

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**Iago Belarmino Lucena**

**Aperfeiçoamento de programa para verificação de perfis de aço sob esforços usuais de projeto (Eiffel)**

Trabalho de Graduação

2017

**Engenharia Civil-Aeronáutica**

**IAGO BELARMINO LUCENA**

**APERFEIÇOAMENTO DE PROGRAMA PARA  
VERIFICAÇÃO DE PERFIS DE AÇO SOB ESFORÇOS  
USUAIS DE PROJETO (EIFFEL)**

Orientador

Francisco Alex Correia Monteiro (ITA)

**ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA**

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2017

## Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação

### Divisão de Informação e Documentação

Lucena, Iago Belarmino

Aperfeiçoamento de programa para verificação de perfis de aço sob esforços usuais de projeto (*Eiffel*)

São José dos Campos, 2017.

57f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2017.

Orientador: Prof. Francisco Alex Correia Monteiro, MSc

1. Estruturas de aço, 2. Laminados, 3. Compressão, 4. Estruturas metálicas, 5. Aços, 6. Engenharia estrutural I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, II. Título

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LUCENA, Iago Belarmino. **Aperfeiçoamento de programa para verificação de perfis de aço sob esforços usuais de projeto (*Eiffel*)**. 2017. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Iago Belarmino Lucena

TÍTULO DO TRABALHO: Aperfeiçoamento de programa para verificação de perfis de aço sob esforços usuais de projeto (*Eiffel*)

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação/2017

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



Iago Belarmino Lucena

Rua H8B 236 – Campus do CTA

12228-461, São José dos Campos - SP

# **APERFEIÇOAMENTO DE PROGRAMA PARA VERIFICAÇÃO DE PERFIS DE AÇO SOB ESFORÇOS USUAIS DE PROJETO (*EIFFEL*)**

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Iago Belarmino Lucena

Autor



Prof. MSc Francisco Alex Correia Monteiro (ITA)

Orientador



Prof. Ph.D. Eliseu Lucena Neto (ITA)

Relator



Dedico este trabalho a minha família, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado nas decisões que tomei na vida.

## Agradecimentos

Agradeço ao ser superior que nos olha.

Aos meus pais, Bosco e Fátima, que me deram o suporte emocional, educacional e financeiro durante minha vida e me incentivaram pelo o caminho dos estudos. Ao meus tios e tias, que sempre me acompanharam de perto.

À minha irmã Iana, por me receber em Fortaleza sempre com as melhores comidas do mundo.

Ao tio Valdemar e a tia Rita, por me acolherem desde o primeiro momento em que cheguei em São José dos Campos.

À Caroline, por me dar suporte, amor e carinho durante parte dessa jornada.

Ao Maurício Ribeiro e ao Felipe Pineschi, pelo auxílio prestado na elaboração do programa.

A CIVIL 16 e 17, por estarmos juntos nos momentos alegres e de dificuldades nesse curso.

Aos meus amigos do ANGAV, por tornar o ambiente mais leve e compartilhar as horas de desespero.

Ao professor orientador Alex, pelos ensinamentos durante o curso e por ter se demonstrado um verdadeiro amigo durante o ITA.

"Os erros sempre são os maiores aprendizados. Obrigado ITA."



## **Resumo**

O trabalho consiste no aperfeiçoamento do programa Eiffel, ferramenta de uso educacional no estudo de estruturas metálicas, desenvolvido no ITA por Felipe de Araújo Pineschi Teixeira em 2015 como seu trabalho de graduação, onde foi implementado a verificação dos estados-limites últimos de perfis I laminados e soldados duplamente simétricos, para esforços de tração, compressão, flexão e cortante. Com o aprimoramento, os perfis em T, U simétrico, cantoneira de abas iguais, cantoneira de abas desiguais, tubular retangular e tubular circular foram adicionados no programa, tendo como base as recomendações da norma brasileira NBR 8800 (2008).

## **Abstract**

The present work consists on the improvement of the software Eiffel, an educational tool for the study of steel structures, developed at ITA by Felipe de Araújo Pineschi Teixeira in 2015 as his bachelor thesis, in which the ultimate limit state verification was implemented for I and H shaped cross section, for tension, compression, bending and shear forces. After the enhancement, the T, U symmetric, angle with equal legs, angle with unequal legs, rectangular tube and circular tube shapes were added to the software, following the NBR 8800 (2008) recommendations.

## Sumário

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>15</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1 Motivação</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3 Contribuições</b> .....	<b>17</b>
<b>1.4 Estrutura do Trabalho</b> .....	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>18</b>
<b>2 CÁLCULO ESTRUTURAL</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1 Tipos de esforços e características dos perfis</b> .....	<b>19</b>
2.1.1 Tração .....	19
2.1.2 Compressão .....	20
2.1.3 Flexão .....	24
2.1.4 Cortante .....	27
<b>2.2 Perfil U</b> .....	<b>28</b>
2.2.1 Compressão – Perfil U.....	28
2.2.2 Flexão em torno do eixo X – Perfil U .....	30
2.2.3 Flexão em torno do eixo Y – Perfil U .....	32
2.2.4 Cortante – Perfil U.....	33
2.2.4.1 Cortante no eixo Y – Perfil U.....	33
2.2.4.2 Cortante no eixo X – Perfil U.....	33
<b>2.3 Perfil T</b> .....	<b>34</b>
2.3.1 Compressão – Perfil T .....	34
2.3.1.2 Fator de redução total devido à flambagem local – Perfil T soldado .....	35

2.3.1.3	Fator de redução total devido à flambagem local – Perfil T laminado.....	36
2.3.2	Flexão em torno do eixo X – Perfil T.....	36
2.3.3	Flexão em torno do eixo Y – Perfil T.....	37
2.3.4	Cortante na direção Y – Perfil T.....	37
<b>2.4</b>	<b>Perfil L.....</b>	<b>38</b>
2.4.1	Compressão – Perfil L.....	38
<b>2.5</b>	<b>Tubular Retangular.....</b>	<b>40</b>
2.5.1	Compressão – Tubular Retangular.....	40
2.5.2	Flexão em torno do Eixo X – Tubular Retangular.....	42
2.5.3	Flexão em torno do Eixo Y – Tubular Retangular.....	43
2.5.4	Cortante no Eixo Y – Tubular Retangular.....	43
2.5.5	Cortante no Eixo X – Tubular Retangular.....	43
<b>2.6</b>	<b>Tubular Circular.....</b>	<b>43</b>
2.6.1	Compressão – Tubular Circular.....	44
2.6.2	Flexão – Tubular Circular.....	45
2.6.3	Cortante no Eixo Y – Tubular Circular.....	45
2.6.4	Cortante no Eixo X – Tubular Circular.....	45
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>46</b>	
<b>3</b>	<b>FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1</b>	<b>Interface.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2</b>	<b>Biblioteca de seções.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>Detalhamento das abas.....</b>	<b>47</b>
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>52</b>	
<b>APLICAÇÃO.....</b>	<b>52</b>	
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>55</b>	

**CONCLUSÃO.....55**

**REFERÊNCIAS .....56**

## **Índice de Figuras**

Figura 2.1 – Definição dos elementos AA e AL (NBR 8800, 2008) .....	23
Figura 2.2 – Valores dos parâmetros K (NBR 8800, 2008) .....	24
Figura 2.3 – Parâmetros referentes ao cálculo do momento fletor resistente de cálculo (NBR 8800, 2008).....	26
Figura 2.4 – Referencial adotado para perfil U .....	28
Figura 2.5 – Referencial adotado para perfil T.....	34
Figura 2.6 – Referencial adotado para perfil L.....	38
Figura 2.7 – Referencial adotado para perfil tubular retangular.....	40
Figura 2.8 – Referencial adotado para perfil tubular circular.....	44
Figura 3.1 – Preenchimento dos parâmetros geométricos para perfil U, no arquivo .csv.....	47
Figura 3.2 – Aba de verificação do Eiffel .....	48
Figura 3.3 – Aba “Solicitação” do Eiffel.....	48
Figura 3.4 – Aba “Resistência” do Eiffel. Nesse caso, foi escolhido o esforço de compressão .....	51
Figura 3.5 – Quadro com o resumo da verificação dos ELU’s .....	51
Figura 3.6 – Relatório .pdf gerado pelo Eiffel.....	52
Figura 0.1 - Exemplo para aplicação. Considerar todos os K’s iguais a 1 .....	53
Figura 0.2 - Preenchimento da aba de verificação do Eiffel para o exemplo.....	53
Figura 0.3 - Preenchimento da aba de solicitação do Eiffel para o exemplo .....	53
Figura 0.4 - Preenchimento da aba de resistência do Eiffel para o exemplo.....	54
Figura 0.5 - Resultado da análise pelo Eiffel .....	54



# Capítulo 1

## 1 Introdução

Esse trabalho é a continuação de um projeto iniciado no Laboratório de Modelagem Estrutural da Divisão de Engenharia Civil (IEI) do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), que se trata de construção ferramenta auxiliar para uso acadêmico na disciplina de estruturas de aço: programa Eiffel. Sob coordenação do Prof. Francisco Alex Correia Monteiro, foi criada em 2015 a primeira versão do software, que consiste de uma página web que fornecia a verificação dos estados-limites últimos para perfis laminados e soldados dos tipos I e H. Essa primeira fase foi utilizada como trabalho de graduação para Felipe de Araújo Pineschi Teixeira (2015), ex-aluno do ITA.

Aborda-se aqui a adição de mais perfis metálicos ao Eiffel, aproveitando-se que a ferramenta permite uma adaptação dos parâmetros originais para novas seções, sob esforços usuais de tração, compressão, momento fletor e cortante.

### 1.1 Motivação

A utilização de estruturas de aço, apesar de não ser majoritariamente empregada no Brasil, é tida como uma das opções construtivas ideais quando se trata de construções industriais, galpões e prédios empresariais, com uma concentração na região Sudeste do país. O país está entre os maiores produtores de aço. É vista como alternativa para obras que exigem um maior padrão técnico e que pode trazer ganhos de produtividade durante a obra, pois permite uma diminuição no peso útil da estrutura e diminuição de formas e escoramento, por exemplo, além de dar uma maior liberdade aos projetistas em sua fase de concepção. É também ligada a conceitos arquitetônicos modernos e construções sustentáveis, e sua versatilidade permite o emprego tanto em elementos estruturais das construções como partes acessórias ou auxiliares, como vedações.

No que se diz respeito aos componentes e características das construções metálicas, tem-se a comercialização de perfis de aço por sua categorização de acordo com seus processos de fabricação (laminados, soldados e moldados a frio) e quanto a forma da seção transversal (I, U, T, L, tubo circular, tubo retangular, barra, chapa, composto). Dependendo do tipo de processo, os perfis podem ter maior ou menor empregabilidade, bem como adaptabilidade aos diferentes

tipos de obras. Os perfis moldados a frio, por exemplo, vêm sendo utilizados no sistema de Light Steel Frame enquanto que os perfis laminados e soldados tem sua aplicação tanto na indústria metal-mecânica quanto na construção de prédios, pontes, escadas e corrimãos.

Por ser uma continuação do trabalho de graduação “Um programa para verificação de perfis de aço sob esforços usuais de projeto” (2015), do engenheiro civil-aeronáutico Felipe de Araújo Pineschi Teixeira, esse trabalho baseia-se nas premissas adotadas por ele, bem como o formato o qual o programa Eiffel foi concebido. Trata-se de um software web, programado em Python e PHP, que tem por objetivo ser uma ferramenta de auxílio a estudantes de engenharia e a profissionais da área, no cálculo de perfis de aço sob esforços usuais. Até a elaboração desse trabalho, havia apenas a opção de verificação de perfis I e H, com biblioteca limitada.

A título de comparação, verificou-se a existência de trabalhos acadêmicos com objetivos similares, como o software AutoMetal (SILVA et al., 2003), focado no cálculo de treliças metálicas para perfis laminados e conformados a frio. Ainda, pode-se destacar o programa em Visual Basic elaborado por Guanabara (2010), que contempla tanto a parte da análise estrutural (lançamento de carregamentos, diagramas de esforços) até a verificação de cada perfil metálico. Tendo em vista a forma como Eiffel foi programa, decidiu-se manter sua estrutura original, adaptando-a para o recebimento de novos inputs. A metodologia de cálculo das rotinas programadas é toda baseada na NBR 8800 (2008) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas de aço e concreto de edifícios, com o auxílio dos livros “Estruturas de Aço – Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8000:2008”, escrito por Michèle Pfeil e Walter Pfeil, e Dimensionamento de elementos de perfis de aço laminados e soldados: com exemplos numéricos, escrito por Augusto Badke e Walnório Ferreira

## **1.2 Objetivos**

O trabalho tem como objetivo uma atualização do programa Eiffel, visto que ele já contemplava o cálculo de verificação para perfis I duplamente simétricos, adaptando os parâmetros para os quais ele fora inicialmente projetado, para os perfis U, T, L, tubular circular e tubular retangular. Os cálculos são todos feitos conforme as orientações da norma NBR 8800 (2008) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Para o uso do programa, parte-se do pressuposto que o usuário já tenha calculado os esforços em uma determinada seção. Ainda, deve-se ressaltar que a análise feita contempla apenas os



diferentes estados-limites últimos, não abordando nem limitações de serviço nem vibrações das estruturas metálicas.

### **1.3 Contribuições**

Como contribuições desse trabalho, podem ser citadas as seguintes:

- a) Melhoramento do software Eiffel, aumentando o número de perfis analisados por ele, gerando benefícios principalmente educacionais, permitindo o acesso dos estudantes da disciplina de estruturas de aço a uma ferramenta auxiliar para a resolução de problemas e desenvolvimento de projetos acadêmicos.
- b) O trabalho constitui uma fonte para aqueles que desejam verificar o procedimento de cálculo estrutural dos perfis metálicos U, T, L, tubular retangular e tubular circular de forma resumida, condensada e direta.

### **1.4 Estrutura do Trabalho**

O trabalho está estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 2 trata das características de cada perfil quando submetidos aos esforços de tração, compressão, momento fletor e cortante, com a descrição e formulação para cada caso, tendo em vista suas particularidades. No Capítulo 3, é apresentada a interface do Eiffel, servindo de manual de instruções aos usuários, com recomendações e explicações do que fazer nas situações de esforços analisadas. No Capítulo 4, faz a aplicação do software na resolução de um problema. Por fim, o Capítulo 5 traz conclusões e comentários finais sobre o trabalho, assim como sugestões para futuros trabalhos e melhoramentos.

## Capítulo 2

### 2 Cálculo estrutural

Esse tópico detalhará o cálculo dos esforços usuais de projeto, segundo as orientações da norma NBR 8800 (2008). A Tabela 1 mostra os tipos de esforços analisados em cada perfil. O referencial para eixos x e y será apresentado no tópico de cada perfil.

Tabela 1 – Descritivo da aplicação de cada esforço nos perfis estudados

Perfis	Estados-limites (NBR 8000, 2008)			
	Tração	Compressão	Flexão	Cisalhamento
<b>U</b>	<b>Aplicável</b>	<b>Aplicável</b>	<b>Em torno dos dois eixos principais de flexão</b>	<b>Nas duas direções principais</b>
<b>T</b>			<b>Em torno do eixo y</b>	<b>Apenas na direção y</b>
<b>L abas iguais</b>			<b>Não se aplica</b>	<b>Não se aplica</b>
<b>L abas desiguais</b>			<b>Não se aplica</b>	<b>Não se aplica</b>
<b>Tubular retangular</b>			<b>Em torno dos dois eixos principais de flexão</b>	<b>Nas duas direções principais</b>
<b>Tubular circular</b>				

Além dos esforços, são necessárias as propriedades físicas do aço, explícitas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físicas do aço

Módulo de Elasticidade (E) – kN/cm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade Transversal (G) – kN/cm <sup>2</sup>
20000	7700

## 2.1 Tipos de esforços e características dos perfis

### 2.1.1 Tração

A verificação da tração consiste na análise da esbeltez da peça e do atendimento de critérios de resistência relacionados ao escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida, bem como o colapso por rasgamento, sendo a força resistente a menor entre as três resistências. O procedimento de cálculo é o mesmo para todas as seções analisadas no trabalho.

Tabela 3 – Parâmetros para força resistente de tração

<b>Esbeltez (NBR 8800 - 5.2.8)</b>	
$\left(\frac{L}{r}\right)_{min} \leq 300$	(1)
<b>Força axial resistente de cálculo (NBR 8800 - 5.2.2)</b>	
$N_{t,Rd} = \text{mín} \left( \frac{A_g f_y}{\gamma_{a2}} ; \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} ; F_{r,Rd} \right)$	(2)
<b>Colapso por Rasgamento (NBR 8800 - 6.5.6)</b>	
$F_{r,Rd} = \text{mín} \left( \frac{1}{\gamma_{a2}} [0,6f_u A_{nv} + C_{ts} f_u A_{nt}] ; \frac{1}{\gamma_{a2}} [0,6f_y A_{gv} + C_{ts} f_u A_{nt}] \right)$	(3)
<p><math>L</math> é o comprimento da peça</p> <p><math>A_g</math> é a área bruta da seção da peça</p> <p><math>A_e</math> é a área efetiva, dada por <math>C_t A_n</math>, em que <math>A_n</math> é a área líquida da barra e <math>C_t</math> é um coeficiente de redução da área líquida (definidos pelos itens 5.2.4 e 5.2.5 da NBR 8800)</p> <p><math>A_{gv}</math> é a área bruta sujeita a cisalhamento</p> <p><math>A_{nv}</math> é a área líquida sujeito a cisalhamento</p> <p><math>A_{nt}</math> é a área líquida sujeita a tração</p> <p><math>C_{ts}</math> é uma constante relacionada à tensão de tração na área líquida</p> <p><math>r</math> é o raio de giração da seção</p>	

### 2.1.2 Compressão

A verificação da compressão necessita do cálculo da esbeltez da peça e da força axial de compressão resistente. Essa última varia conforme o índice de esbeltez reduzido  $\lambda_o$  e do fator de redução total associado à flambagem local  $\chi$ , que variam para cada perfil. Além disso, é necessário o cálculo da força axial de flambagem elástica  $N_e$ , no qual são levadas em consideração as condições de contorno para determinação dos coeficientes de flambagem, conforme mostrado na Figura 2.2. Há também a caracterização local dos componentes dos perfis em elementos AA (duas bordas longitudinais vinculadas) e AL (apenas uma borda longitudinal vinculada), com exceção das seções tubulares circulares, para análise da flambagem nesses elementos. A Tabela 4 representa os principais parâmetros para o cálculo da força de compressão de resistência e a Figura 2.1 mostra a definição dos elementos e comprimentos a serem levados em consideração no cálculo do fator de redução total associado à flambagem local.

Tabela 4 – Parâmetros para cálculo de força resistente de compressão

<b>Força axial resistente de cálculo <math>N_{c,Rd}</math></b>	
$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}}$	(4)
<b>Fator de redução <math>\chi</math></b>	
$\lambda_o \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658 \lambda_o^2$	(5)
$\lambda_o > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_o^2}$	(6)
<b>Índice de esbeltez reduzido <math>\lambda_o</math></b>	
$\lambda_o = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}}$	(7)
<b>Força axial de flambagem elástica <math>N_e</math></b>	
Anexo E – NBR 8800. Cálculo das flambagens por flexão, torção ou flexo-torção, dependendo das condições de simetria da seção. Assim, tem-se que:	
<b>Flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal</b>	
$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2}$	(8)
<b>Flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia y da seção transversal</b>	
$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2}$	(9)
<b>Flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z</b>	
$N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$	(10)
<b>Flambagem elástica por flexo-torção</b>	
$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_o/r_o)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_o/r_o)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$	(11)

**Limitação de índice de esbeltez da peça**

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_{min} \leq 200 \quad (12)$$

$Q$  é o fator de redução total associado à flambagem local, cujo valor deve ser obtido no Anexo F;

$\gamma_{a1}$  é o coeficiente ponderador das ações;

$K_x L_x$  é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo x (o coeficiente de flambagem  $K_x$  é dado no item E.2.1 da norma);

$K_y L_y$  é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo y (o coeficiente de flambagem  $K_y$  é dado no item E.2.1 da norma);

$K_z L_z$  é o comprimento de flambagem por torção (o coeficiente de flambagem  $K_z$  é dado no item E.2.2 da norma);

$I_x$  é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo x;

$G$  é o módulo de elasticidade transversal do aço;

$r_o$  é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento, dado por

$$r_o = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_o^2 + y_o^2)}, \text{ onde } r_x \text{ e } r_y \text{ são os raios de giração em relação aos eixos centrais}$$

x e y, respectivamente, e  $x_o$  e  $y_o$  são as coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos centrais x e y, respectivamente, em relação ao centro geométrico da seção.

Tabela F.1 — Valores de  $(b/t)_{lim}$ 

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de $b$ e $t$	$(b/t)_{lim}$
AA	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Mesas ou almas de seções tubulares retangulares</li> <li>— Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas</li> </ul>		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Almas de seções I, H ou U</li> <li>— Mesas ou almas de seção-caixão</li> <li>— Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1</li> </ul>		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	3	— Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travessamento		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Mesas de seções I, H, T ou U laminadas</li> <li>— Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas</li> <li>— Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas</li> </ul>		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	— Mesas de seções I, H, T ou U soldadas <sup>a</sup>		$0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$
	6	— Almas de seções T		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

<sup>a</sup> O coeficiente  $k_c$  é dado em F.2.

Figura 2.1 – Definição dos elementos AA e AL (NBR 8800, 2008)

Tabela E.1 — Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados



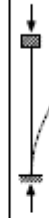







	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de $K_x$ ou $K_y$	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio		Rotação e translação impedidas				
		Rotação livre, translação impedida				
		Rotação impedida, translação livre				
		Rotação e translação livres				

Figura 2.2 – Valores dos parâmetros K (NBR 8800, 2008)

### 2.1.3 Flexão

As condições para a aplicação ao dimensionamento de barras submetidas a momento fletor e força cortante são listadas no item 5.4.1.1 da NBR 8800 (2008). Dentre eles, serão aprofundados nesse trabalho os seguintes:

- Seções U fletidas em relação a um dos eixos centrais de inércia;
- Seções T fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma;
- Seções tubulares retangulares com dois eixos de simetria fletidas em relação a um desses eixos;
- Seções tubulares circulares fletidas em relação a qualquer eixo que passe pelo centro geométrico.

O momento fletor resistente de cálculo será avaliado de acordo com os anexos G e H da norma, sendo o último aplicável apenas a seções esbeltas, o que não é o caso de nenhuma das seções listadas. Ainda, os estados-limites últimos a serem avaliados são:

- 1) Flambagem lateral com torção (FLT);
- 2) Flambagem local da mesa comprimida (FLM);
- 3) Flambagem local da alma (FLA);
- 4) Flambagem local da parede do tubo;
- 5) Escoamento da mesa tracionada.



Com exceção das seções tubulares circulares e seções T, todas as outras seções estudadas são calculadas conforme os itens G.2.1 e G.2.2 da norma, avaliando FLT, FLM e FLA:

1) FLT

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ se } \lambda \leq \lambda_p \quad (13)$$

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \right], \text{ se } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (14)$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ se } \lambda > \lambda_r \quad (15)$$

2) FLM e FLA ( $C_b = 1$ )

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ se } \lambda \leq \lambda_p \quad (16)$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \right], \text{ se } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (17)$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ se } \lambda > \lambda_r \text{ (não aplicável à FLA)} \quad (18)$$

Os parâmetros são calculados conforme a Figura 2.3 e as notas abaixo dela. Para as outras seções, será mostrado na descrição de cada perfil a metodologia de cálculo. As variáveis utilizadas acima são:

$M_{Rd}$  é o momento fletor resistente de cálculo;

$M_{pl}$  é o momento fletor de plastificação da seção transversal, igual ao produto do módulo de resistência plástico  $Z$  pela resistência ao escoamento do aço  $f_y$ ;

$M_{cr}$  é o momento fletor de flambagem elástica;

$M_r$  é o momento fletor correspondente ao início do escoamento, incluindo a influência das tensões residuais em alguns casos;

$\lambda_p$  é o parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

$\lambda_r$  é o parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

O parâmetro  $C_b$  é o fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme, para o comprimento destravado analisado, calculados conforme os itens 5.4.2.3 e 5.4.3.4 da NBR 8800 (2008). Além desses itens, há a necessidade de se verificar a validade da análise elástica. Dessa forma, o momento fletor resistente de cálculo

$$M_{Rd} \leq \frac{1,50W f_y}{\gamma_{a1}} \quad (19)$$

onde  $W$  é o módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal da barra em relação ao eixo de flexão.

Tabela G.1 — Parâmetros referentes ao momento fletor resistente

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-limites aplicáveis	$M_r$	$M_{cr}$	$\lambda$	$\lambda_p$	$\lambda_r$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 1	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 1
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com apenas um eixo de simetria situado no plano médio da alma, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia (ver Nota 9)	FLT	$(f_y - \sigma_r)W_c$ $\leq f_y W_t$ Ver Nota 5	Ver Nota 2	$\frac{L_b}{r_{yc}}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 2
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W_c$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h_c}{t_w}$	$\frac{\frac{h_c}{b} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{pt}}{M_t} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia	FLM Ver Nota 3	$(f_y - \sigma_r)W$	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA Ver Nota 3	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{h}{t_w}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$f_y W$	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{J A}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pt}} \sqrt{J A}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{J A}$
Seções-caixão e tubulares retangulares, duplamente simétricas, fletidas em relação a um dos eixos de simetria que seja paralelo a dois lados	FLT Ver Nota 7	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{J A}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pt}} \sqrt{J A}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{J A}$
	FLM	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	FLA	$f_y W$	-	$\frac{h}{t_w}$	Ver Nota 10	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Figura 2.3 – Parâmetros referentes ao cálculo do momento fletor resistente de cálculo (NBR 8800, 2008)

Nota 3 - O estado-limite FLA aplica-se só à alma da seção U, quando comprimida pelo momento fletor. Para seção U, FLM aplica-se somente quando a extremidade livre das mesas for comprimida pelo momento fletor.

Nota 4 –  $W_{ef}$  é o módulo de resistência mínimo elástico, relativo ao eixo de flexão, para uma seção que tem uma mesa comprimida (ou alma comprimida no caso de perfil U fletido em relação ao eixo de menor inércia) de largura igual a  $b_{ef}$ , dada pelo item F.3.2 da NBR 8800, com  $\sigma$  igual a  $f_y$ .

As outras notas estão descritas nas seções respectivas de cada perfil, já com o resultado dos parâmetros desejados.

#### 2.1.4 Cortante

No cálculo do esforço cortante resistente, são considerados os estados-limites últimos de escoamento e flambagem por cisalhamento, conforme explicitado no item 5.4.3 da norma. Dessa maneira, tem-se que:

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (20)$$

$$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \rightarrow V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (21)$$

$$\lambda > \lambda_p \rightarrow V_{Rd} = 1,24 \left( \frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (22)$$

$V_{pl}$  é a força cortante correspondente à plastificação da lama por cisalhamento. O cálculo varia de uma seção para a outra, em geral.

$V_{Rd}$  é esforço cortante resistente de cálculo.

Os  $\lambda$ 's são os parâmetros de esbeltez associados a flambagem por cisalhamento e ao escoamento das peças.

## 2.2 Perfil U

São contemplados os casos dos perfis U simétricos laminados e soldados. A diferença dos dois tipos se dá apenas no cálculo dos esforços de compressão, na análise da flambagem local das mesas que estão axialmente comprimidas, onde as mesas de seções laminadas são elementos do tipo AL do grupo 4 e mesas de seções soldadas são elementos do tipo AL do grupo 5. Os outros esforços são calculados da mesma forma para ambos. A Figura 2.4 mostra o referencial para o cálculo do perfil U.

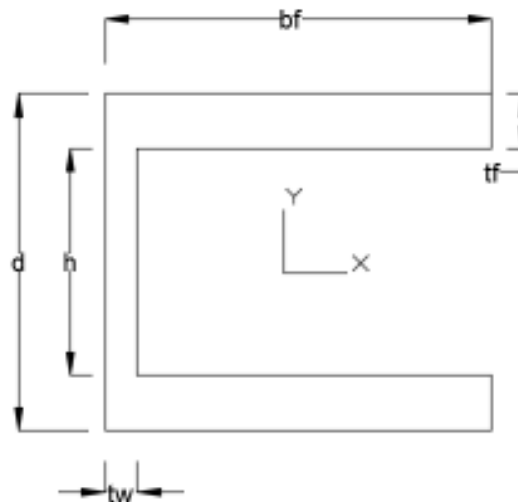


Figura 2.4 – Referencial adotado para perfil U

### 2.2.1 Compressão – Perfil U

#### 2.2.1.1 Força Axial de Flambagem Elástica – Perfil U

Conforme o Anexo E – E.1.2 da NBR 8800, tem-se a força axial de flambagem elástica é:

$$N_e = \text{mín}(N_{ey}, N_{exz}) \quad (23)$$

#### 2.2.1.2 Fator de redução total devido à flambagem local – Perfil U soldado

O perfil U possui dois tipos de elementos. As mesas constituem elementos do tipo AL e a alma, um elemento do tipo AA. Dessa forma, temos mesas pertencendo ao grupo 5 e alma ao grupo 2, conforme a Figura 2.1. Temos então que  $Q = Q_s Q_a$ , onde:

$$1) \frac{b}{t} = \frac{b_f}{t_f}, \text{ para a flambagem da mesa}$$

$$Q_s = 1, \text{ se } \frac{b_f}{t_f} \leq 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \quad (24)$$

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b_f}{t_f} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}}, \text{ se } 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \leq \frac{b_f}{t_f} \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \quad (25)$$

$$Q_s = \frac{0,90 E k_c}{f_y \left(\frac{b_f}{t_f}\right)^2}, \text{ se } \frac{b_f}{t_f} > 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \quad (26)$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{d/t_w}}, \text{ sendo } 0,35 \leq k_c \leq 0,76 \quad (27)$$

$$(28)$$

2)  $\frac{b}{t} = \frac{h}{t_w}$ , para flambagem da alma

$$Q_a = 1, \text{ se } \frac{h}{t_w} \leq 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (29)$$

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g}, \text{ se } \frac{h}{t_w} > 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \text{ onde} \quad (30)$$

$$A_{ef} = A_g - (h - b_{ef})t_w; \quad (31)$$

$$b_{ef} = \min \left( 1,92 t_w \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[ 1 - \frac{0,34}{h/t_w} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right]; h \right) \quad (32)$$

$b_{ef}$  é a largura efetiva de um elemento AA comprimido. Nesse caso em particular, só há um elemento AA; caso houvesse mais, seria necessário fazer o somatório da parcela  $(h - b_{ef})t_w$  para cada um.

### 2.2.1.3 Fator de redução total devido à flambagem local – Perfil U laminado

O cálculo é análogo ao item 2.2.1.2, com a diferença para o item relativo a flambagem da mesa, que agora faz parte do grupo 4. Não há mudança no cálculo da flambagem da alma. Dessa forma, tem-se que:

$$1) \frac{b}{t} = \frac{b_f}{t_f}, \text{ para flambagem da mesa}$$

$$Q_s = 1, \text{ se } \frac{b_f}{t_f} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (33)$$

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b_f}{t_f} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ se } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \leq \frac{b_f}{t_f} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (34)$$

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b_f}{t_f}\right)^2}, \text{ se } \frac{b_f}{t_f} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (35)$$

## 2.2.2 Flexão em torno do eixo X – Perfil U

Dado que o eixo X é considerado o eixo de maior momento de inércia, o cálculo é feito conforme mostrado no tópico 2.1.3. Através da Figura 2.3, pode-se ver que:

1) FLT

$$M_r = (f_y - \sigma_t)W \quad (36)$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{L_b^2}{C_w}\right)}, \text{ se } \beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_t)W}{EJ} \quad (37)$$

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (38)$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (39)$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}}, \text{ tal que } \beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_t)W}{EJ} \quad (40)$$

$C_w$  é a constante de empenamento da seção transversal;

$L_b$  é a distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado);

$J$  é a constante de torção da seção transversal;

$\sigma_t$  é a tensão residual de compressão nas mesas;

$W$  é o módulo de resistência elástico da seção, relativo ao eixo de flexão;

$I_y$  é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo  $y$ ;

$E$  é o módulo de elasticidade do aço.

## 2) FLM

$$M_r = (f_y - \sigma_t)W \quad (41)$$

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f} \quad (42)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (43)$$

$$\text{Para perfis laminados: } M_{cr} = 0,69 \frac{E}{\lambda^2} W_c, \lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \quad (44)$$

$$\text{Para perfis soldados: } M_{cr} = 0,90 \frac{E k_c}{\lambda^2} W_c, \lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)/k_c}}, \text{ com } k_c \quad (45)$$

conforme F.2 da norma.

## 3) FLA

$$M_r = f_y W \quad (46)$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (47)$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (48)$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (49)$$

### 2.2.3 Flexão em torno do eixo Y – Perfil U

#### 1) FLM

$$M_r = (f_y - \sigma_t)W \quad (50)$$

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f} \quad (51)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (52)$$

$$\text{Para perfis laminados: } M_{cr} = 0,69 \frac{E}{\lambda^2} W_c, \lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \quad (53)$$

$$\text{Para perfis soldados: } M_{cr} = 0,90 \frac{E k_c}{\lambda^2} W_c, \lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)/k_c}}, \text{ com } k_c \quad (54)$$

conforme F.2 da norma.

#### 2) FLA

$$M_r = f_y W_{ef} \quad (55)$$

$$M_{cr} = f_y \frac{W_{ef}^2}{W}, \quad (56)$$

com  $W_{ef}$  sendo o módulo de resistência mínimo elástico, relativo ao eixo de flexão, para uma seção que tem uma mesa comprimida (ou alma comprimida no caso de perfil U fletido em relação ao eixo de menor inércia) de largura igual a  $b_{ef}$ , dada pelo item F.3.2 da NBR 8800, com  $\sigma$  igual a  $f_y$ . Em alma comprimida de seção U fletida em relação ao eixo de menor momento de inércia,  $b = h$ ,  $t = t_w$  e  $b_{ef} = h_{ef}$ .

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (57)$$

$$\lambda_p = 1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (58)$$

$$\lambda_r = 1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (59)$$



## 2.2.4 Cortante – Perfil U

Já no caso da força cortante de cálculo, é utilizado o mesmo procedimento para seções I, conforme o item 5.4.3.1 da norma:

### 2.2.4.1 Cortante no eixo Y – Perfil U

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (60)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (61)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (62)$$

$$k_v = \begin{cases} 5,0 \text{ para almas sem enrijecedores, para } \frac{a}{h} > 3 \text{ ou para } \frac{a}{h} > \left[ \frac{260}{\frac{h}{t_w}} \right]^2 \\ 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2}, \text{ para todos os outros casos} \end{cases} \quad (63)$$

$$V_{pl} = 0,6 d t_w f_y \quad (64)$$

é a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento, quando o cortante estiver no eixo Y.

### 2.2.4.2 Cortante no eixo X – Perfil U

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f} \quad (65)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (66)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (67)$$

$$k_v = 1,2 \quad (68)$$

$$V_{pl} = 2 b_f t_f f_y \quad (69)$$

é a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento, quando o cortante estiver no eixo X.

## 2.3 Perfil T

Para o perfil T, o Eiffel aborda os casos de tração, compressão, flexão em torno do eixo X e cortante na direção Y. No que diz respeito a compressão, a seção contém dois elementos do tipo AL (a alma e a mesa), sendo necessário fazer o cálculo separado do fator  $Q_s$  para cada um e utilizar o menor deles. De acordo com a tabela F.1 do anexo F da NBR 8800, a mesa encontra-se no grupo 4 ou no grupo 5, dependendo se o perfil é soldado ou laminado. Já a alma pertence ao grupo 6. Além do  $Q$ , também é necessário o cálculo de  $N_e$  para descobrir os outros parâmetros. A flexão em torno de X é calculada independentemente do tipo de fabricação do perfil.

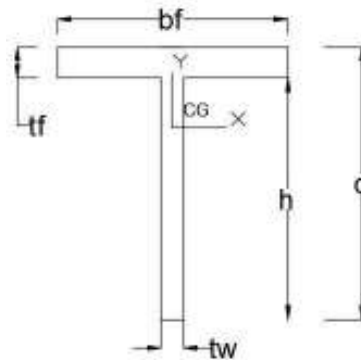


Figura 2.5 – Referencial adotado para perfil T

### 2.3.1 Compressão – Perfil T

#### 2.3.1.1 Força Axial de Flambagem Elástica

Conforme o Anexo E – E.1.2 da NBR 8800, tem-se a força axial de flambagem elástica é:

$$N_e = \text{mín}(N_{ex}, N_{eyz}) \quad (70)$$

### 2.3.1.2 Fator de redução total devido à flambagem local – Perfil T soldado

Como só existem elementos do tipo AL,  $Q = Q_s$ . Dessa forma, há duas possibilidades, conforme já comentado: flambagem local da mesa ou flambagem local da alma. Tomando como base a Figura 4-1, e adaptando ao referencial adotado no trabalho, tem-se que:

$$1) \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f}, \text{ para flambagem da mesa}$$

$$Q_{s1} = 1, \quad \text{se } \frac{b_f}{2t_f} \leq 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \quad (71)$$

$$Q_{s1} = 1,415 - 0,65 \frac{b_f}{2t_f} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}}, \quad \text{se } 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \leq \frac{b_f}{2t_f} \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \quad (72)$$

$$Q_{s1} = \frac{0,90 E k_c}{f_y \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)^2}, \quad \text{se } \frac{b_f}{2t_f} > 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \quad (73)$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{d/t_w}}, \text{ sendo } 0,35 \leq k_c \leq 0,76$$

$$2) \frac{b}{t} = \frac{d}{t_w}, \text{ para flambagem da alma}$$

$$Q_{s2} = 1, \quad \text{se } \frac{d}{t_w} \leq 0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (74)$$

$$Q_{s2} = 1,908 - 1,22 \frac{d}{t_w} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \quad \text{se } 0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \leq \frac{d}{t_w} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (75)$$

$$Q_{s2} = \frac{0,69 E}{f_y \left(\frac{d}{t_w}\right)^2}, \quad \text{se } \frac{d}{t_w} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (76)$$

$$\text{Ao final, tem-se que } Q_s = \min(Q_{s1}, Q_{s2}). \quad (77)$$

### 2.3.1.3 Fator de redução total devido à flambagem local – Perfil T laminado

Analogamente ao item 4.3.1.2, toma-se como base a Figura 4-1, e adaptando-se ao referencial adotado no trabalho, tem-se que:

$$1) \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f}, \text{ para flambagem da mesa}$$

$$Q_{s1} = 1, \quad \text{se } \frac{b_f}{2t_f} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (78)$$

$$Q_{s1} = 1,415 - 0,74 \frac{b_f}{2t_f} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \quad \text{se } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \leq \frac{b_f}{2t_f} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (79)$$

$$Q_{s1} = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)^2}, \quad \text{se } \frac{b_f}{2t_f} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (80)$$

$$2) \frac{b}{t} = \frac{d}{t_w}, \text{ para flambagem da alma}$$

$$Q_{s2} = 1, \quad \text{se } \frac{d}{t_w} \leq 0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (81)$$

$$Q_{s2} = 1,908 - 1,22 \frac{d}{t_w} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \quad \text{se } 0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \leq \frac{d}{t_w} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (82)$$

$$Q_{s2} = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{d}{t_w}\right)^2}, \quad \text{se } \frac{d}{t_w} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (83)$$

$$\text{Ao final, tem-se que } Q_s = \min(Q_{s1}, Q_{s2}) \quad (84)$$

### 2.3.2 Flexão em torno do eixo X – Perfil T

1) FLT

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{\pi \sqrt{E I_y G J}}{L_b} (B + \sqrt{1 + B^2}) \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ onde } B = \pm 2,3 \frac{d}{L_b} \sqrt{\frac{I_y}{J}} \quad (85)$$

com sinal positivo usado quando a extremidade da alma oposta à mesa estiver tracionada e negativo em caso contrário (se essa extremidade estiver comprimida em algum ponto ao longo do comprimento destravado, o sinal negativo deve ser usado);

## 2) FLM

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (86)$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left( 1,19 - 0,50\lambda \sqrt{\frac{f_y}{E}} \right) f_y W_c, \text{ para } \lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r \quad (87)$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{0,69EW_c}{\lambda^2}, \text{ para } \lambda \geq \lambda_r \quad (88)$$

com:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \quad (89)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (90)$$

$$\lambda_r = 1,0 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (91)$$

### 2.3.3 Flexão em torno do eixo Y – Perfil T

Os perfis T não trabalham sobre tal esforço.

### 2.3.4 Cortante na direção Y – Perfil T

Cálculo análogo ao perfil U, com a ressalva do item 5.4.3.3 da norma

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (92)$$

$$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \rightarrow V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (93)$$

$$\lambda > \lambda_r \rightarrow V_{Rd} = 1,24 \left( \frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (94)$$

$$\lambda = \frac{d}{t_w}, \text{ com } \lambda \leq 260 \quad (95)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (96)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}}, \quad k_v = 1,2 \quad (97)$$

$$V_{pl} = 0,6 d t_w f_y \quad (98)$$

## 2.4 Perfil L

Os perfis cantoneiras do Eiffel estão submetidos à tração ou à compressão. Os dois casos abordados no trabalho são cantoneiras com abas iguais e com abas diferentes. O caso geral é mostrado na Figura 2.6, considerando que a cantoneira está conectada a uma peça pela aba paralela ao eixo x.

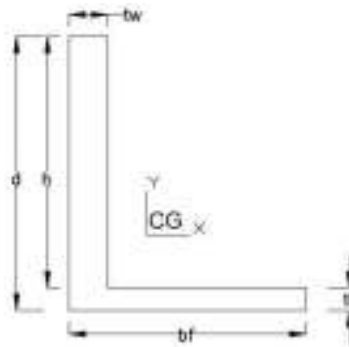


Figura 2.6 – Referencial adotado para perfil L

### 2.4.1 Compressão – Perfil L

Os casos de compressão para cantoneiras são descritos pelo Anexo E – item E.1.4 – Cantoneiras simples conectadas por uma aba (NBR 8800). As condições para que os efeitos da força de compressão atuante em uma cantoneira simples possam ser considerados por meio de comprimento de flambagem equivalente são:

- A cantoneira está carregada nas extremidades através da mesma aba;
- A cantoneira está conectada por solda ou por pelo menos dois parafusos na direção da solicitação;
- A cantoneira não esteja solicitada por ações transversais intermediárias.

### 2.4.1.1 Força Axial de Flambagem Elástica – Perfil L

Apresentadas as condições acima, a força axial de flambagem elástica da cantoneira é dada por

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_{x1}}{(K_{x1} L_{x1})^2} \quad (99)$$

$K_{x1} L_{x1}$  é o comprimento de flambagem equivalente, dado em E.1.4.2 ou E.1.4.3, o que for aplicável;

$I_{x1}$  é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico e é paralelo a aba conectada

Os possíveis casos para o produto  $K_{x1} L_{x1}$ , que estão relacionados como a cantoneira está sendo utilizada, são:

- 1) Cantoneiras de abas iguais ou abas desiguais conectadas pela aba de maior largura, que são barras individuais ou diagonais ou montantes de treliças planas com barras adjacentes conectadas do mesmo lado das chapas de nó ou das cordas:

$$\text{Para } 0 \leq \frac{L_{x1}}{r_{x1}} \leq 80 \rightarrow K_{x1} L_{x1} = 72r_{x1} + 0,75L_{x1} \quad (100)$$

$$\text{Para } \frac{L_{x1}}{r_{x1}} > 80 \rightarrow K_{x1} L_{x1} = 32r_{x1} + 1,25L_{x1} \quad (101)$$

- 2) Cantoneiras de abas iguais ou de abas desiguais conectadas pela aba de maior largura, que são diagonais ou montantes de treliças espaciais com as barras adjacentes conectadas do mesmo lado das chapas de nó ou das cordas:

$$\text{Para } 0 \leq \frac{L_{x1}}{r_{x1}} \leq 75 \rightarrow K_{x1} L_{x1} = 60r_{x1} + 0,80L_{x1} \quad (102)$$

$$\text{Para } \frac{L_{x1}}{r_{x1}} > 80 \rightarrow K_{x1} L_{x1} = 45r_{x1} + L_{x1} \quad (103)$$

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

### 2.4.1.2 Fator de redução total devido à flambagem local

O perfil cantoneira possui dois elementos AL. Portanto,  $Q = Q_s$ . Tomando como base a figura 4-4 e adaptando ao referencial adotado no trabalho, deve-se testar os dois possíveis  $Q'$ s e adotar o menor deles como  $Q_s$ . De forma geral:

$$\text{Se } \frac{b}{t} = \frac{b_f}{t_f} \text{ ou } \frac{b}{t} = \frac{d}{t_w}:$$

$$Q_s = 1, \quad \text{se } \frac{b}{t} \leq 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (104)$$

$$Q_s = 1,340 - 0,76 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \quad \text{se } 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \leq \frac{b}{t} \leq 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (105)$$

$$Q_s = \frac{0,53E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \quad \text{se } \frac{b}{t} > 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (106)$$

## 2.5 Tubular Retangular

As seções tubulares retangulares estão sujeitas aos 4 esforços citados. A Figura 4-5 mostra as dimensões genéricas desse tipo de perfil, bem como a orientação dos eixos centrados no centro de gravidade da seção.

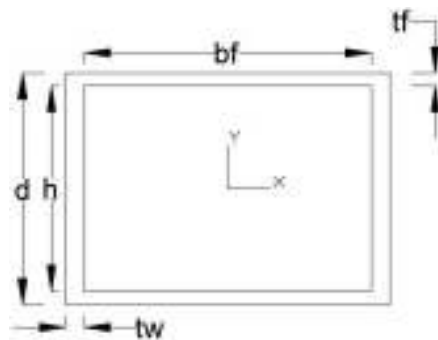


Figura 2.7 – Referencial adotado para perfil tubular retangular

### 2.5.1 Compressão – Tubular Retangular

A característica principal desse tipo de seção, no que diz respeito à compressão, é que todos os elementos de sua seção transversal são do tipo AA. Além disso, a norma analisa dois casos diferentes: tubo com seção uniforme e lados iguais e tubo de lados perpendiculares



diferentes e espessuras de lados perpendiculares também diferentes, mas lados paralelos de espessura igual.

### 2.5.1.1 Força Axial de Flambagem Elástica – Tubular Retangular

Conforme o Anexo E – E.1.2 da NBR 8800, tem-se a força axial de flambagem elástica é:

$$N_e = \min(N_{ex}, N_{ey}, N_{ez}) \quad (107)$$

### 2.5.1.2 Fator de redução total devido à flambagem local – Tubular Retangular

Conforme já comentado, como todos os elementos são do tipo AA, eles se enquadram nos grupos 1 e 2 da Figura 4-1, dependendo do caso analisado. Ainda,  $Q = Q_a$ . Assim, tem-se que:

1) Se  $b_f = h$  e  $t_f = t_w$ ,

Então  $\frac{b}{t} = \frac{b_f}{t_f}$ . Assim,

$$\text{Se } \frac{b_f}{t_f} \leq 1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \rightarrow Q_a = 1 \quad (108)$$

$$\text{Se } \frac{b_f}{t_f} > 1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \rightarrow Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (109)$$

$$A_{ef} = A_g - 4(b_f - b_{ef})t_f \quad (110)$$

$$b_{ef} = \min \left( 1,92t_f \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[ 1 - \frac{0,38}{b_f/t_f} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right]; b_f \right) \quad (111)$$

2) Se  $b_f \neq h$  ou  $t_f \neq t_w$ ,

$$\frac{b}{t} = \max \left( \frac{b_f}{t_f}; \frac{h}{t_w} \right) \quad (112)$$

$$\text{Se } \frac{b}{t} \leq 1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \rightarrow Q_a = 1 \quad (113)$$

$$\text{Se } \frac{b}{t} > 1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \rightarrow Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (114)$$

$$A_{ef} = A_g - 2(b_f - b_{ef1})t_f - 2(h - b_{ef2})t_w \quad (115)$$

$$b_{ef1} = \text{mín} \left( 1,92t_f \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[ 1 - \frac{0,38}{b_f/t_f} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right]; b_f \right) \quad (116)$$

$$b_{ef2} = \text{mín} \left( 1,92t_w \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[ 1 - \frac{0,38}{h/t_w} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right]; h \right) \quad (117)$$

### 2.5.2 Flexão em torno do Eixo X – Tubular Retangular

1) FLT – só é aplicável quando o eixo de flexão for o de maior inércia

$$M_r = (f_y - \sigma_t)W, \sigma_r = 0,3f_y \quad (118)$$

$$M_{cr} = \frac{2,00C_b E}{\lambda} \sqrt{JA} \quad (119)$$

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (120)$$

$$\lambda_p = \frac{0,13E}{M_{pl}} \sqrt{JA} \quad (121)$$

$$\lambda_r = \frac{2,00E \sqrt{JA}}{M_r} \quad (122)$$

2) FLM

$$M_r = f_y W_{ef} \quad (123)$$

$$M_{cr} = \frac{W_{ef}^2}{W} f_y \quad (124)$$

$$\lambda_p = \frac{b_f}{t_f} \quad (125)$$

$$\lambda_p = 1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (126)$$

$$\lambda_r = 1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (127)$$

3) FLA

$$M_r = f_y W \quad (128)$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (129)$$

$$\lambda_p = 2,42 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (130)$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (131)$$

### 2.5.3 Flexão em torno do Eixo Y – Tubular Retangular

Devido à dupla simetria, o cálculo é análogo ao do item 4.5.2

### 2.5.4 Cortante no Eixo Y – Tubular Retangular

Cálculo análogo ao perfil U, com a ressalva do item 5.4.3.3 da norma:

$$\lambda = \frac{h}{t_w}, \text{ com } \lambda \leq 260 \quad (132)$$

$$k_v = 5,0 \quad (133)$$

$$V_{pl} = 1,2ht_w f_y \quad (134)$$

### 2.5.5 Cortante no Eixo X – Tubular Retangular

Devido à dupla simetria da seção, o cálculo é análogo ao item 2.5.4

## 2.6 Tubular Circular

As seções tubulares circulares do Eiffel podem ser avaliadas aos 4 esforços descritos. Diferentemente das outras seções, possui simetria em qualquer que seja o eixo que passe por seu centro geométrico, conforme mostrado na Figura 2.8. Dessa forma, a representação de eixos x e y é meramente didática, a fim de se mostrar os cálculos dos esforços resistentes.

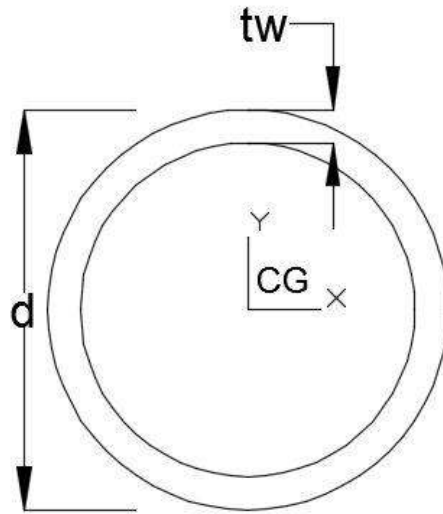


Figura 2.8 – Referencial adotado para perfil tubular circular

### 2.6.1 Compressão – Tubular Circular

Devido à compressão, há a necessidade de avaliar se há flambagem local da parede do tubo.

Além disso, a norma contempla apenas os casos em que a razão  $\frac{d}{t_w} \leq \frac{0,45E}{f_y}$ .

#### 2.6.1.1 Força Axial de Flambagem Elástica – Tubular Circular

Conforme NBR 8800 – Anexo E – E.1.2:

$$N_e = \text{mín}(N_{ey}, N_{ex}, N_{ez}) \quad (135)$$

#### 2.6.1.2 Fator de redução total devido à flambagem local – Tubular Circular

O fator  $Q$  de redução de flambagem local da parede é dado por:

$$\text{Se } \frac{d}{t_w} \leq \frac{0,11E}{f_y} \rightarrow Q = 1 \quad (136)$$

$$\text{Se } \frac{0,11E}{f_y} < \frac{d}{t_w} \leq \frac{0,45E}{f_y} \rightarrow Q = \frac{0,038}{\frac{d}{t_w}} \frac{E}{f_y} + \frac{2}{3} \quad (137)$$

### 2.6.2 Flexão – Tubular Circular

É necessário avaliar o estado-limite de flambagem local da parede do tubo.

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ se } \lambda \leq \lambda_p \quad (138)$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left( \frac{0,021E}{d/t_w} + f_y \right) W, \text{ se } \lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r \quad (139)$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{0,33E}{d/t_w} W, \text{ se } \lambda > \lambda_r \quad (140)$$

com:

$$\lambda = \frac{d}{t_w} \quad (141)$$

$$\lambda_p = \frac{0,07E}{f_y} \quad (142)$$

$$\lambda_r = \frac{0,31E}{f_y} \quad (143)$$

### 2.6.3 Cortante no Eixo Y – Tubular Circular

$$V_{Rd} = \frac{0,5\tau_{cr}Ag}{\gamma_{a1}} \quad (144)$$

$$\tau_{cr1} = \frac{1,60E}{\sqrt{\frac{L}{d}} \left( \frac{d}{0,93t_w} \right)^{5/4}} \leq 0,6f_y \quad (145)$$

$$\tau_{cr2} = \frac{0,78E}{\left( \frac{d}{0,93t_w} \right)^{3/2}} \leq 0,6f_y \quad (146)$$

$$\tau_{cr} = \max(\tau_{cr1}, \tau_{cr2}) \quad (147)$$

em que:

$L$  é a distância entre as seções de forças cortantes máxima e nula

### 2.6.4 Cortante no Eixo X – Tubular Circular

Devido à dupla simetria, o cálculo é análogo ao do item acima.

## Capítulo 3

### 3 Funcionamento do programa

#### 3.1 Interface

Conforme detalhado em TEIXEIRA (2015), a interface do Eiffel apresenta quatro abas no lado esquerdo da tela que representam os passos que são necessários para a realização do cálculo de verificação. As abas possuem os seguintes títulos: Verificação, Solicitação, Resistência e Relatório.

##### **Verificação**

Etapa em que o usuário escolhe o componente a ser analisado, o tipo de aço, o tipo da seção e a bitola do perfil.

##### **Solicitação**

O usuário escolhe o tipo de solicitação a qual o perfil está submetido. Os momentos fletores aplicados as seções são definidos como positivos na concepção do programa. A orientação do cortante não faz diferença na programação interna, pois o cálculo é o mesmo.

##### **Resistência**

De acordo com os esforços selecionados na aba Solicitação, a aba Resistência solicita ao usuário o preenchimento dos dados necessários para a verificação.

##### **Relatório**

Trata-se da etapa em que se gera um relatório da verificação ao usuário, que contém os valores dos parâmetros de cálculo e a tabela dos estados-limites verificados.

#### 3.2 Biblioteca de seções

Os dados relativos às seções estão armazenados em vários arquivos .csv, em que cada um corresponde a um tipo de seção de aço, localizados nas pastas dos códigos do Eiffel. Optou-se por adotar o mesmo formato do que fora feito para perfis I e H, já que toda a programação interna estava estruturada para esse caso particular. Dessa forma, adapta-se o nome das variáveis seção por seção, mantendo o padrão mostrado nas Figura 2.4, Figura 2.5, Figura 2.6,

Figura 2.7 e Figura 2.8. É claro que, por exemplo, haverá casos em que algumas das variáveis não farão sentido para um determinado perfil; nessa situação, o usuário deve preencher com um valor nulo. A Figura 3.1 exemplifica como ficaria o preenchimento para seções U. Logo abaixo, estão as unidades para cada variável na Tabela 5.

Bitola	Massa	d	bf	tw	tf	h	hw	Area	Ix	Wx	rx	Zx	Iy	Wy	ry	Zy	rt	J	Cw
C 76 x 6,11	6.11	76.2	35.8	4.3	6.9	62.4	0	7.78	68.9	18.1	2.98	96.4	8.2	3.32	1.03	25.5	2.6	1.72	82
C 102 x 7,95	7.95	101.6	40.1	4.6	7.5	86.6	0	10.1	159.5	31.4	3.97	139.4	13.1	4.61	1.14	38.5	2.69	4.34	248
C 152 x 12,2	12.2	152.5	46.8	5.1	8.7	135.1	0	15.5	546	71.7	5.94	147.9	28.8	8.16	1.36	27.3	2.55	2.05	1270
C 203 x 17,1	17.1	203.2	57.4	5.6	9.9	183.4	0	21.8	1356	133.4	7.89	190.6	54.9	12.8	1.59	35.9	2.59	4.02	4431
C 254 x 22,7	22.7	254	66	6.1	11.1	231.8	0	29	2800	211	9.84	225.5	95.1	19	1.81	43.9	2.63	6.18	12218
C 305 x 30,7	30.7	304.8	74.7	7.1	12.7	279.4	0	39.1	5370	352	11.7	225.6	161.1	28.3	2.03	43.1	2.64	6.19	30076

Figura 3.1 – Preenchimento dos parâmetros geométricos para perfil U, no arquivo .csv

Tabela 5 – Unidades dos parâmetros geométricos

Massa (kg/m)	d (mm)	bf (mm)	tw (mm)	tf (mm)	h (mm)	hw (mm)	Cw (cm <sup>6</sup> )
Area (cm <sup>2</sup> )	Ix (cm <sup>4</sup> )	Wx (cm <sup>3</sup> )	rx (cm)	Zx (cm <sup>3</sup> )	Iy (cm <sup>4</sup> )	Wy (cm <sup>3</sup> )	J (cm <sup>4</sup> )
ry (cm)	Zy (cm <sup>3</sup> )	rt (cm)					

As propriedades físicas  $f_y$  e  $f_u$  do aço estão armazenadas em um outro arquivo .csv, com unidade  $\frac{kN}{cm^2}$ .

### 3.3 Detalhamento das abas

Conforme descrito em TEIXEIRA (2015), a aba Verificação consiste das informações básicas do perfil: o tipo de aço, tipo da seção e a bitola a ser utilizada. Conforme comentado no item 5.2, todas as opções para esses itens estão guardadas em um banco de dados internos, podendo sofrer alterações caso o usuário deseje. A Figura 3.2 mostra como seria a escolha de um perfil T soldado.

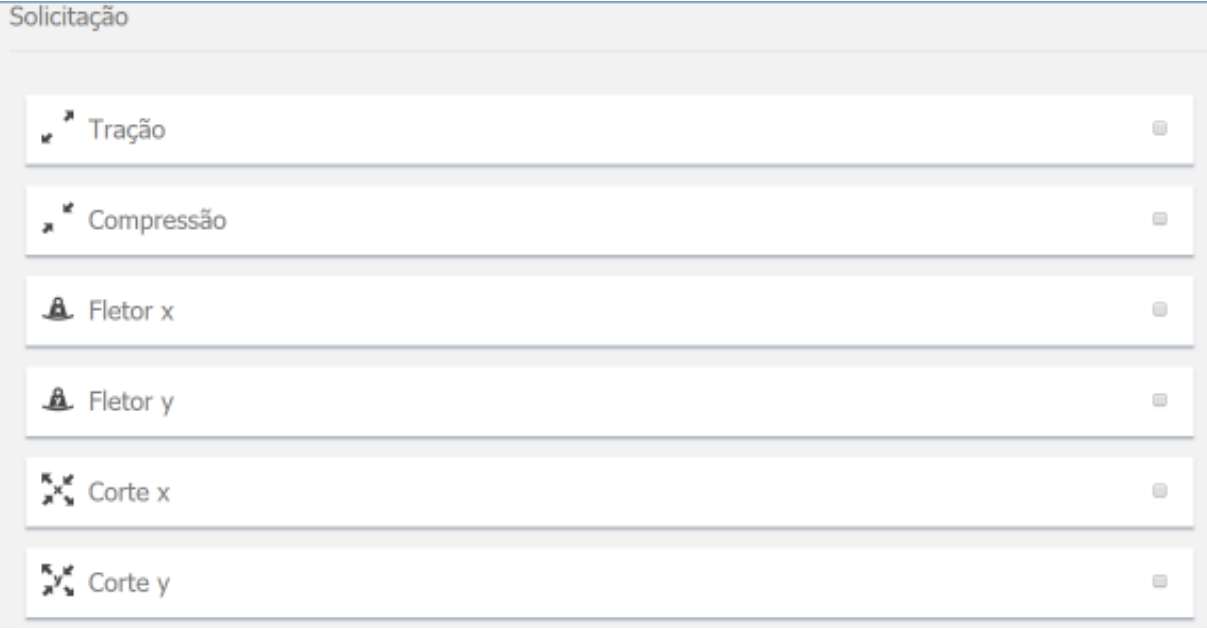


Verificação

Componente	Perfil
Aço	MR 250
Seção	T Soldado
Bitola	5/8 x 1/8"

Figura 3.2 – Aba de verificação do Eiffel

A segunda etapa da utilização do programa está na aba Solicitação, onde o usuário informa as solicitações do perfil, podendo ser tração, compressão, flexão em torno dos eixos x e y e corte nas direções x e y, conforme pode-se ver na Figura 3.3. Essas direções são as mesmas das figuras mostradas nas descrições de cada perfil.



Solicitação







 Tração	<input type="checkbox"/>
 Compressão	<input type="checkbox"/>
 Fletor x	<input type="checkbox"/>
 Fletor y	<input type="checkbox"/>
 Corte x	<input type="checkbox"/>
 Corte y	<input type="checkbox"/>

Figura 3.3 – Aba “Solicitação” do Eiffel

Já no terceiro passo, Resistência, o usuário informa os parâmetros relativos a verificação desejada, de acordo com cada esforço, bem como o tipo de combinação de carregamento utilizado (Normal, Especiais/Construção e Excepcionais), conforme a Figura 3.4. Esse último



parâmetro é responsável pela determinação do valor dos coeficientes de ponderação da resistência utilizados na verificação. Em seguida, basta apertar o botão verde Verificar. Os resultados são apresentados na forma de uma tabela resumo, com a identificação de cada estado-limite analisado para cada esforço, vistos na Figura 3.5. Ainda, há possibilidade de se fazer a análise de esforços combinados, segundo o item 5.5.1 da norma, acionando a verificação na parte inferior. Ao final do processo, o programa permite a geração de um relatório em .pdf com os dados utilizados e resultados encontrados, ilustrado na Figura 3.6. Os casos que não forem contemplados por determinada análise apresentarão o resultado “N/A”.

### **Esforços de tração**

As análises são feitas conforme o item 2.1.1.

Dados fornecidos pelo usuário

Dado 1 –  $L$  (cm) - comprimento destravado;

Dado 2 –  $A_n$  (cm<sup>2</sup>) – área líquida;

Dado 3 –  $C_t$  – coeficiente de redução da área líquida;

Dado 4 –  $A_{vn}$  (cm<sup>2</sup>) – área líquida sujeita à cisalhamento;

Dado 5 –  $A_{nt}$  (cm<sup>2</sup>) – área líquida sujeita à tração;

Dado 6 –  $A_{gv}$  (cm<sup>2</sup>) – área bruta sujeita ao cisalhamento

### **Esforços de compressão**

As análises são feitas conforme o item 2.1.2

Dados fornecidos pelo usuário

Dado 1 –  $L_x$  (cm) – Comprimento da peça no plano xy;

Dado 2 –  $L_y$  (cm) – Comprimento da peça no plano xz;

Dado 3 –  $L_z$  (cm) – Comprimento da peça;

Dado 4 –  $K_x$  – coeficiente de flambagem por flexão em torno do eixo x;

Dado 5 –  $K_y$  – coeficiente de flambagem por flexão em torno do eixo y;

Dado 6 –  $K_z$  – coeficiente de flambagem por torção;

Uma particularidade nesse caso diz respeito ao cálculo dos perfis cantoneira, tanto em abas iguais quanto abas desiguais. Aqui, há a necessidade de que o usuário avalie o item da NBR

8800 (2008) - E.1.4 – Cantoneiras simples conectadas por uma aba. Nesse caso em particular, basta o preenchimento dos itens “Lx” e “Kx” do Eiffel, calculados conforme o item citado.

### **Esforços de flexão em x**

Primeiramente, é verificado se o perfil é laminado ou soldado e se a alma é esbelta ou não (esse último caso só vale para seções I e H soldadas). Para perfis soldados de alma não-esbelta, são verificados os casos de flambagem lateral com torção, flambagem local da mesa, flambagem local da alma, validade elástica, ruptura da mesa tracionada e flambagem local da parede do tubo. Evidentemente, nem todos os casos são aplicados a todas as seções. No caso dos perfis T, há a possibilidade

Dados fornecidos pelo usuário

Dado 1 –  $L_b$  (cm) – comprimento destravado;

Dado 2 –  $C_b$  – fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme, conforme detalhado pelos itens 5.4.2.3, 5.4.2.4 e 5.4.2.5 da norma;

Dado 3 –  $a$  (cm) – distância entre enrijecedores transversais ( $a = L_b$  quando não houver enrijecedores)

Dado 4 –  $A_{fn}$  (cm<sup>2</sup>) – área líquida da mesa tracionada

### **Esforços de flexão em y**

A flexão em torno do eixo  $y$  tem particularidades em cada perfil. Nos casos das seções T e tubular circular, essa aba não terá nenhuma aplicação, uma vez que a seção T não trabalha sob condições usuais a flexão em torno do eixo  $y$ , e no caso da tubular circular, dado que possui simetria em qualquer que seja o eixo que passe por seu centro geométrico, no caso de aplicação de dois ou mais momentos fletores, basta fazer sua soma vetorial e utilizar a aba “**Esforço de flexão em x**”.

Dados fornecidos pelo usuário

Dado 1 –  $A_{fn}$  (cm<sup>2</sup>) – área líquida da mesa tracionada

### Esforço cortante na direção x

Os perfis submetidos a esforço cortante são verificados quanto aos estados-limites de escoamento e flambagem.

Nenhum dado é fornecido pelo usuário

### Esforço cortante na direção y

Os perfis submetidos a esforço cortante são verificados quanto aos estados-limites de escoamento e flambagem.

Dados fornecidos pelo usuário

Dado 1 –  $k_v$ - parâmetro de flambagem de cisalhamento

Compressão Verificar

Combinação: Normal

Lx [cm]: 100,00

Ly [cm]: 100,00

Lz [cm]: 100,00

Kx: 1,00

Ky: 1,00

Kz: 1,00

Figura 3.4 – Aba “Resistência” do Eiffel. Nesse caso, foi escolhido o esforço de compressão

### Resumo

Estado Limite	Valor Projeto	Valor Admissível	Segurança (%)	Status
Esbeltez	212.13	200	-5.72	✘
Flambagem	109	3.15	-96.85	✘

Figura 3.5 – Quadro com o resumo da verificação dos ELU's

## Compressão

### Parâmetros

- Area (área bruta da seção transversal) = 76.6 cm<sup>2</sup>
- Kx (coeficiente de flambagem por flexão em x) = 1.00
- Ky (coeficiente de flambagem por flexão em y) = 1.00
- Kz (coeficiente de flambagem por torção) = 1.00
- Lx (comprimento da peça no plano yz) = 250.00 cm
- Ly (comprimento da peça no plano xz) = 250.00 cm
- Lz (comprimento da peça) = 250.00 cm
- fy (resistência ao escoamento do aço) = 30 kN/cm<sup>2</sup>
- d (altura total da seção transversal) = 168.3 mm
- bf (largura da mesa) = 0 mm
- tf (espessura da mesa) = 0 mm
- tw (espessura da alma) = 16 mm
- h (altura da alma) = 0 mm
- hw (altura da alma do perfil laminado) = 0 mm
- Ix (momento de inércia no eixo x) = 2244 cm<sup>4</sup>
- Iy (momento de inércia no eixo y) = 2244 cm<sup>4</sup>
- Cw (constante de empenamento da seção transversal) = 0 cm<sup>6</sup>
- J (constante de torção) = 4488 cm<sup>4</sup>
- ya1 (coeficiente de ponderação das resistências) =
- NSd (esforço axial solicitante de cálculo) = 2000.00 kN

### Resumo

Estado Limite	Valor Projeto	Valor Admissível	Segurança (%)	Status
Esbeltez	46.19	200	333	OK
Flambagem	2000	1823.97	-8.8	Não OK

Figura 3.6 – Relatório .pdf gerado pelo Eiffel

## Capítulo 4

### 4 Aplicação

Para demonstrar o funcionamento do programa será demonstrado a resolução de um problema. Verificar se a coluna a seguir atende aos parâmetros da NBR 8800 (2008), sob esforço de compressão, conforme mostrado na Figura 4.1. As Figura 4.2, Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5 mostram o preenchimento dos parâmetros do problema no Eiffel.

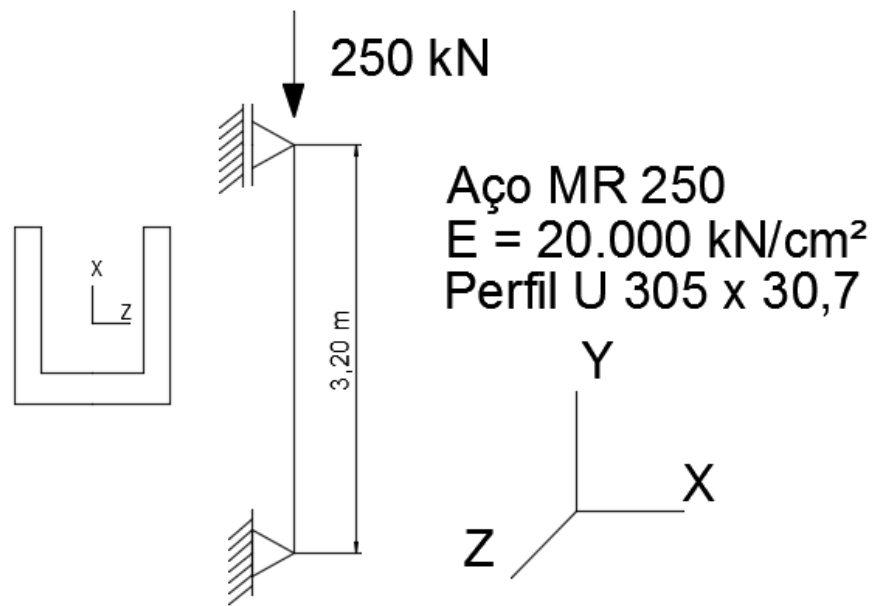


Figura 4.1 - Exemplo para aplicação. Considerar todos os  $K$ 's iguais a 1

Verificação

Componente	Perfil
Aço	MR 250
Seção	U Laminado
Bitola	C 305 x 30,7

Figura 4.2 - Preenchimento da aba de verificação do Eiffel para o exemplo

Compressão

Nsd [kN] : 250,00

Figura 4.3 - Preenchimento da aba de solicitação do Eiffel para o exemplo

**Compressão** Verificar

---

Combinação:

---

Lx [cm]:

---

Ly [cm]:

---

Lz [cm]:

---

Kx:

---

Ky:

---

Kz:

---

Figura 4.4 - Preenchimento da aba de resistência do Eiffel para o exemplo

#### Resumo

Estado Limite	Valor Projeto	Valor Admissível	Segurança (%)	Status
Esbeltez	157,65	200	26,86	OK
Flambagem	250	247,59	-0,96	Não OK

Figura 4.5 - Resultado da análise pelo Eiffel

## Capítulo 5

### 5 Conclusão

Através do trabalho apresentado, foram feitas atualizações no software Eiffel, que tem como objetivo auxiliar na verificação de perfis de aço a esforços usuais de projeto (tração, compressão, flexão e corte). Além do perfil I simétrico, foram adicionados os perfis U, T, cantoneira de abas iguais e desiguais, tubular retangular e tubular circular. Aproveitou-se da forma como o software fora programado para generalizar seu uso para as seções mencionadas, apresentando os resultados relativos aos estados-limites correspondentes em cada caso e fornecendo ao usuário a informação de que os critérios da norma brasileira NBR 8800 estão sendo atendidos ou não. Pode-se observar também que, em alguns dos casos, não há aplicabilidade de um determinado estado limite ou mesmo dos esforços em questão, como no caso de análise de flexão para cantoneiras. O software tem plena aplicação acadêmica para o curso de estruturas de aço, podendo ser uma ferramenta importante para estudantes no auxílio do aprendizado dessa disciplina. Além disso, também pode ter aplicação comercial, uma vez que estruturas de aço representam uma parcela considerável dos projetos de engenharia no país. Contudo, necessitaria de uma melhora no design e no código da página web. Como sugestões para futuros trabalhos, pode-se citar a adição de perfis formados por dupla cantoneira, por exemplo. Além disso, são reservadas duas abas no programa para cálculo de ligações soldadas e parafusadas. No que diz respeito aos esforços, poderiam ser adicionados solicitações como o momento torçor. Adicionalmente, poderia ter uma interface em que o usuário geraria os diagramas de esforços de uma determinada peça em análise antes da utilização do Eiffel, da forma como está concebido hoje, para facilitar e agilizar o cálculo.

## Referências

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

GUANABARA, M.K., **Dimensionamento de estruturas metálicas: rotina computacional para seleção de perfis metálicos**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC 2009

SILVA, N.C et al., **AutoMetal**, versão 4.1, Programa educacional para facilitar os projetos de estruturas metálicas no curso de engenharia civil. 2003. Disp. em [http://www.ecivilnet.com/software/visualmetal\\_perfis\\_laminados\\_soldados.htm](http://www.ecivilnet.com/software/visualmetal_perfis_laminados_soldados.htm).

TEIXEIRA, Felipe de Araújo Pineschi. **Um programa para verificação de perfis de aço sob esforços usuais de projeto**. 2015. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

NETO, A. B.; FERREIRA, W.G. **Dimensionamento de elementos de perfis de aço laminados e soldados: com exemplos numéricos**. 3.ed. Vitória: GSS 2015



FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
<b>CDU:624.072.2</b>			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 27 de novembro de 2017	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-159/2017	4. N° DE PÁGINAS 57
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Aperfeiçoamento de programa para verificação de perfis de aço sob esforços usuais de projeto (Eiffel).			
6. AUTOR(ES): <b>Iago Belarmino Lucena</b>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Dimensionamento 2. Verificação. 3. Estruturas de aço; perfis de aço; Aço; Perfis; Laminados; Soldados; Estruturas metálicas; Engenharia Civil; tração; flexão; cortante; compressão			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Estruturas de aço; Laminados; Compressão; Estruturas metálicas; Aços; Engenharia estrutural.			
10. APRESENTAÇÃO: <b>X Nacional</b> <b>Internacional</b> ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Francisco Alex Correia Monteiro. Publicado em 2017.			
11. RESUMO:  O trabalho consiste no aperfeiçoamento do programa Eiffel, ferramenta de uso educacional no estudo de estruturas metálicas, desenvolvido no ITA por Felipe de Araújo Pineschi Teixeira em 2015 como seu trabalho de graduação, onde foi implementado a verificação dos estados-limites últimos de perfis I laminados e soldados duplamente simétricos, para esforços de tração, compressão, flexão e cortante. Com o aprimoramento, os perfis em T, U simétrico, cantoneira de abas iguais, cantoneira de abas desiguais, tubular retangular e tubular circular foram adicionados no programa, tendo como base as recomendações da norma brasileira NBR 8800 (2008).			
12. GRAU DE SIGILO:  <b>(X) OSTENSIVO</b> <b>( ) RESERVADO</b> <b>( ) SECRETO</b>			