Como foram estudadas diferentes esbeltezes, a diferença percentual na carga de ruptura variou de forma inversamente proporcional ao aumento da esbeltez, porém mantendo sempre o item E.1.4 do anexo E da norma NBR 8800 (2008) (Cantoneiras simples conectadas por uma aba) como mais conservador, pelo menos até a esbeltez máxima trabalhada (esbeltez 120). Esse modelo de cálculo, ao contrário do item E.1.2 do anexo E da norma NBR 8800 (2008) (Seções monossimétricas, exceto o caso de cantoneiras

simples previsto em E.1.4), considera a cantoneira como submetida à compressão ligada por apenas uma aba.

As barras ensaiadas em laboratório neste trabalho apresentaram, para todos os índices de esbeltez, resultados abaixo dos obtidos a partir do dimensionamento por ambos os modelos de cálculo. Os valores ensaiados foram significativamente menores, entretanto o método proposto pela norma que considera a cantoneira submetida à compressão ligada por uma aba obteve maior satisfação, indicando, portanto, que para esse estudo, este é mais aproximado à realidade do que o modelo utilizado por projetistas que considera a seção com um eixo de simetria inclinado  $45^\circ$ , flambando a essa inclinação em torno do eixo de menor inércia.

A determinação dos deslocamentos horizontais devido à flambagem nas cantoneiras ensaiadas foi realizada através de LVDT's (Linear Variable Differential Transformer) instalados perpendicularmente a cada uma das abas. O módulo do deslocamento foi levemente proporcional à esbeltez, aumentando de acordo com o aumento do comprimento da barra.

Ainda em referência à medição dos deslocamentos horizontais na metade do comprimento da barra, observou-se nos experimentos que o desvio predominante foi sempre paralelo à aba conectada, sendo o movimento da aba não solidarizada à base bastante inferior a esse, o que demonstrou e confirmou que o modelo de cálculo que considera a cantoneira como ligada por uma aba tem maior aproximação com o obtido em laboratório.

Por fim, entende-se que esta pesquisa proporcionou um maior conhecimento a respeito da flambagem em cantoneiras conectadas por uma aba, onde a esbeltez é fator determinante na resistência a esse tipo de instabilidade e o modelo de cálculo interfere significativamente no dimensionamento e detalhamento das barras adotadas.

## **5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com o intuito de dar sequência a essa pesquisa, sugerem-se os seguintes trabalhos:



- Realizar modelagem numérica de cantoneiras ligadas por uma aba e submetidas à compressão a fim de obter a carga de ruptura e o modelo de flambagem através de métodos numéricos/computacionais;
- Avaliar a influência da velocidade de compressão em cantoneiras conectadas por uma aba na resistência à flambagem da peça;
- Realizar ensaios de compressão centrada em cantoneiras de abas iguais e comparar os resultados com os obtidos neste estudo;
- Avaliar a resistência à flambagem em cantoneiras conectadas por solda em uma aba;
- Determinar, através de ensaios experimentais, além de modelos teóricos e numéricos, a carga de ruptura à flambagem para peças mais esbeltas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### 6.1 BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800:2008 – Projeto de estrutura de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios;

BELLEI, Ildony H. Edifícios industriais em aço: projeto e cálculo. 6ªed. rev. e ampl. – São Paulo: Pini, 2010;

Cantoneira de Abas Iguais Gerdau. Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-por-aplicacao-detalle-produto.aspx?familia=245>>. Acesso em: 04 de novembro de 2011.

CHODRAUI, Gustavo Monteiro de Barros. Análise teórica e experimental de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. – São Carlos, 2006.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008. 8ªed. Rio de Janeiro, LTC 2010;

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. Estruturas de aço: Dimensionamento Prático. 7ªed. Rio de Janeiro, LTC, 2000;

PINHEIRO, Antônio Carlos F. B. Estruturas metálicas: cálculos, detalhes, exercícios e projetos. – São Paulo: Edgard Blucher, 2005;

SOUZA, Alex Sander C. Dimensionamento de elementos estruturais em aço segundo a NBR 8800:2008. – São Carlos: EdUFSCar, 2010.

### 6.2 BIBLIOGRAFIAS COMPLEMENTARES

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2009). ASTM E9: Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. Philadelphia;

CARVALHO, Paulo Roberto M. [et al] Curso básico de perfis de aço formados a frio. – Porto Alegre, 2004.

## ANEXOS

### Anexo A

#### b) Perfis com esbeltez igual a 100

- Cálculo de  $N_e$

$$N_{ew} = \frac{\pi^2 EI_w}{(K_w L_w)^2} = \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{kgf}{cm^2} * 1,34 cm^2}{(1 * 76 cm)^2} = 4579,39 kgf$$

$$N_{et} = \frac{\pi^2 EI_t}{(K_t L_t)^2} = \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{kgf}{cm^2} * 5,32 cm^2}{(1 * 76 cm)^2} = 18180,85 kgf$$

$$\begin{aligned} N_{ez} &= \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \\ &= \frac{1}{(2,133 cm)^2} \\ &\quad * \left[ \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{kgf}{cm^2} * 0 cm^6}{(1 * 79,8 cm)^2} + 770000 \frac{kgf}{cm^2} * 0,0408 cm^4 \right] \\ &= 6905,09 kgf \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{etz} &= \frac{N_{et} + N_{ez}}{2 \left[ 1 - \left( \frac{t_0}{r_0} \right)^2 \right]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 N_{et} N_{ez} \left[ 1 - \left( \frac{t_0}{r_0} \right)^2 \right]}{(N_{et} + N_{ez})^2}} \right] \\ &= \frac{18180,85 kgf + 6905,09 kgf}{2 * \left[ 1 - \left( \frac{1,347 cm}{2,133 cm} \right)^2 \right]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 * 18180,85 kgf * 6905,09 kgf \left[ 1 - \left( \frac{1,347 cm}{2,133 cm} \right)^2 \right]}{(18180,85 kgf + 6905,09 kgf)^2}} \right] \\ &= 5814,72 kgf \end{aligned}$$

$$N_e = 4579,39 kgf$$

- O índice de esbeltez reduzido é:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{1 * 2,32 \text{ cm}^2 * 2500 \text{ kgf/cm}^2}{4579,39 \text{ kgf}}} = 1,1254 < 1,5$$

- O fator de redução associado à resistência à compressão é:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{1,1254^2} = 0,5885$$

- O esforço normal resistente de cálculo é:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,5885 * 1 * 2,32 \text{ cm}^2 * 2500 \text{ kgf/cm}^2}{1,1} = 3103,20 \text{ kgf}$$

### c) Perfis com esbeltez igual a 110

- Cálculo de  $N_e$

$$N_{ew} = \frac{\pi^2 EI_w}{(K_w L_w)^2} = \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * 1,34 \text{ cm}^2}{(1 * 83,6 \text{ cm})^2} = 3784,62 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{\pi^2 EI_t}{(K_t L_t)^2} = \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * 5,32 \text{ cm}^2}{(1 * 83,6 \text{ cm})^2} = 15025,50 \text{ kgf}$$

$$\begin{aligned} N_{ez} &= \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \\ &= \frac{1}{(2,133 \text{ cm})^2} \\ &\quad * \left[ \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * 0 \text{ cm}^6}{(1 * 91,2 \text{ cm})^2} + 770000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * 0,0408 \text{ cm}^4 \right] \\ &= 6905,09 \text{ kgf} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{etz} &= \frac{N_{et} + N_{ez}}{2 \left[ 1 - \left( \frac{t_0}{r_0} \right)^2 \right]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{et}N_{ez} \left[ 1 - \left( \frac{t_0}{r_0} \right)^2 \right]}{(N_{et} + N_{ez})^2}} \right] \\
&= \frac{15025,50 \text{ kgf} + 6905,09 \text{ kgf}}{2 * \left[ 1 - \left( \frac{1,347 \text{ cm}}{2,133 \text{ cm}} \right)^2 \right]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 * 15025,50 \text{ kgf} * 6905,09 \text{ kgf} \left[ 1 - \left( \frac{1,347 \text{ cm}}{2,133 \text{ cm}} \right)^2 \right]}{(15025,50 \text{ kgf} + 6905,09 \text{ kgf})^2}} \right] \\
&= 5586,51 \text{ kgf}
\end{aligned}$$

$$N_e = 3784,62 \text{ kgf}$$

- O índice de esbeltez reduzido é:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{1 * 2,32 \text{ cm}^2 * 2500 \text{ kgf/cm}^2}{3784,62 \text{ kgf}}} = 1,2379 < 1,5$$

- O fator de redução associado à resistência à compressão é:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{1,2379^2} = 0,5265$$

- O esforço normal resistente de cálculo é:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi QA_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,5265 * 1 * 2,32 \text{ cm}^2 * 2500 \text{ kgf/cm}^2}{1,1} = 2776,28 \text{ kgf}$$

#### d) Perfis com esbeltez igual a 120

- Cálculo de  $N_e$

$$N_{ew} = \frac{\pi^2 EI_w}{(K_w L_w)^2} = \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * 1,34 \text{ cm}^2}{(1 * 91,2 \text{ cm})^2} = 3180,13 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{\pi^2 EI_t}{(K_t L_t)^2} = \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{kgf}{cm^2} * 5,32 cm^2}{(1 * 91,2 cm)^2} = 12625,59 kgf$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$$

$$= \frac{1}{(2,133 cm)^2}$$

$$* \left[ \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{kgf}{cm^2} * 0 cm^6}{(1 * 102,6 cm)^2} + 770000 \frac{kgf}{cm^2} * 0,0408 cm^4 \right]$$

$$= 6905,09 kgf$$

$$N_{etz} = \frac{N_{et} + N_{ez}}{2 \left[ 1 - \left( \frac{t_0}{r_0} \right)^2 \right]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{et}N_{ez} \left[ 1 - \left( \frac{t_0}{r_0} \right)^2 \right]}{(N_{et} + N_{ez})^2}} \right]$$

$$= \frac{12625,59 kgf + 6905,09 kgf}{2 * \left[ 1 - \left( \frac{1,347 cm}{2,133 cm} \right)^2 \right]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 * 12625,59 kgf * 6905,09 kgf \left[ 1 - \left( \frac{1,347 cm}{2,133 cm} \right)^2 \right]}{(12625,59 kgf + 6905,09 kgf)^2}} \right]$$

$$= 5342,34 kgf$$

$$N_e = 3180,13 kgf$$

- O índice de esbeltez reduzido é:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{1 * 2,32 cm^2 * 2500 kgf/cm^2}{3180,13 kgf}} = 1,3505 < 1,5$$

- O fator de redução associado à resistência à compressão é:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{1,3505^2} = 0,4661$$

- O esforço normal resistente de cálculo é:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,4661 * 1 * 2,32 \text{ cm}^2 * 2500 \text{ kgf/cm}^2}{1,1} = 2457,60 \text{ kgf}$$

## Anexo B

### b) Perfis com esbeltez igual a 100

- Cálculo de  $N_e$

$$\frac{L_{x1}}{r_{x1}} = \frac{76 \text{ cm}}{1,17 \text{ cm}} = 64,96 < 80$$

$$K_{x1}L_{x1} = 72r_{x1} + 0,75L_{x1} = 72 * 1,17 \text{ cm} + 0,75 * 76 \text{ cm} = 141,24 \text{ cm}$$

$$N_e = \frac{\pi^2 EI_{x1}}{(K_{x1}L_{x1})^2} = \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * 3,33 \text{ cm}^4}{(141,24 \text{ cm})^2} = 3295,02 \text{ kgf}$$

- O índice de esbeltez reduzido é:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{1 * 2,32 \text{ cm}^2 * 2500 \text{ kgf/cm}^2}{3295,02 \text{ kgf}}} = 1,3267 < 1,5$$

- O fator de redução associado à resistência à compressão é:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{1,3267^2} = 0,4787$$

- O esforço normal resistente de cálculo é:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi QA_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,4645 * 1 * 2,32 \text{ cm}^2 * 2500 \text{ kgf/cm}^2}{1,1} = 2523,89 \text{ kgf}$$

### c) Perfis com esbeltez igual a 110

- Cálculo de  $N_e$

$$\frac{L_{x1}}{r_{x1}} = \frac{83,6 \text{ cm}}{1,17 \text{ cm}} = 71,45 < 80$$

$$K_{x1}L_{x1} = 72r_{x1} + 0,75L_{x1} = 72 * 1,17 \text{ cm} + 0,75 * 83,6 \text{ cm} = 146,94 \text{ cm}$$



$$N_e = \frac{\pi^2 EI_{x1}}{(K_{x1} L_{x1})^2} = \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{kgf}{cm^2} * 3,33 cm^4}{(146,94 cm)^2} = 3044,35 kgf$$

- O índice de esbeltez reduzido é:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{1 * 2,32 cm^2 * 2500 kgf/cm^2}{3044,35 kgf}} = 1,3803 < 1,5$$

- O fator de redução associado à resistência à compressão é:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{1,3803^2} = 0,4505$$

- O esforço normal resistente de cálculo é:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi QA_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,4505 * 1 * 2,32 cm^2 * 2500 kgf/cm^2}{1,1} = 2375,33 kgf$$

#### d) Perfis com esbeltez igual a 120

- Cálculo de  $N_e$

$$\frac{L_{x1}}{r_{x1}} = \frac{91,2 cm}{1,17 cm} = 77,95 < 80$$

$$K_{x1} L_{x1} = 72 r_{x1} + 0,75 L_{x1} = 72 * 1,17 cm + 0,75 * 91,2 cm = 152,64 cm$$

$$N_e = \frac{\pi^2 EI_{x1}}{(K_{x1} L_{x1})^2} = \frac{\pi^2 * 2000000 \frac{kgf}{cm^2} * 3,33 cm^4}{(152,64 cm)^2} = 2821,22 kgf$$

- O índice de esbeltez reduzido é:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{1 * 2,32 cm^2 * 2500 kgf/cm^2}{2821,22 kgf}} = 1,4338 < 1,5$$

- O fator de redução associado à resistência à compressão é:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{1,4338^2} = 0,4230$$

- O esforço normal resistente de cálculo é:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,4230 * 1 * 2,32 \text{ cm}^2 * 2500 \text{ kgf/cm}^2}{1,1} = 2230,16 \text{ kgf}$$