

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

Leandro Arns Gonzales

**VERIFICAÇÃO DE PERFIS U FORMADOS A FRIO POR
COMPUTADOR**

Porto Alegre
Dezembro 2016

LEANDRO ARNS GONZALES

**VERIFICAÇÃO DE PERFIS U FORMADOS A FRIO POR
COMPUTADOR**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Ruy Carlos Ramos de Menezes

Porto Alegre
Dezembro 2016

LEANDRO ARNS GONZALES

**VERIFICAÇÃO DE PERFIS U FORMADOS A FRIO POR
COMPUTADOR**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2016

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes
Dr. Techn. pela Universitaet Innsbruck, Áustria
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes(UFRGS)
Dr. Techn. pela Universitaet Innsbruck, Áustria

Prof. Felipe Schaedler Almeida (UFRGS)
Doutor em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Gladimir Grigoletti(UFRGS)
Dr. Pelo PROMEC

Dedico este trabalho a minha mãe Cristina, meus irmãos Alexandre e Gerda, a minha namorada Tatiane, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação e sempre estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes, orientador deste trabalho, pela ajuda, incentivo, dedicação e ensinamentos.

Agradeço à minha família pela atenção e suporte.

Agradeço à minha namorada, Tatiane Righi Scaramussa, pela ajuda, incentivo e suporte.

Agradeço ao meu colega de trabalho Diogo Valls pelo apoio e suporte.

Aerials, in the sky
When you loose small mind
You free your life

Daron Malakian / Serj Tankian

RESUMO

Estruturas metálicas propiciam uma maior velocidade de execução e menores desperdícios de materiais do que estruturas de concreto armado. Um diferencial das estruturas de perfis formados a frio, com relação aos perfis metálicos robustos, é que apresentam uma maior facilidade de manuseio e fabricação. O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, um programa, que auxilie os profissionais que trabalham com o desenvolvimento de projetos de estruturas metálicas de perfis formados a frio na verificação das resistências dos perfis U. O programa irá apresentar as propriedades geométricas da seção, suas resistências à compressão, tração, cisalhamento e flexão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Representação dos perfis pelo Método Simplificado	21
Figura 2– Representação de Placa isolada simplesmente apoiada.	23
Figura 3– Distribuição de tensões	24
Figura 4 – Elemento comprimido com enrijecedor de borda simples.....	30
Figura 5 – Flambagem Distorcional em barras Isoladas	33
Figura 6– Relação Cortante/Esbeltez	36
Figura 7– Coeficiente de flambagem conforme vinculação.....	41
Figura 8– Tela inicial do programa.	48
Figura 9 – Dados e entrada.....	49
Figura 10– Apresentação dos Resultados.....	50
Figura 11 – Notificação dos valores limites	51
Figura 12– Notificação de Flambagem Distorcional.....	52
Figura 13 – Menu	53
Figura 14 – Fluxograma do programa	54
Figura 15– Resultados da verificação a tração	56
Figura 16– Exercício proposto.	57
Figura 17 – Verificação dos resultados	59
Figura 18 – Validação da compressão com Carvalho, Grigoletti e Barbosa.....	60
Figura 19 – Validação da flexão com Carvalho, Grigoletti e Barbosa.....	61
Figura 20 – Validação a força cortante com Carvalho, Grigoletti e Barbosa.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Largura efetiva e coeficiente de flambagem local para elementos AA	27
Tabela 2 – Largura efetiva e coeficiente de flambagem local para elementos AL	28
Tabela 3– Valores máximos de elementos de uma seção.....	31
Tabela 4– Valores mínimos da relação D/bw de barras com seção U enrijecido e seção Z enrijecido submetidas à compressão centrada, para dispensar a verificação da flambagem distorcional	34
Tabela 5– Valores mínimos da relação D/bw de seções do tipo U enrijecido e Z enrijecido sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia, para dispensar a verificação da flambagem distorcional	34
Tabela 6 – Resumo dos Resultados	63

LISTA DE SIGLAS

PFF – Perfis formados a frio

MLE – Metodo da Larguras Efetivas

AA - elemento simplesmente apoiado nas duas extremidades

AL - elemento com um lado apoiado e outro como borda livre

LISTA DE SÍMBOLOS

E – módulo de elasticidade do aço, adotado igual a 200 000 MPa

A – área bruta da seção (cm^2)

f_y – tensão de escoamento do aço.

b_c – largura da região comprimida do elemento

b_{ef} – largura efetiva

t – espessura do elemento

σ – tensão normal de compressão atuante

K – coeficiente de flambagem local

σ_{cr} – tensão convencional de flambagem elástica do elemento

γ – coeficiente de ponderação.

r – raio de giração da seção.

L - comprimento destravado da barra.

KL - comprimento efetivo de flambagem da barra.

χ – fator de redução da força axial de compressão resistente decorrente da instabilidade global.

χ_{FLT} – fator de redução associado a instabilidade lateral com torção

λ_0 – índice de esbeltez reduzido

A_{ef} – Área efetiva da seção

N_e – força axial de flambagem global elástica

C_w - constante de empenamento da seção

G – modulo de elasticidade transversal

J – constante de torção da seção

r_x – raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal de inércia x .

r_y - raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal de inércia y

y_o – distância do centro de torção ao centroide, na direção do eixo principal de inércia x .

x_o – distância do centro de torção ao centroide, na direção do eixo principal de inércia y .

r_o – raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento da seção.

W_{ef} – é o módulo de resistência elástico da seção efetiva

W_{cef} – é o modulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra mais comprimida da seção.

M_e – é o momento fletor crítico de flambagem lateral com torção

h – é a altura da parte plana da alma

k_v – é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento

C_b – é o fator de modificação para diagrama de momentos fletores não uniformes

a – é a distância entre enrijecedores transversais de alma

M_{sd} – é o momento fletor solicitante

M_{rd} – é o momento fletor resistente.

V_{sd} – é a força cortante solicitante

V_{rd} – é a força cortante resistente.

R_d – força resistente.

S_d – solicitação de projeto.

U_e – Perfil U enrijecido Formado a Frio

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	DIRETRIZES DE PESQUISA.....	17
2.1	Questão da Pesquisa.....	17
2.2	Objetivos da Pesquisa.....	17
2.2.1	Objetivo Principal.....	17
2.2.2	Objetivo Secundário.....	17
2.3	Pressuposto.....	17
2.4	Delimitações.....	18
2.5	Limitações.....	18
2.6	Delineamento.....	18
3	PERFIS FORMADOS A FRIO.....	20
3.1	Materiais.....	20
3.2	Cálculo das Características Geométricas.....	20
3.3	Efeito do Dobramento na Resistência ao Escoamento.....	21
3.4	Método das Larguras Efetivas.....	22
3.4.1	Conceito de MLE:.....	22
3.4.2	Condições de contorno:.....	24
3.4.3	Cálculo das Larguras Efetivas.....	24
3.5	Elementos Comprimidos com Enrijecedor de Borda.....	29
3.6	Valores Limites.....	31
3.7	Flambagem Local.....	31
3.8	Flambagem Distorcional.....	32
3.9	Flambagem Global.....	35
3.10	Resistência da Alma.....	35
4	VERIFICAÇÃO.....	37
4.1	Barras Tracionadas.....	37

4.2	Barras Comprimidas	38
4.2.1	Devido à Instabilidade da Barra por Flexão, Torção ou Flexo-Torção	38
4.2.2	Devido à Instabilidade Distorcional	42
4.3	Barras Submetidas à Flexão Simples	42
4.3.1	Escoamento da fibra mais tracionada da seção Efetiva	42
4.3.2	Instabilidade Lateral com Torção	42
4.3.3	Instabilidade por Distorção da Seção Transversal	44
4.4	Força Cortante	44
4.5	Momento Fletor e Força Cortante Combinados	45
5	O PROGRAMA	47
5.1	C#	47
5.2	Tela Principal	47
5.2.1	Entrada de Dados:	48
5.2.2	Impressão dos resultados	49
5.2.3	Botões do Menu	52
5.3	Fluxo do Programa	53
5.4	Validação de Resultados	55
5.4.1	Validação com Silva, Pierin e Pignatta	55
5.4.2	Validação com Carvalho, Grigoletti e Barbosa	59
5.4.3	Resumo da Validação dos Resultados	62
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64

1 INTRODUÇÃO

Os perfis formados a frio (PFF) apresentam diversas vantagens quando em comparação a outros materiais construtivos, como concreto armado e perfis laminados. De acordo com Silva, Pierin e Pignatta. (2014, pg. 14) estes elementos estruturais proporcionam também uma maior velocidade de execução do que as edificações em concreto, apresentam também uma construção com menor desperdício de materiais e são econômicos na sua fabricação. Ainda, de acordo com os referidos autores, possuem alta eficiência estrutural para edificações de pequeno porte, coberturas, mezaninos, casas populares, entre outros.

Conforme Carvalho, Grigoletti e Barbosa. (2014, p. 41) a produção de um PFF é de baixo custo em comparação ao de um Perfil Laminado, por ser composto por chapas finas, os PFF's possuem maior leveza, o que proporciona uma maior facilidade de fabricação, manuseio e de transporte, pois, devido ao seu menor peso, não necessitam de grandes maquinários para o seu içamento.

De acordo com Silva, Pierin e Pignatta (2014 p. 14) “para o dimensionamento desse elemento é necessário conhecer seu comportamento estrutural, pois por ser constituído de perfis com seções abertas e de pequena espessura, existe barras que possuem baixa resistência a torção, podendo causar problemas de instabilidade, deformações excessivas ou atingir os limites da resistência do aço devido a esforços de torção, susceptibilidade esta que pode se tornar crítica caso a estrutura não seja projetada adequadamente. É necessário entender o empenamento nessas estruturas, assim como a distorção da seção transversal”.

Para a verificação de uma única seção de PFF é necessário uma grande quantidade de cálculos iterativos de suas propriedades geométricas para a obtenção de sua resistência de projeto.

No Capítulo 2 do presente trabalho será apresentado as diretrizes e os objetivos do trabalho. O Capítulo 3 apresentara alguns conceitos para realizar as verificações dos PFF assim como algumas de suas características. O Capítulo 4 irá apresentar as etapas de cálculo para a obtenção das resistências de projeto das seções de PFF, conforme a NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010).

2 DIRETRIZES DE PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho serão descritas a seguir nos próximos itens.

2.1 Questão da Pesquisa

Temos como questão de pesquisa do trabalho: é possível criar um programa para realizar a verificação das resistências dos perfis U formados a frio?

2.2 Objetivos da Pesquisa

Os objetivos da pesquisa se classificam em objetivos principais e objetivos secundários, os quais serão descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é a criação de um programa computacional capaz de realizar a verificação das resistências dos perfis U metálicos formados a frio.

2.2.2 Objetivo Secundário

O objetivo secundário do trabalho é a criação da memória de cálculo para o perfil verificado, para que o usuário possa realizar a conferência, interpretação e documentação dos cálculos.

2.3 Pressuposto

O trabalho tem por pressuposto que a utilização do método das larguras efetivas (MLE), que será apresentado no capítulo 3 deste trabalho, proposto pela NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) são viáveis para a verificação das resistências de perfis U formados a frio.

2.4 Delimitações

As delimitações do trabalho são as seguintes citadas:

- a) O trabalho delimita-se a verificação de resistências de seções dos perfis U simples e U enrijecido formados a frio, que estão contidos na NBR 6355 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).
- b) Devido a falta de tempo hábil, o programa não realizara análises de estabilidade elástica das seções, que é necessário para a verificação a flambagem distorcional. Em substituição a isso será utilizado relações limites que são apresentadas no capítulo 3.8 deste trabalho.
- c) Para o desenvolvimento do programa computacional será utilizado o software *Visual Studio*, utilizando linguagem C#.

2.5 Limitações

As limitações do trabalho são as seguintes citadas:

- a) Não será realizado a verificação da região de ligações nos perfis, ou da seção líquida proveniente de ligações no perfil.
- b) Não serão considerados a existência de enrijecedores transversais nos perfis a serem verificados.
- c) São válidos apenas momentos fletores com mesma direção e sentido que os eixos locais do perfil.
- d) Devido à complexidade de equacionamento para obtenção das propriedades geométricas de perfis assimétricos, o presente trabalho se limitará a verificação de seções monossimétricas, sendo estas as seções U simples e U enrijecido.

2.6 Delineamento

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir que serão descritas nos próximos parágrafos.

- a) Pesquisa bibliográfica;
- b) Desenvolvimento dos modelos de cálculo;
- c) Desenvolvimento do programa;

- d) Verificação de resultados;
- e) Considerações finais.

A pesquisa bibliográfica tem por finalidade desenvolver o embasamento teórico do assunto, utilizando como base normas técnicas e livros referentes ao assunto. Esta etapa, por ser uma etapa de extrema importância, se encontra presente durante todo o desenvolvimento do trabalho para garantir a validade deste.

Na etapa de desenvolvimento de modelos de cálculos, será realizado fluxogramas do cálculo tanto das propriedades geométricas quanto da obtenção das resistências das seções, pois cada seção apresenta diferenças entre si, criando a necessidade de algoritmos adaptados para cada caso.

Na etapa do desenvolvimento do programa consiste em realizar a tradução da linguagem matemática para a linguagem de programação que será utilizada.

A etapa de verificação de resultados se destina a realizar a conferência dos resultados obtidos pelo programa a ser desenvolvido neste trabalho com os resultados obtidos em exercícios propostos pelos autores, Carvalho, Grigoletti e Barbora. (2014) e Silva, Pierin e Pignatta (2014).

3 PERFIS FORMADOS A FRIO

Neste capítulo serão apresentados algumas características dos perfis formados a frio, assim como alguns conceitos para que se possa realizar a verificação das suas resistências.

3.1 Materiais

As estruturas de aço devem ser compostas por aços com qualificação estrutural e que possuam as propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. A NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p.12) diz:

“Devem apresentar a relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento f_u/f_y maior ou igual a 1,08 e o alongamento após ruptura não deve ser menor que 10 % para base de medida igual a 50 mm ou 7 % para base de medida igual a 200 mm, tomando-se como referência os ensaios de tração conforme ASTM A370.”

Conforme Yu e LaBoube (2010, tradução nossa) “os efeitos de trabalho a frio em elementos de aço depende enormemente da relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento do material virgem”.

3.2 Cálculo das Características Geométricas

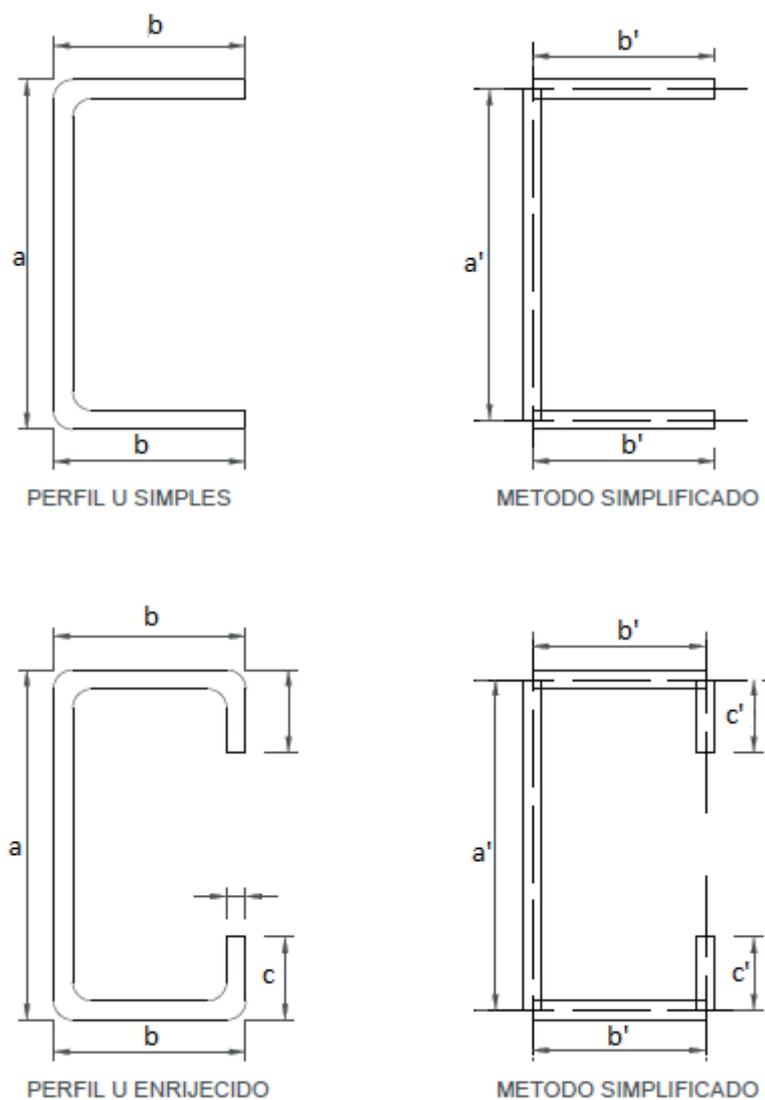
Para a definição das propriedades geométricas, como o momento de inercia, módulo de resistência elástico e a distância do baricentro será utilizado o Método Simplificado, sobre o qual Carvalho, Grigoletti e Barbosa. (2014, p. 54) dizem

“O método simplificado [...] consiste em se considerar perfis com cantos vivos, desconsiderando-se, no cálculo das características geométricas, as intersecções dos elementos (esquinas) dos perfis.”

O Método Simplificado é um método aproximado, o qual oferece resultados muito próximos e também de fácil uso. E de acordo com Carvalho, Grigoletti e Barbosa. (2014, p. 54), em alguns casos proporciona respostas mais precisas que o Método Linear. O método será necessário principalmente para os cálculos das propriedades geométricas efetivas da seção, que podem sofrer alterações de acordo com a solicitação atuante no perfil. Por exemplo, no caso da solicitação à flexão, pode ocorrer uma mudança da efetividade da seção do perfil, conseqüentemente alterando o seu momento de inércia e

também seu módulo de resistência elástica, que possuem influência direta na verificação da resistência do perfil. A Figura 1 ilustra como se representa a obtenção destas medidas para os perfis U simples e U enrijecido. Em que as medidas a , b e c são as medidas da seção real e as medidas a' , b' e c' são as medidas do Método Simplificado

Figura 1– Representação dos perfis pelo Método Simplificado



(Fonte: elaborado pelo autor)

3.3 Efeito do Dobramento na Resistência ao Escoamento

Ao dobrar uma chapa, seja utilizando uma dobradeira ou por perfilação, ocorre um aumento tanto da resistência ao escoamento, quanto da resistência à ruptura e também

uma redução da ductilidade no local da dobra, este fenômeno é conhecido como encruamento. De acordo com Yu e LaBoube (2010, p.37, tradução nossa):

“[...] como os cantos, as regiões das dobras, são trabalhados a frio com maior intensidade do que as regiões planas, as propriedades mecânicas são diferentes em diversas partes da seção, sendo assim o fenômeno de flambagem ou ruptura, sempre começará na região plana, em razão desta possuir menor resistência, e qualquer carga adicional aplicada na seção se espalhará para as dobras”.

3.4 Método das Larguras Efetivas

Para realizar a verificação dos PFF pode-se utilizar os seguintes métodos:

- a) Método da Resistência Direta: sobre o método Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014 p. 317) dizem:

“Este método consiste, basicamente, em utilizar curvas de resistências ajustadas experimentalmente para calcular as forças de colapso, a partir da força de flambagem elástica de todo o perfil, e não do elemento isolado.”

- b) Método da Seção Efetiva: sobre o qual Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014 p. 317) diz ser uma parametrização do Método da Resistência Direta.
- c) Método das Larguras Efetivas (MLE): no qual adota-se como modelo de verificação a análise de placas isoladas entre si, totalmente ou parcialmente comprimidas, cada uma servindo como vinculação para a placa vizinha, utilizando o conceito de resistência pós flambagem, da qual Yu e LaBoube (2010, p.62, tradução nossa) dizem:

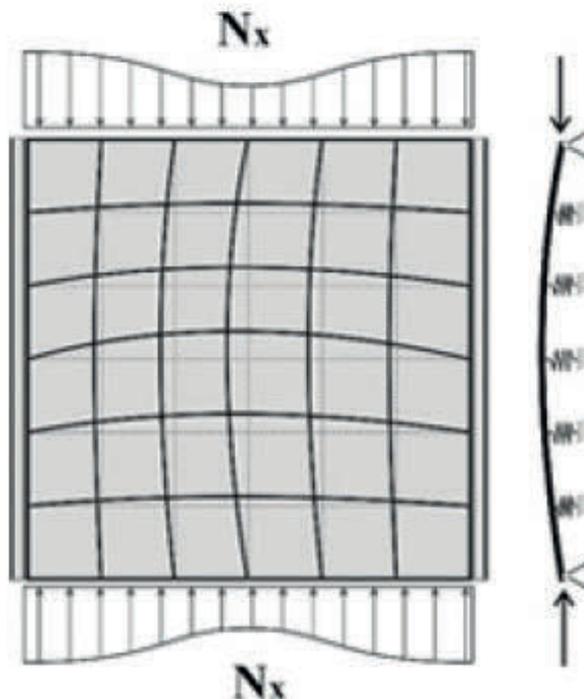
“Diferentemente de elementos estruturais unidimensionais como as colunas, elementos enrijecidos submetidos a compressão não irão colapsar quando a tensão crítica de flambagem for atingida. Uma carga adicional pode ser suportada por um elemento após sua flambagem, através da redistribuição de tensões. Este fenômeno é conhecido como resistência pós flambagem e é mais aparente em elementos com grande relação entre largura/espessura”

3.4.1 Conceito de MLE:

No método das larguras efetivas, a flambagem local dos elementos é considerada por meio de propriedades geométricas efetivas (reduzidas) da seção transversal da barra. Para

tal se realiza a análise de cada elemento da seção como placas isoladas simplesmente apoiadas. Conforme mostra a Figura 2

Figura 2– Representação de Placa isolada simplesmente apoiada.



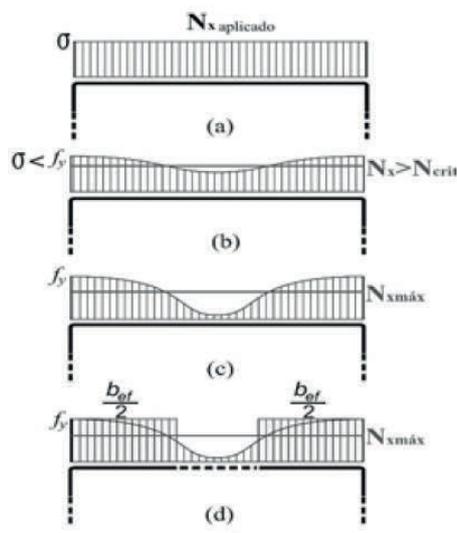
(Fonte: Silva, Pierin e Pignatta, 2014 p. 25)

Realizando a análise de placas comprimidas Yu e LeBoube (2010, p.62, tradução nossa) dizem:

“A distribuição de tensões na placa é uniforme antes da sua flambagem. Após a sua flambagem, uma parte das tensões iniciais, do centro da placa, se transferem para as extremidades da placa. Resultando em uma distribuição não uniforme de tensões. A redistribuição de tensões continua até que as tensões nas extremidades atinjam a tensão de escoamento do material, e então, o a placa começa a colapsar”

O conceito de larguras efetivas consiste em substituir o diagrama da distribuição de tensões não uniformes por dois trechos de distribuição de tensões uniformes, desconsiderando a parte central do elemento, já flambada (ver Figura 3d).

Figura 3– Distribuição de tensões



(Fonte: Silva, Pierin e Pignatta, 2014 p. 26)

Conforme a NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 4) “a largura efetiva é a largura de um elemento, reduzida para efeito de projeto devida a flambagem local”.

3.4.2 Condições de contorno:

Há dois tipos de condições de contorno, condição AA, elemento simplesmente apoiado, e a condição AL, elemento com um lado sendo borda livre, que reduz significativamente a capacidade resistente. Enrijecedores de borda simples são constituídos de elementos AL, que devem possuir rigidez suficiente para servir como apoio sem comprometer a estabilidade da mesa enrijecida. O coeficiente de flambagem, k , quantifica as diversas condições de contorno e de carregamento das chapas, apresentados nas Tabelas 1 e 2.

3.4.3 Cálculo das Larguras Efetivas

De acordo com o item 9.2.2.1 da NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) Para a definição das larguras efetivas dos elementos AA pode ser realizado de forma semelhante aos elementos AL:

$$b_{ef} = \frac{b_c \times (1 - \frac{0,22}{\lambda_p})}{\lambda_p} \leq b \quad (\text{eq. 3.1})$$

Onde o índice de esbeltez reduzido (λ_p) é dado pela equação:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}} = \frac{b/t}{0,95 \times \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}} \quad (\text{eq. 3.2})$$

Para $\lambda_p \leq 0,673$, tem-se $b_{ef} = b$, para valores acima de 0,673, utiliza-se a equação 3.1.

Em que:

b_c – largura da região comprimida do elemento

b_{ef} – largura efetiva

t – espessura do elemento

E – módulo de elasticidade do aço = 20.000 kN/cm²

k – coeficiente de flambagem local

σ_{cr} – tensão crítica de flambagem elástica do elemento, dado por:

$$\sigma_{cr} = k * \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2} \quad (\text{eq. 3.3})$$

ν – é o coeficiente de Poisson do aço, adotado igual a 0,3

σ – é a tensão normal de compressão conforme a NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 27) é:

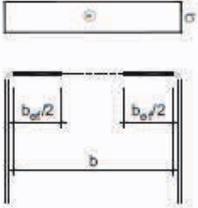
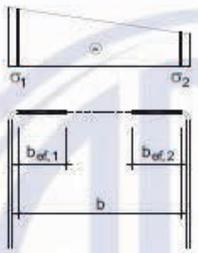
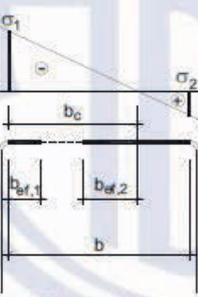
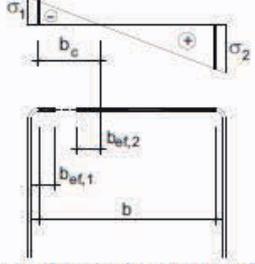
- a) Estado-limite último de escoamento da seção: Para cada elemento totalmente ou parcialmente comprimido, σ é a máxima tensão de compressão, calculada para a seção efetiva, que ocorre quando a seção atinge o início do escoamento. Se a máxima tensão for de tração, σ pode ser calculada admitindo-se distribuição linear de tensões. A seção efetiva, neste caso, deve ser determinada por aproximações sucessivas.
- b) Estado-limite último de instabilidade da barra: Se a barra for submetida à compressão, $\sigma = \chi \times fy$, sendo χ , o fator de redução da força axial de compressão

resistente, associado à flambagem global, conforme o item 9.7.2 da NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010). Se a barra for submetida à flexão, $\sigma = \chi_{FLT} \times fy$, sendo χ_{FLT} o fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção.

Pode-se verificar pela equação 3.2 a relação inversa da tensão atuante na chapa, σ , e a efetividade da seção, ou seja, quanto maior a tensão atuante, menor será a largura efetiva do elemento, quanto menor a tensão atuante, maior a largura efetiva do elemento.

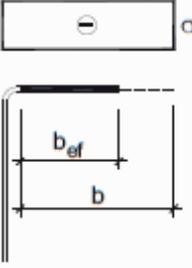
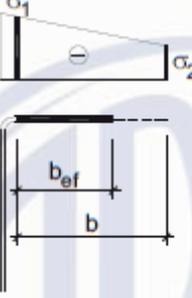
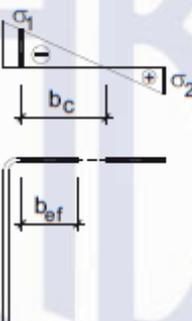
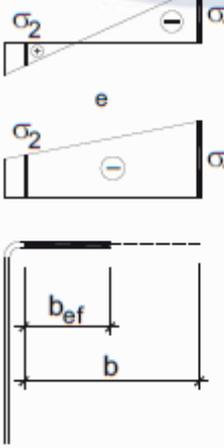
O coeficiente de flambagem, k , e a determinação das larguras efetivas, b_{ef} , dependem das condições de contorno e das condições do carregamento e do elemento, as Tabela 1 e Tabela 2 mostram as equações para determinação de k e b_{ef} para elementos AA e elementos AL, respectivamente.

Tabela 1 – Largura efetiva e coeficiente de flambagem local para elementos AA

Caso a		$k = 4,0$
Caso b		$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3 - \psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2(1 - \psi) + 2(1 - \psi)^3$
Caso c	 <p>A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.</p>	$-0,236 < \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3 - \psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2(1 - \psi) + 2(1 - \psi)^3$
Caso d	 <p>A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.</p>	$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq -0,236$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3 - \psi)$ $b_{ef,2} = 0,5b_{ef}$ sendo $b_{ef,1} + b_{ef,2} \leq b_c$ $k = 4 + 2(1 - \psi) + 2(1 - \psi)^3$
NOTA O sinal (-) indica compressão.		

(Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p.28)

Tabela 2 – Largura efetiva e coeficiente de flambagem local para elementos AL

Caso a		$k = 0,43$
Caso b		$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$ $k = 0,578 / (\psi + 0,34)$
Caso c	 <p data-bbox="454 1254 885 1310">A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.</p>	$-1,0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ $k = 1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$
Caso d		$-1,0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq 1,0$ $k = 0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$
<p>NOTA O sinal (-) indica compressão.</p>		

(Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p.29)

3.5 Elementos Comprimidos com Enrijecedor de Borda

Enrijecedores de borda tem a finalidade de aumentar a capacidade resistente a compressão servindo como apoio “fixo” para elementos esbeltos. Além de servir como apoio, o enrijecedor também se comporta como um elemento AL. Para que ele tenha condições de se comportar como um apoio, ele precisa apresentar uma rigidez mínima. Porém, a utilização de enrijecedores pode tornar a seção mais crítica à flambagem distorcional. O item 9.2.3.1 da NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 30) determina a largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda simples, ilustrados na Figura 4, da seguinte forma:

Para $\lambda_{p0} \leq 0,673$, tem-se que $b_{ef} = b, d_s = d$.

Para $\lambda_{p0} > 0,673$, tem-se que:

$$b_{ef,1} = \left(I_s / I_a \right) \left(b_{ef} / 2 \right) \leq \left(b_{ef} / 2 \right) \quad (\text{eq. 3.4})$$

$$b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1} \quad (\text{eq. 3.5})$$

$$d_s = \left(I_s / I_a \right) d_{ef} \leq d_{ef} \quad (\text{eq. 3.6})$$

Onde:

$$\lambda_{p0} = \frac{b/t}{0,623(E/\sigma)^{0,5}} \quad (\text{eq. 3.7})$$

$$I_s = \frac{td^3 \sin^2 \theta}{12} \quad (\text{eq. 3.8})$$

$$I_a = 399 \times t^4 [0,487 \times \lambda_{p0} - 0,328]^3 \leq t^4 \times [56 \times \lambda_{p0} + 5] \quad (\text{eq. 3.9})$$

I_s – é o momento de inércia da seção bruta do enrijecedor em relação ao eixo que passa pelo seu centroide e é paralelo ao elemento a ser enrijecido. Desconsiderando a região da dobra entre o enrijecedor e o elemento enrijecido. Representado na Figura 4.

I_a – é o momento de inércia de referência do enrijecedor de borda.

b_{ef} é a largura do elemento, calculado conforme 3.4.3, utilizando o valor de k apresentado a seguir:

Para $D/b \leq 0,25$, considerando que $I_s/I_a \leq 1$:

$$k = 3,57 \times (I_s/I_a)^n + 0,43 \leq 4 \quad (\text{eq. 3.10})$$

Para $0,25 < D/b \leq 0,8$:

$$k = (4,82 - 5 \times D/b) \left(I_s/I_a \right)^n + 0,43 \leq 4 \quad (\text{eq. 3.11})$$

$$n = (0,582 - 0,122 \times \lambda_{p0}) \geq 1/3 \quad (\text{eq. 3.12})$$

D – é a dimensão nominal do enrijecedor de borda (Figura 3)

d – é a largura do enrijecedor de borda (Figura 3)

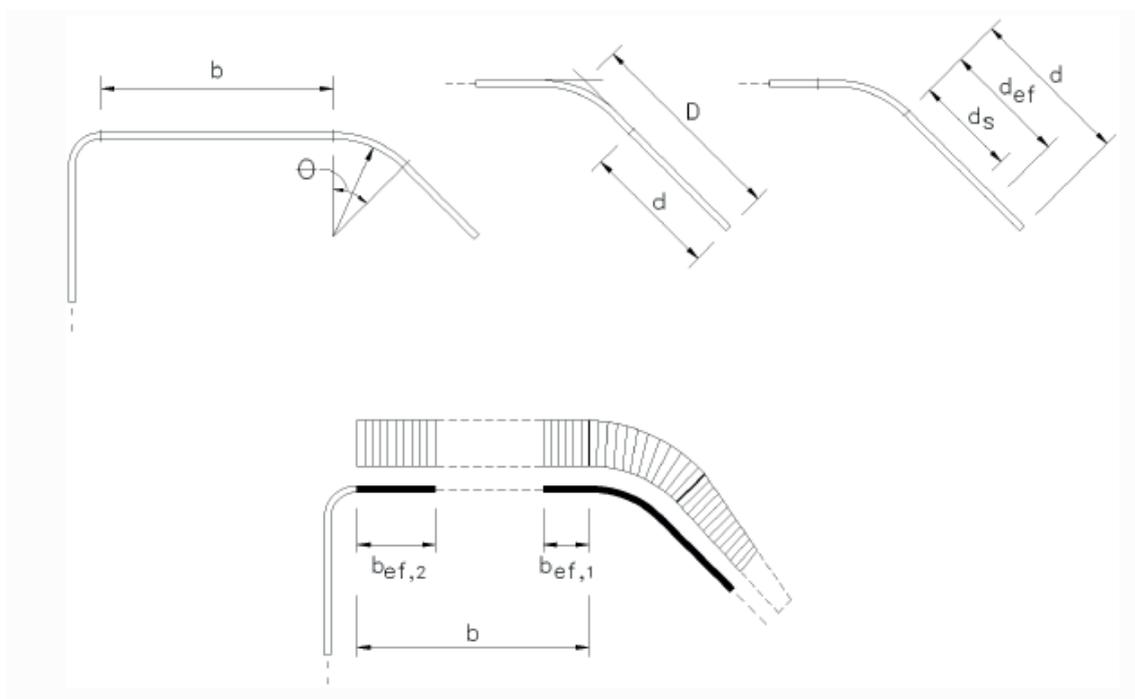
d_{ef} – é a largura efetiva do enrijecedor calculada conforme 3.4.3

d_s – é a largura efetiva reduzida do enrijecedor e adotada no cálculo das propriedades da seção efetiva do perfil

θ – é o ângulo formado pelo elemento e o enrijecedor de borda, que para o presente trabalho será de 90° .

$b_{ef,1}$ e $b_{ef,2}$ – são as parcelas da largura efetiva do elemento (Figura 4)

Figura 4 – Elemento comprimido com enrijecedor de borda simples



(Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p.31)

3.6 Valores Limites

No item 9.1.2 da NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 25), são apresentados valores máximos permitidos da relação largura/espessura dos elementos, desconsiderando enrijecedores intermediários. Estes valores limites são apresentados na Tabela 3. Os itens 9.2.3 e 9.5.1, citados na Tabela 3, são encontrados na NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) e fazem referência aos elementos comprimidos com enrijecedor de borda, abordados neste trabalho no item 3.6 e aos enrijecedores transversais em seções com força concentrada, que não serão abordados neste trabalho. Os valores b e t fazem referência, respectivamente, à largura e a espessura do elemento.

Tabela 3– Valores máximos de elementos de uma seção

Caso a ser analisado	Valor máximo da relação largura-espessura ^a
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma ou mesa e a outra a enrijecedor de borda simples	$(b/t)_{\text{máx}} = 60$ ^b
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma e a outra a mesa ou outro tipo de enrijecedor de borda com $l_s \geq l_a$ conforme 9.2.3	$(b/t)_{\text{máx}} = 90$
Alma de perfis U não enrijecidos sujeita à compressão uniforme	$(b/t)_{\text{máx}} = 90$
Elemento comprimido com ambas as bordas vinculadas a elementos AA	$(b/t)_{\text{máx}} = 500$ ^c
Elemento comprimido AL ou AA com enrijecedor de borda tendo $l_s < l_a$ conforme 9.2.3	$(b/t)_{\text{máx}} = 60$ ^b
Alma de vigas sem enrijecedores transversais	$(b/t)_{\text{máx}} = 200$
Alma de vigas com enrijecedores transversais apenas nos apoios e satisfazendo as exigências de 9.5.1	$(b/t)_{\text{máx}} = 260$
Alma de vigas com enrijecedores transversais nos apoios e intermediários, satisfazendo as exigências de 9.5.1	$(b/t)_{\text{máx}} = 300$
^a b é a largura do elemento; t é a espessura. ^b Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\text{máx}} = 30$. ^c Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\text{máx}} = 250$.	

(Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010)

3.7 Flambagem Local

Devido aos altos valores de relação entre larguras/espessuras nas seções dos PFF, os elementos destas seções podem sofrer a flambagem local. Porém como já é de conhecimento, os elementos que compõe a seção estão sujeitos ao fenômeno da pós-flambagem, sendo assim admite-se que a tensão crítica de resistência para flambagem local, que é a tensão limite que poderá atuar no elemento, é igual a tensão de escoamento

do material, representada pela sigla f_y . O colapso por flambagem local ocorre em um ou mais elementos que formam a seção e se apresenta como ondulações nos elementos de uma seção comprimida. A determinação da resistência da seção a flambagem local se dá com base no MLE, utilizando como valor de tensão atuante, σ , o valor de tensão de escoamento do aço, f_y , a partir da expressão: $N_c = \frac{f_y \times A_{ef}}{1,10}$. Onde A_{ef} é a área efetiva da seção.

3.8 Flambagem Distorcional

A flambagem distorcional é caracterizada pela alteração da forma inicial da seção, ocorrendo uma rotação dos elementos que estão submetidos a compressão. Sobre a flambagem distorcional, Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014 p. 99) dizem:

“A flambagem por distorção caracteriza-se por um abaulamento da alma e conseqüentemente rotação das mesas do perfil, mantendo igual o ângulo entre elas. Esta forma de colapso acontece quando há interação entre os modos de flambagem de cada elemento que forma o perfil. “

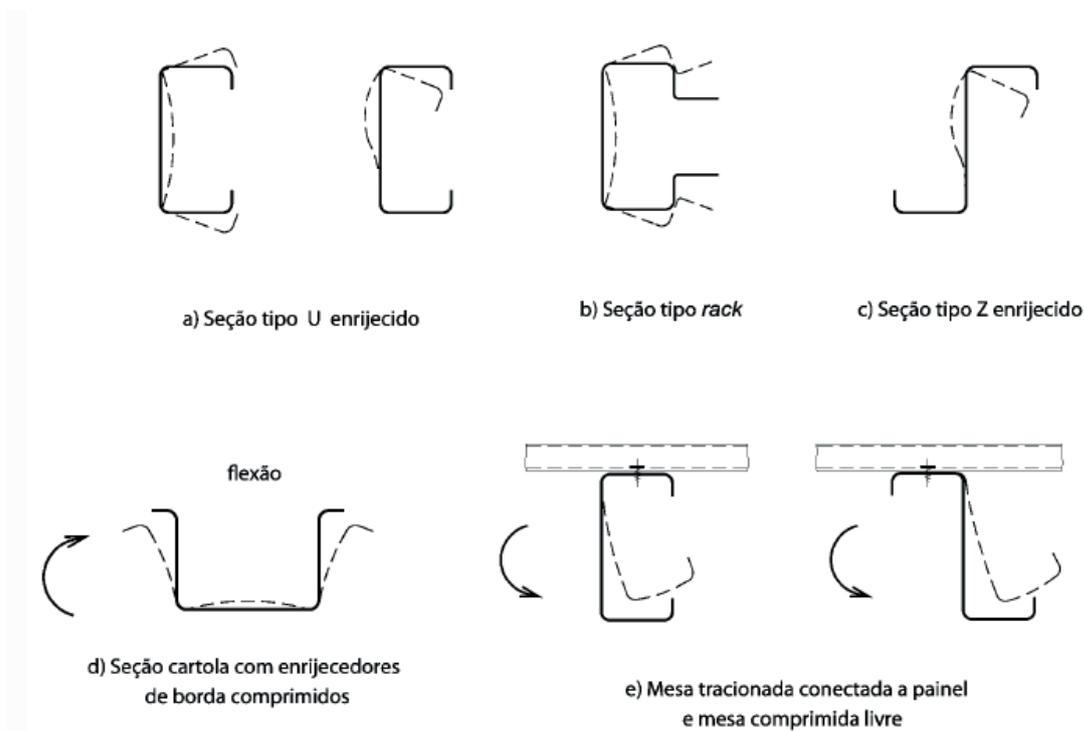
De acordo com a NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 31) diz:

“As seções transversais de barras podem apresentar flambagem distorcional [...] Dependendo da forma da seção e das dimensões dos elementos, o modo de flambagem distorcional pode corresponder ao modo crítico, devendo, portanto, ser considerado no dimensionamento [...] para barras submetidas à compressão centrada ou [...] para barras submetidas à flexão”.

Yu e LeBoube (2010, p.97, tradução nossa) diz que para algumas seções abertas com enrijecedores, a flambagem distorcional pode ser crítica.

Para os perfis U simples, não é necessário realizar a verificação a flambagem distorcional, exceto no caso de perfis submetidos a flexão, com a mesa tracionada fixa em um painel e a mesa comprimida livre, similar a Figura 5.e. A Figura 5 ilustra a flambagem distorcional para barras isoladas (Figura 5.a até 5.d), onde se utiliza a teoria da estabilidade elástica para o cálculo dos esforços críticos de flambagem, mantendo correlação com os resultados teóricos. E para barras com painel conectado a mesa tracionada e a mesa comprimida livre (Figura 5.e).

Figura 5 – Flambagem Distorcional em barras Isoladas



(Fonte: NBR 14762:2010, p. 32)

Devido a alta complexidade de obter uma solução para os elementos submetidos a flambagem distorcional, a NBR 14762:2010 indica valores mínimos da relação entre o comprimento do enrijecedor, ou comprimento do elemento AL , e a largura da alma (D/b_w) para dispensar a verificação da flambagem distorcional, tanto para seções submetidas a compressão centrada (NBR 14762, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, Tabela 11, p.43), quanto para seções sob flexão simples em torno do eixo de menor inercia (NBR 14762, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, Tabela 14, p.50) que serão apresentadas a seguir na Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente. Os valores de b_f , b_w , t e D , que estão apresentados nas tabelas anteriormente citadas, são, respectivamente, os valores da largura da mesa, largura da alma, espessura e a dimensão do enrijecedor de borda. A Tabela 9, também mencionada nas Tabelas 4 e 5, está contida na NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), no item 9.7.2, onde é utilizada para a obtenção do coeficiente local de flambagem no Método da Seção Efetiva, o qual não é abordado no presente trabalho.

Tabela 4– Valores mínimos da relação D/b_w de barras com seção U enrijecido e seção Z enrijecido submetidas à compressão centrada, para dispensar a verificação da flambagem distorcional

b_f/b_w	b_w/t				
	250	200	125	100	50
0,4	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08
0,6	0,03	0,04	0,06	0,06	0,15
0,8	0,05	0,06	0,08	0,10	0,22
1,0	0,06	0,07	0,10	0,12	0,27
1,2	0,06	0,07	0,12	0,15	0,27
1,4	0,06	0,08	0,12	0,15	0,27
1,6	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
1,8	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
2,0	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27

NOTA 1 b_f , b_w , e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas Figuras da Tabela 9.

NOTA 2 Para valores intermediários, interpolar linearmente.

(Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, pg.43)

Tabela 5– Valores mínimos da relação D/b_w de seções do tipo U enrijecido e Z enrijecido sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia, para dispensar a verificação da flambagem distorcional

b_f/b_w	b_w/t				
	250	200	125	100	50
0,4	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,6	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,8	0,05	0,06	0,09	0,12	0,22
1,0	0,05	0,06	0,09	0,11	0,22
1,2	0,05	0,06	0,09	0,11	0,20
1,4	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,6	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,8	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19
2,0	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19

NOTA 1 b_f , b_w , e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas figuras da Tabela 9.

NOTA 2 Para valores intermediários, interpolar linearmente.

(Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, pg. 50)

3.9 Flambagem Global

A flambagem global da seção é um dos principais tipos de colapso para os PFF sujeitos a esforços de compressão. Em que se apresenta de três formas: Flexão, torção e flexo-torção. Flambagem por flexão ocorre em perfis duplamente simétricos, ou de seção cheia e sua deformada se dá com o perfil se transladando paralelo a si próprio. A flambagem por torção ocorre em perfis duplamente simétricos, ou com rigidez torsional muito pequena, a deformada do perfil flambado tem sua seção rotada, mantendo seu eixo na posição original. A flambagem por flexo-torção ocorre em perfis com um ou nenhum eixo de simetria, se caracterizando pela deformada com um translado do eixo do perfil para a posição deformada e uma rotação da seção em torno do centro de corte, devido a interação entre os modos de flambagem anteriores, torção e flexão.

3.10 Resistência da Alma

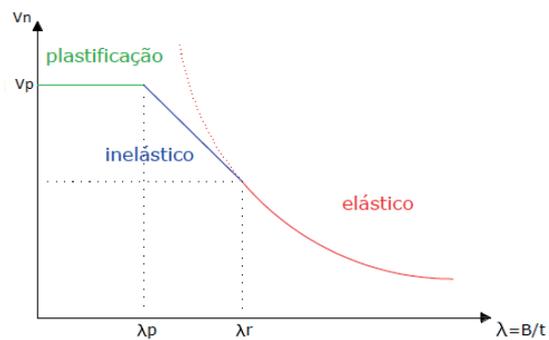
De acordo com Carvalho, Grigoletti e Barbosa. (2014 p. 211) desde o princípio do estudo de estruturas metálicas é dito que os perfis metálicos resistem bem ao esforço cortante, isso para perfis com almas relativamente espessas. O que não necessariamente é válido para PFF, onde suas almas são esbeltas e a falha por corte pode ser preponderante e que o projeto de almas é governado por:

- a) Escoamento por corte. Seguindo o critério de Von Mises em que, quando uma alma robusta submetida ao corte, escoara com tensão média de $\sim f_y / \sqrt{3}$.
Atentando-se também para a região onde o corte e a flambagem interagem.
- b) Flambagem por corte. Utilizando uma relação diferente do coeficiente de flambagem do que o atribuído para placas comprimidas.
- c) Flexão de almas. Utilizando o conceito das larguras efetivas para a parte comprimida da alma fletida.
- d) Almas com combinação de flexão e corte. Devido a combinação das duas solicitações, a resistência da alma diminui.

Também pode se realizar uma analogia com os perfis robustos, em que apresentam uma relação entre a solicitação e a esbeltez da alma, onde a resistência da mesma é definida a partir do regime em que se encontra o elemento, seja ele no regime plástico, regime

inelástico e regime elástico. A relação entre a solicitação cortante e a esbeltez, se encontra ilustrado na Figura 6.

Figura 6– Relação Cortante/Esbeltez



(Fonte: Notas de aula ENG01110)

4 VERIFICAÇÃO

Neste capítulo versaremos sobre como realizar as verificações de resistências das seções de PFF, conforme a NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010). Todas as etapas de verificação devem respeitar a relação $R_d \geq S_d$, em que a resistência (R_d) da seção deve ser maior que a solicitação de projeto (S_d) existente na mesma.

4.1 Barras Tracionadas

Para a verificação da força resistente à tração, o presente trabalho não realizará a verificação da seção na região das ligações, ou na região em que houver aberturas, ou descontinuidades, na barra. A verificação à tração se dará apenas na seção bruta da barra, que corresponde a verificar se, ao longo da barra, a força resistente é superior a força solicitante, a solicitação de tração está baseada na consideração de que, se a força de tração for centrada, a distribuição de tensões é uniforme. O valor da força resistente de tração da seção se obtém a partir da equação 4.1.

$$N_{r,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma}; \text{ com } \gamma=1,10 \quad (\text{eq. 4.1})$$

γ – coeficiente de ponderação.

A – Área bruta da seção.

f_y – tensão de escoamento do aço.

A equação 4.2 mostra que as peças tracionadas não devem ter um índice de esbeltez superior a 300.

$$\lambda = \frac{L}{r} \leq 300; \quad (\text{eq. 4.2})$$

λ – índice de esbeltez.

r – raio de giração da seção.

L- comprimento destravado da barra.

4.2 Barras Comprimidas

Sobre PFF sujeitos a esforços de compressão, Yu e LeBoube (2010, p.191, tradução nossa) dizem:

“PFF são feitos de chapas de pequena espessura, e em muitos casos o centro de corte não coincide com o centro da seção. Portanto para o dimensionamento de elementos sob compressão, deve-se considerar os seguintes estados limites que dependem da configuração da seção, da espessura do material e do comprimento da peça:

- a) Escoamento
- b) Flambagem Global:
 - a. Flambagem por flexão
 - b. Flambagem torsional
 - c. Flexo-Torsão
- c) Flambagem Local individual dos elementos da seção
- d) Flambagem distorcional para perfis de seção aberta com enrijecedores’

Sobre colapso por escoamento, Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014 p. 96) dizem:

“O colapso por escoamento puro se dá em perfis muito curtos [...] e com paredes muito espessas [...] será muito difícil que um perfil formado a frio entre em colapso por escoamento puro, pois a grande característica desse tipo de perfil é que ele é esbelto”.

Segundo a NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), a força de compressão resistente de cálculo deve ser tomada como o menor valor entre: força resistente de cálculo devido à instabilidade da barra por flexão e força resistente de cálculo devido à instabilidade por distorção da seção transversal. O limite de esbeltez das peças comprimidas, apresentado pela equação 4.3, não pode exceder o valor de 200.

$$\lambda = \frac{KL}{r} \leq 200 \quad (\text{eq. 4.3})$$

KL- comprimento efetivo de flambagem da barra.

4.2.1 Devido à Instabilidade da Barra por Flexão, Torção ou Flexo-Torção

A força de compressão resistente, $N_{c,Rd}$, é determinada pela equação 4.4

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \times A_{ef} \times f_y}{\gamma}; \text{ com } \gamma=1,20 \quad (\text{eq. 4.3})$$

Onde:

$$A_{ef} = \sum(b_{ef} \times t) \quad (\text{eq. 4.4})$$

$$\chi = 0,658\lambda_0^2; \text{ para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad (\text{eq. 4.5})$$

$$\chi = 0,877 / \lambda_0^2; \text{ para } \lambda_0 > 1,5 \quad (\text{eq. 4.6})$$

$$\lambda_0 = \left(\frac{A \times f_y}{N_e} \right)^{0,5} \quad (\text{eq. 4.7})$$

χ – fator de redução da força axial de compressão resistente decorrente da instabilidade global.

λ_0 – índice de esbeltez reduzido

A_{ef} – Área efetiva da seção, utilizando para cálculo das larguras efetivas $\sigma = \chi * f_y$

A – Área bruta da seção

N_e – força axial de flambagem global elástica

A força axial de flambagem global elástica, N_e , é definida na NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), nos itens 9.7.2.1, 9.7.2.2 ou 9.7.2.3 da mesma, onde o valor da força axial N_e depende da simetria da seção em relação aos seus eixos principais de inércia.

4.2.1.1 Determinação da Força Axial de Flambagem

A força axial de flambagem é, conforme visto anteriormente, determinada a partir da simetria da seção, obtendo assim valores de forças axiais relativas a cada eixo principal de inércia, e utilizando o menor dos valores para a equação 4.7, na determinação do índice de esbeltez reduzido. Como o presente trabalho se trata apenas da verificação de Perfis U Simples e Enrijecidos, será abordado apenas o caso em que estão inseridos, que é o de perfis monossimétricos. Portanto a força axial de flambagem é definida como sendo o menor valor dentre os obtidos nos três casos abaixo.

Caso 1: por flexão em relação ao eixo principal y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \times EI}{(K_y l_y)^2} \quad (\text{eq. 4.8})$$

Caso 2: por flexo-torção:

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \times (1 - (x_o/r_o)^2)} \times \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \times N_{ex} N_{ez} \times [1 - (x_o/r_o)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] \quad (\text{eq. 4.9})$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \times EI}{(K_x L_x)^2} \quad (\text{eq.4.10})$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \left[\frac{\pi^2 \times E \times C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \quad (\text{eq.4.11})$$

Onde:

C_w - constante de empenamento da seção

E – modulo de elasticidade do aço

G – modulo de elasticidade transversal

J – constante de torção da seção

N_{ex} – força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal x.

N_{ey} - força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal y.

N_{ez} - força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal z.

N_{exz} - força axial de flambagem global elástica por flexo-torção.

K_x – coeficiente de flambagem por flexão em relação ao eixo x

K_y – coeficiente de flambagem por flexão em relação ao eixo y.

K_z – coeficiente de flambagem por torção.

$K_x L_x$ – comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo x, K_x definido a partir da Figura 7

$K_y L_y$ – comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo y, K_y definido a partir da Figura 7

$K_z L_z$ – comprimento efetivo de flambagem global por torção, que em caso de não haver garantia de impedimento ao empenamento, deve-se tomar K_z igual a 1,0

r_o – raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção, dado por:

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2 + y_o^2} \quad (\text{eq. 4.12})$$

Onde:

r_x e r_y são os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia x e y , respectivamente

x_o e y_o são as distâncias do centro de torção ao centroide, na direção dos eixos principais x e y , respectivamente

Figura 7– Coeficiente de flambagem conforme vinculação.

	(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					

(Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, pg. 135)

4.2.2 Devido à Instabilidade Distorcional

Para seções de barras com seção transversal aberta sujeitas a flambagem distorcional a força axial de flambagem distorcional, necessária para a determinação da força axial resistente, deveria ser analisada com base na estabilidade elástica. Porém devido a limitação do programa, será tomado valores limites da relação entre a dimensão do enrijecedor e da dimensão da alma da seção em questão, apresentado na Tabela 4 do item 3.8 do presente trabalho.

4.3 Barras Submetidas à Flexão Simples

O momento fletor resistente de cálculo deve ser tomado como o menor entre: o momento que causa escoamento na fibra mais tracionada, o momento referente a instabilidade lateral com torção e o momento referente a instabilidade distorcional da seção transversal.

4.3.1 Escoamento da fibra mais tracionada da seção Efetiva

Conforme Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014 p. 144) “Os perfis formados a frio, por serem esbeltos, não tem condições de se plastificar, ou seja, de atingir o momento de plastificação. O máximo que pode ocorrer será a fibra mais comprimida (ou tracionada) atingir a tensão de escoamento.”. O momento fletor resistente de cálculo, do início do escoamento da seção, pode ser calculado pela seguinte equação:

$$M_{Rd} = W_{ef} \times f_y / \gamma; \text{ para } \gamma=1,10 \quad (\text{eq. 4.13})$$

Onde:

W_{ef} – é o módulo de resistência elástico da seção efetiva, utilizando as larguras efetivas dos elementos e com $\sigma=f_y$, pois deverá ser calculado para o estado-limite último de escoamento da seção. Nesta verificação será necessário verificar a posição do centro geométrico da seção efetiva, pois o centro geométrico da seção efetiva pode não coincidir com o da seção bruta. Essa diferença modifica a coordenada da fibra mais solicitada, para o cálculo de W_{ef} .

4.3.2 Instabilidade Lateral com Torção

Ocorre em vigas fletidas e é ocasionada pela instabilidade global da viga não contida lateralmente. O fenômeno pode ser entendido observando a viga fletida e isolando

esquemáticamente a parte comprimida da parte tracionada. A região comprimida desta seção também está sujeita a instabilidade por flexão na sua direção de menor inércia, dessa forma a rigidez envolvida nesse modo de instabilidade é a flexão em torno do eixo y, rigidez a torção e ao empenamento.

Tomando-se um trecho compreendido entre seções contidas lateralmente, o momento fletor resistente de cálculo a instabilidade lateral com torção é obtido pela equação 4.15 apresentada a seguir.

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} \times W_{c,ef} \times f_y}{\gamma}, \text{ com } \gamma=1,10 \quad (\text{eq. 4.15})$$

Onde:

$W_{c,ef}$ é o modulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra mais comprimida, calculado com base nas larguras efetivas, utilizando $\sigma = \chi_{FLT} \times f_y$

χ_{FLT} fator de redução associado a instabilidade lateral com torção, definido a partir das expressões abaixo:

$$\chi_{FLT} = 1,0 \text{ para } \lambda_o \leq 0,6$$

$$\chi_{FLT} = 1,11 * (1 - 0,278 \times \lambda_o^2) \text{ para } 0,6 < \lambda_o < 1,336$$

$$\chi_{FLT} = \frac{1}{\lambda_o^2} \text{ para } \lambda_o \geq 1,336$$

Em que λ_o é definido por:

$$\lambda_o = \left(\frac{W_c \times f_y}{M_e} \right)^2 \quad (\text{eq. 4.16})$$

Onde:

W_c – é o módulo de resistência elástica da seção bruta em relação a fibra mais comprimida.

M_e – é o momento fletor crítico de flambagem lateral com torção. Abaixo será mostrado a equação 4.17 para o cálculo de M_e , o qual foram deduzidas para carregamentos aplicado no centro de torção da seção, para barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica sujeitas a flexão em torno do eixo de simetria, que são as seções abordadas pelo presente trabalho.

$$M_e = C_b \times r_0 \times (N_{ey} \times N_{ez})^{0,5} \quad (\text{eq. 4.17})$$

C_b – é o fator de modificação para diagrama de momentos fletores não uniformes que depende da forma de carregamento da viga, podendo ser tomado igual a 1,0 para uma interpretação a favor da segurança, ou obtido através da apresentada na NBR14762:2010 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, p. 48).

O presente trabalho assumirá que o valor do fator de modificação para diagramas será igual à 1,0, para uma análise mais voltada a segurança.

4.3.3 Instabilidade por Distorção da Seção Transversal

Para esta parte da verificação, seria necessário realizar o cálculo do momento fletor de flambagem distorcional elástica com base na análise de estabilidade elástica, que devido a limitação do programa, este trabalho não realizara. Para dispensar a verificação a flambagem distorcional, a relação entre o enrijecedor e a alma da seção analisada deverá ser igual ou superior aos valores indicados na Tabela 5.

4.4 Força Cortante

A partir do item 3.10, Resistência da Alma, apresentado anteriormente, as equações para a determinação da força cortante de resistência são apresentadas a seguir (utilizando $Y = 1.10$) e complementando a analogia com os perfis robustos:

$$\text{Para } \frac{h}{t} \leq 1,08 \sqrt{\frac{E \times k_v}{f_y}} \quad \therefore V_{Rd} = \frac{0,6 \times f_y \times ht}{\gamma} \quad (\text{eq. 4.18})$$

Que corresponde ao regime plástico, caso a relação de h/t seja atendida.

$$\text{Para } 1,08 \sqrt{\frac{E \times k_v}{f_y}} \leq \frac{h}{t} < 1,4 \sqrt{\frac{E \times k_v}{f_y}} \quad \therefore \quad V_{Rd} = \frac{0,65 \times t^2 \times \sqrt{k_v \times f_y \times E}}{\gamma} \quad (\text{eq. 4.19})$$

Que corresponde ao regime inelástico, caso a relação h/t se encontre no intervalo definido.

$$\text{Para } \frac{h}{t} \geq 1,4 \sqrt{\frac{E \times k_v}{f_y}} \quad \therefore \quad V_{Rd} = \frac{0,905 \times E \times k_v \times t^3 / h}{\gamma} \quad (\text{eq. 4.20})$$

Correspondendo ao regime elástico, para valores de h/t acima da relação apresentada.

Onde:

t – é a espessura da alma

h – é a altura da parte plana da alma

k_v – é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, que é definido por dois casos:

- a) Para alma sem enrijecedores transversais, ou para $a/h > 3$:

$$k_v = 5,00$$

- b) Para alma com enrijecedores, satisfazendo as exigências do item 9.5 da NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010):

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} \quad (\text{eq. 4.21})$$

Onde:

a – é a distância entre enrijecedores transversais de alma

4.5 Momento Fletor e Força Cortante Combinados

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, os esforços solicitantes e os resistentes devem satisfazer a equação 4.22, apresentada a seguir:

$$\left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 \leq 1,0 \quad (\text{eq. 4.22})$$

Para barras com enrijecedores transversais de alma, de acordo com o item 9.8.4 da NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), quando $M_{Sd}/M_{Rd} > 0,5$ e $V_{Sd}/V_{Rd} > 0,7$ deve também satisfazer a equação 4.23:

$$0,6 \times \left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right) + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}\right) \leq 1,3 \quad (\text{eq. 4.23})$$

Onde:

M_{Sd} – é o momento fletor solicitante

M_{Rd} – é o momento fletor resistente, definido no item 4.3.1 do presente trabalho.

V_{Sd} – é a força cortante solicitante

V_{Rd} – é a força cortante resistente, definido no item 4.4 do presente trabalho.

5 O PROGRAMA

O presente capítulo tem por objetivo descrever e apresentar a o programa desenvolvido neste trabalho, apresentando sua interface, os dados de entrada necessários para que a ferramenta opere corretamente e também um comparativo entre os exercícios propostos pelos autores Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014) e por Silva, Pierin e Pignatta (2014) com os resultados obtidos pelo programa, ao utilizar como dados de entrada os mesmos dados dos exercícios propostos.

5.1 C#

O C# é uma linguagem de programação visual dirigida por eventos e orientada a objetos, desenvolvida pela Microsoft. Possui raízes nas linguagens de programação C, C++ e Java. No presente trabalho, utilizou-se o Microsoft Visual Studio, que é um pacote de programas da própria Microsoft para desenvolvimento de softwares dedicados às linguagens Visual Basic, C, C++, Java e C#.

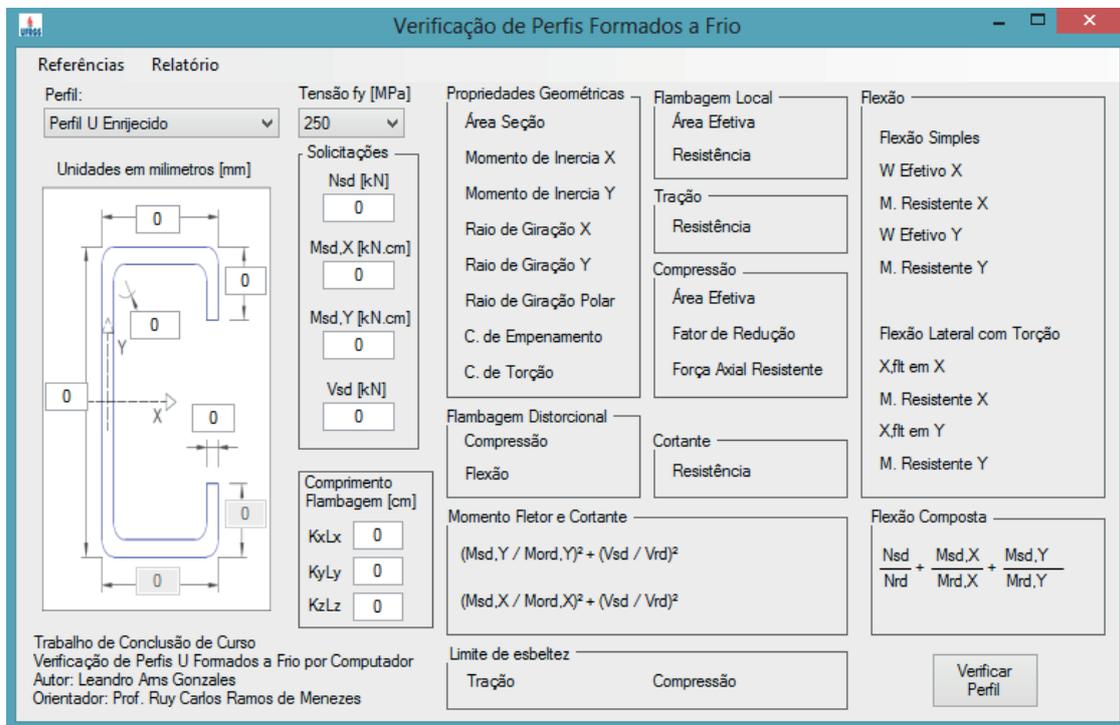
5.2 Tela Principal

A tela principal do programa,

Figura 8, apresenta o nome do programa, nomes do autor e orientador do trabalho de diplomação, dentre outras informações. Com a finalidade de simplificar a apresentação destas informações, a tela será dividida em três partes:

- 1 Será apresentado a parte onde o usuário deve entrar com os dados necessário para que o programa opere corretamente.
- 2 A parte em que o programa retorna os resultados dos valores de resistências verificados ao usuário.
- 3 Os botões situados no menu e suas funções.

Figura 8– Tela inicial do programa.



(Fonte: desenvolvido pelo autor)

5.2.1 Entrada de Dados:

A Figura 9 apresenta a parte da tela principal em que o usuário deve introduzir os dados para que o programa opere corretamente. A entrada de dados pode ser dividida em 4 partes:

- A escolha do perfil que será utilizado, perfil U simples (Figura 9, lado direito), ou o perfil U enrijecido (Figura 9, lado esquerdo). Os campos que estão na ilustração da seção transversal do perfil, devem ser preenchidos com os valores, em milímetros, das dimensões do perfil, o raio interno da região das dobras, a espessura da chapa.

- b) O usuário deve escolher, dentre as opções apresentadas na Figura 9, a tensão de escoamento do aço a ser utilizado no perfil, com as unidades em MPa.
- c) Solicitações atuantes na seção, normal e cortante em kN, momentos fletores, no eixo x e no eixo y, em kN.cm. Estes valores são necessários para que o programa realize a verificação de momento fletor e força cortante combinados.
- d) Deve-se preencher com os valores dos comprimentos efetivos de flambagem da barra do perfil, nos eixos x, y e z, com as unidades em cm

Figura 9 – Dados e entrada.

The figure displays two side-by-side screenshots of a software interface for steel profile verification. Both screenshots show a form with the following fields and values:

- Perfil:** Perfil U Simples (left) / Perfil U Enrijecido (right)
- Tensão f_y [MPa]:** 250
- Solicitações:**
 - Nsd [kN]: 0
 - Msd,X [kN.cm]: 0
 - Msd,Y [kN.cm]: 0
 - Vsd [kN]: 0
- Comprimento Flambagem [cm]:**
 - KxLx: 0
 - KyLy: 0
 - KzLz: 0

Each interface also features a diagram of the U-profile with coordinate axes (X and Y) and input fields for dimensions. At the bottom of each window, the text reads: "Trabalho de Conclusão de Curso Verificação de Perfis U Formados a Frio por Computador Autor: Leandro Ams Gonzales Orientador: Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes".

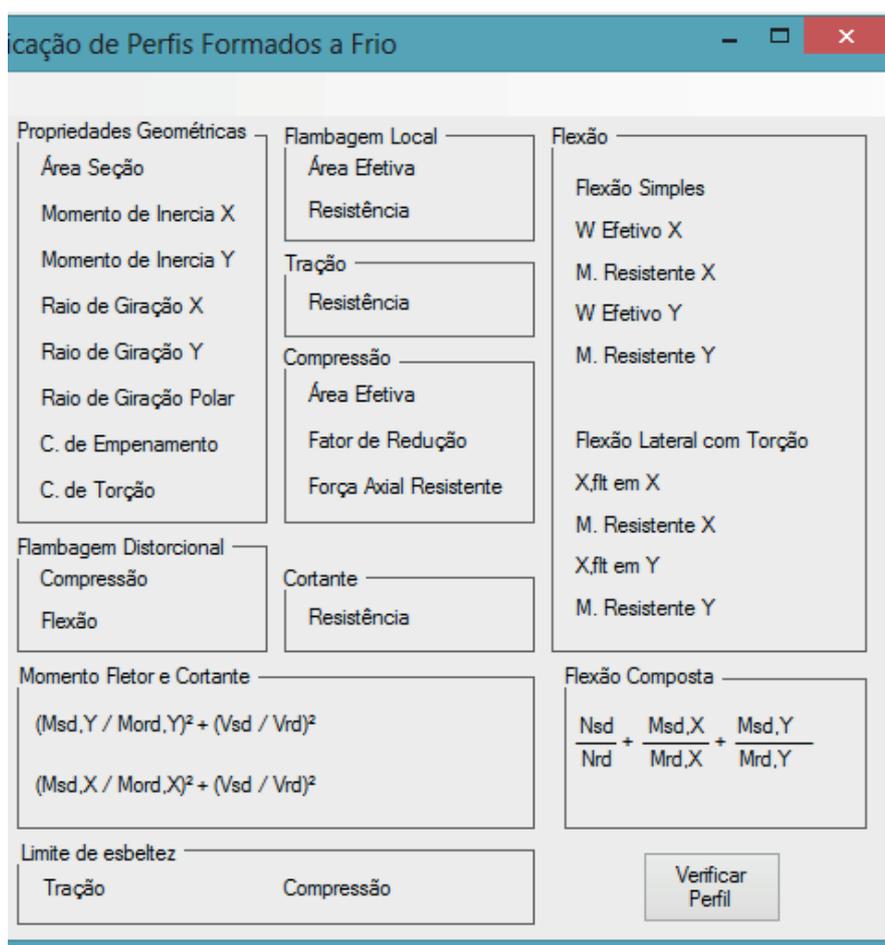
(Fonte: desenvolvido pelo autor)

5.2.2 Impressão dos resultados

A Figura 10 apresenta onde serão impressos os resultados da verificação e também a localização do botão <Verificar Perfil>. Após o preenchimento de todos os dados de

entrada, que foram apresentados anteriormente, o usuário deve pressionar o botão, para que então os resultados sejam impressos em tela. Os resultados apresentados pelo programa são: as características geométricas do perfil em análise, as resistências a flambagem local, tração, compressão, cortante, flexão simples e à flexão lateral com torção, ambas flexões em torno do eixo x e eixo y, flambagem distorcional, flexão composta, interação entre momento fletor e cortante e o limite de esbeltez do perfil, conforme apresentado no capítulo 4 deste trabalho.

Figura 10– Apresentação dos Resultados



(Fonte: desenvolvido pelo autor)

Ao pressionar o botão <Verificar Perfil>, o programa realizara também a verificação das dimensões do perfil, apresentados na Tabela 3 no item 3.6 do presente trabalho. Caso os valores limites não sejam respeitados, o programa notificará o usuário de que deve ser feita esta correção, através de uma janela de notificação, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Notificação dos valores limites

Caso a ser analisado	Valor máximo da relação largura-espessura ^a
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma ou mesa e a outra a enrijecedor de borda simples	$(b/t)_{m\acute{a}x} = 60$ ^b
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma e a outra a mesa ou outro tipo de enrijecedor de borda com $I_y \geq I_x$ conforme 9.2.3	$(b/t)_{m\acute{a}x} = 90$
Alma de perfis U não enrijecidos sujeita à compressão uniforme	$(b/t)_{m\acute{a}x} = 90$
Elemento comprimido com ambas as bordas vinculadas a elementos AA	$(b/t)_{m\acute{a}x} = 500$ ^c
Elemento comprimido AL ou AA com enrijecedor de borda tendo $I_y < I_x$ conforme 9.2.3	$(b/t)_{m\acute{a}x} = 60$ ^b
Alma de vigas sem enrijecedores transversais	$(b/t)_{m\acute{a}x} = 200$
Alma de vigas com enrijecedores transversais apenas nos apoios e satisfazendo as exigências de 9.5.1	$(b/t)_{m\acute{a}x} = 260$
Alma de vigas com enrijecedores transversais nos apoios e intermediários, satisfazendo as exigências de 9.5.1	$(b/t)_{m\acute{a}x} = 300$

^a b é a largura do elemento; t é a espessura.
^b Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{m\acute{a}x} = 30$.
^c Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{m\acute{a}x} = 250$.

Verificar os valores máximos da relação largura-espessura conforme Item 9.1.2, Tabela 4, NBR 14762:2010.

(Fonte: desenvolvido pelo autor)

Nos resultados da flambagem distorcional, o programa retornará dois resultados: “Dispensada”, que ocorre se o perfil atender aos valores mínimos das Tabelas 4 e Tabela 5 apresentadas no capítulo 3.9 deste trabalho, ou “Verificar”, para o caso em que valores mínimos não sejam respeitados, juntamente com uma janela de notificação, apresentando as tabelas com os valores a serem respeitados, como mostra a Figura 12.

Figura 12– Notificação de Flambagem Distorcional

Tabela 11 — Valores mínimos da relação D/b_w de barras com seção U enrijecido e seção Z enrijecido submetidas à compressão centrada, para dispensar a verificação da flambagem distorcional

b_w/b_w	b_w/t				
	250	200	125	100	50
0,4	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08
0,6	0,03	0,04	0,06	0,06	0,15
0,8	0,05	0,06	0,08	0,10	0,22
1,0	0,06	0,07	0,10	0,12	0,27
1,2	0,06	0,07	0,12	0,15	0,27
1,4	0,06	0,08	0,12	0,15	0,27
1,6	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
1,8	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
2,0	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27

NOTA 1 b_y , b_w , e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas Figuras da Tabela 9.
NOTA 2 Para valores intermediários, interpolar linearmente.

É necessário verificar a seção para flambagem distorcional pois o perfil não atendeu ao Item 9.7.3, Tabela 11, NBR 14762:2010

Tabela 14 — Valores mínimos da relação D/b_w de seções do tipo U enrijecido e Z enrijecido sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia, para dispensar a verificação da flambagem distorcional

b_y/b_w	b_w/t				
	250	200	125	100	50
0,4	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,6	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,8	0,05	0,06	0,09	0,12	0,22
1,0	0,05	0,06	0,09	0,11	0,22
1,2	0,05	0,06	0,09	0,11	0,20
1,4	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,6	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,8	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19
2,0	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19

NOTA 1 b_y , b_w , e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas figuras da Tabela 9.
NOTA 2 Para valores intermediários, interpolar linearmente.

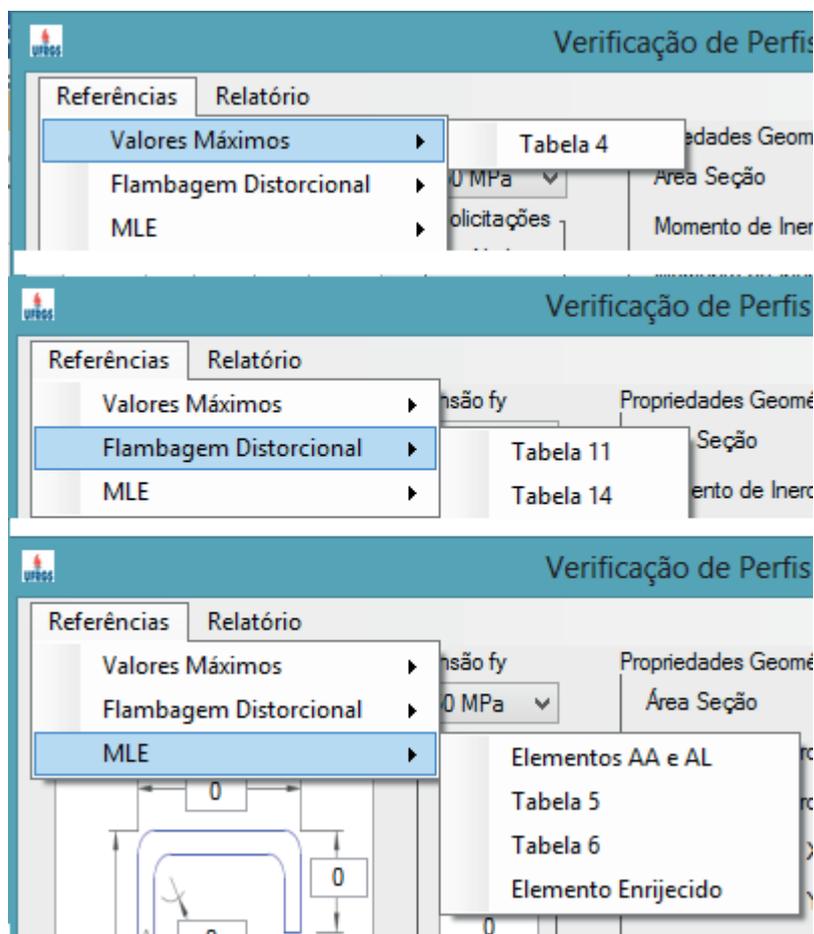
É necessário verificar a seção para flambagem distorcional pois o perfil não atendeu ao Item 9.8.2.3, Tabela 14, NBR 14762:2010

(Fonte: desenvolvido pelo autor)

5.2.3 Botões do Menu

Conforme mostra a Figura 13, no canto superior esquerdo da tela do programa há dois botões, o primeiro, <Referências>, contém uma lista de imagens das tabelas de valores máximos para dimensões dos perfis e de valores mínimos para se dispensar a verificação da flambagem distorcional, apresentados neste trabalho na Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente, porém, utilizando a numeração encontrada na NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010). O Item ‘MLE’ apresenta todo o método de cálculo das larguras efetivas, conforme apresentado nos capítulos 3.4 e 3.5 deste trabalho. Ao pressionar o botão <Relatório>, o usuário pode salvar em um arquivo ‘.txt’ os resultados dos cálculos das verificações realizados pelo programa.

Figura 13 – Menu



(Fonte: desenvolvido pelo autor)

5.3 Fluxo do Programa

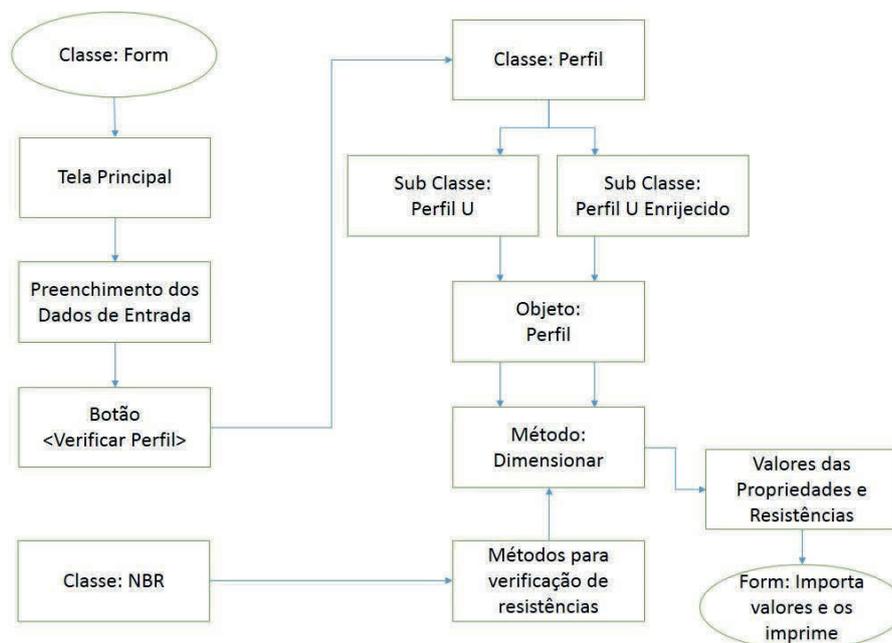
O programa desenvolvido é formado por 3 grandes classes, a classe Form, a classe Perfil e a classe NBR. A primeira classe é onde se encontra toda interface visual do programa, a tela principal. É também onde são armazenados os dados de entrada e onde são impressos os dados de saída.

A classe NBR é responsável por conter todos os métodos que realizam as verificações conforme a NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) por etapas.

A classe Perfil, que é composta por 11 (onze) variáveis, são elas os comprimentos de cinco elementos, a espessura, o valor do raio interno, os comprimentos efetivos de flambagem nos eixos x, y e z e a simetria do perfil. Os métodos existentes nesta classe baseiam-se na exportação das variáveis iniciais e finais (valores de resistência) do perfil. A partir da classe Perfil, são geradas sub classes, o programa contém apenas as sub classes Perfil U e Perfil U enrijecido. Cada sub classe, além dos métodos herdados pela classe Perfil, contém métodos de cálculo das propriedades geométricas referentes ao perfil que a sub classe faz referência. E o método principal da classe, que é composto por uma sequência de métodos próprios e também importados da classe NBR, chamado de Dimensionar, que define todos os valores das propriedades geométricas e de resistências do perfil.

Ao iniciar o programa, a classe Form é ativada, apresentando todos os botões, os textos e as imagens da tela principal. Ao se clicar no botão <Verificar Perfil>, faz com que após a seleção do perfil a ser verificado e o preenchimento dos dados de entrada necessários, a classe Perfil é instanciada (iniciada), criando um objeto perfil e faz com que o objeto perfil execute o método Dimensionar da classe o qual foi instanciado, e faz com que o Form importe, do objeto perfil, os valores das resistências e propriedades para serem impressos na tela principal. A Figura 14 ilustra o fluxograma do programa.

Figura 14 – Fluxograma do programa



(Fonte: desenvolvido pelo autor)

5.4 Validação de Resultados

Para a validação dos resultados do programa, estes serão comparados a resultados encontrados nos exemplos do livro de Carvalho, Grigoletti e Barbosa. (2014) e de Silva, Pierin e Pignatta (2014).

5.4.1 Validação com Silva, Pierin e Pignatta

Para a verificação à tração, Silva, Pierin e Pignatta propõe um exercício apresentado na página 44, cujo enunciado é: “Cálculo da força normal resistente à tração de um tirante U 100x40x2,0 de 3,5 m de comprimento [...] Adotar aço $f_y=25 \text{ kN/cm}^2$ e $f_u=40 \text{ kN/cm}^2$.”. Porém como o programa desenvolvido realiza apenas verificação da seção bruta do perfil, portanto será realizado a comparação apenas com o primeiro item do exercício. A solução apresentada pelos autores é:

$$N_{t,Rd} = A \times f_y / \gamma$$

$$A = 3,468 \text{ cm}^2$$

$$f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$$

$$\gamma = 1,1$$

$$N_{t,Rd} = 3,468 \times 25,0 / 1,1 = 78,82 \text{ kN}$$

Os resultados obtidos utilizando o programa estão apresentados na Figura 15.

Figura 15– Resultados da verificação a tração

The screenshot shows the following data and results:

- Referências / Relatório:** Perfil: Perfil U Simples
- Unidades em milímetros [mm]:** 40, 2, 100, 2
- Tensão f_y [MPa]:** 250
- Solicitações:** Nsd [kN] = 0, Msd,X [kN.cm] = 0, Msd,Y [kN.cm] = 0, Vsd [kN] = 0
- Comprimento Flambagem [cm]:** KxLx = 350, KyLy = 350, KzLz = 350
- Propriedades Geométricas:** A = 3,52cm², Ix = 53,15 cm⁴, Iy = 5,29 cm⁴, rx = 3,89 cm, ry = 1,23 cm, ro = 4,65 cm, Cw = 89,52 cm³, J = ,05 cm³
- Flambagem Local:** Aef = 3,05 cm², Rsd = 63,61 kN
- Tração:** Rsd = 80 kN
- Compressão:** Aef = 3,52 cm², X = ,0849, Rsd = 6,23 kN
- Flambagem Distorcional:** Dispensada
- Cortante:** Vrd = 25,09kN
- Momento Fletor e Cortante:** (Msd,Y / Mord,Y)² + (Vsd / Vrd)² <= 1.0, Ok; (Msd,X / Mord,X)² + (Vsd / Vrd)² <= 1.0, Ok
- Limite de esbeltez:** Tração: OK, Compressão: excedido.
- Flexão:** Flexão Simples: Wcx,ef = 9,16 cm³, Mrd,x = 208,15 kN.cm, Wcy,ef = 1,72 cm³, Mrd,y = 39,02 kN.cm; Flexão Lateral com Torção: Xft,x = ,247, Mrd,x = 59,66 kN.cm, Xft,y = 1, Mrd,y = 39,02 kN.cm
- Flexão Composta:** $\frac{Nsd}{Nrd} + \frac{Msd,X}{Mrd,X} + \frac{Msd,Y}{Mrd,Y} = 0 < 1, OK$

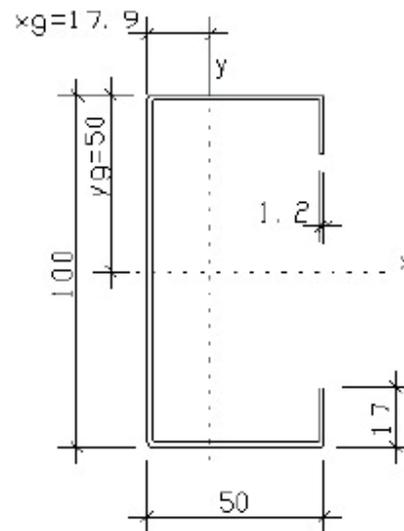
Trabalho de Conclusão de Curso
Verificação de Perfis U Formados a Frio por Computador
Autor: Leandro Ams Gonzales
Orientador: Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes

Verificar Perfil

(Fonte: desenvolvido pelo autor)

Para realizar a verificação à compressão, Silva, Pierin e Pignatta propõe o exercício na página 51, cujo enunciado é: “Cálculo da força resistente à compressão de um pilar de seção do tipo Eu (Perfil U enrijecido) 100x50x17x1,2 mm e comprimento de 4,0 m. Sem travamentos intermediários ($k_x=k_y=k_z=1,0$)”. A Figura 16 apresenta a imagem do perfil do exercício.

Figura 16– Exercício proposto.



$$\begin{aligned}
 A &= 2,71 \text{ cm}^2 & I_x &= 44,15 \text{ cm}^4 & I_y &= 10,12 \text{ cm}^4 \\
 W_x &= 8,83 \text{ cm}^3 & r_x &= 4,03 \text{ cm} & W_y &= 3,15 \text{ cm}^3 \\
 r_x &= 4,03 \text{ cm} & I_t &= 0,013 \text{ cm}^4 & r_y &= 1,93 \text{ cm} \\
 I_w &= 246,61 \text{ cm}^6 & r_o &= 6,19 \text{ cm} & x_o &= 4,28 \text{ cm} \\
 r_o &= 6,19 \text{ cm} & r_f &= 1,2 \text{ mm} & & \\
 r_f &= 1,2 \text{ mm} & f_y &= 25 \text{ kN/cm}^2 & & \\
 E &= 20000 \text{ kN/cm}^2 & & & & \\
 G &= 7700 \text{ kN/cm}^2 & & & &
 \end{aligned}$$

(Fonte: Silva, Pierin e Pignatta (2014, p. 51))

Os resultados apresentados no exercício são:

$$\chi = 0,124$$

$$A_{ef} = 2,71 \text{ cm}^2$$

$$N_{c,Rd} = \chi \times A_{ef} \times f_y / 1,2 = 7,0 \text{ kN}$$

Para a verificação dos resultados à flexão em torno do eixo X, utilizou-se o exercício proposto na página 62, cujo enunciado é: “Cálculo do momento fletor resistente em torno do eixo X do perfil Ue (Perfil U enrijecido) 100x50x17x1,2. O comprimento da viga de 400cm, sem travamentos intermediários, submetido a um carregamento distribuído, resistência ao escoamento de 25,0 kN/cm²”. O exercício proposto utiliza o mesmo perfil apresentado na Figura 16 e apresenta os seguintes valores como resultados.

1. Início do escoamento:

$$W_{ef} = 8,6 \text{ cm}^2$$

$$M_{Rd} = W_{ef} \times f_y / 1,1 = 195,45 \text{ kN}$$

2. Instabilidade lateral com torção:

$$\chi_{FLT} = 0,322$$

$$M_{Rd} = W_{ef} \times \chi_{FLT} \times f_y / 1,1 = 64,6 \text{ kN}$$

Para a verificação do momento fletor resistente em torno do eixo Y, na página 67, Silva, Pierin e Pignatta propõe um exercício que utiliza os mesmo dados apresentados no exercício anterior. Os resultados apresentados no exercício são:

1. Início do escoamento:

$$W_{ef} = 2,96 \text{ cm}^2$$

$$M_{Rd} = W_{ef} \times f_y / 1,1 = 67,3 \text{ kN.cm}$$

2. Instabilidade lateral com torção:

$$\chi_{FLT} = 1,0$$

$$M_{Rd} = \chi_{FLT} \times W_{ef} \times f_y / 1,1 = 67,3 \text{ kN.cm}$$

Para a verificação quanto ao cisalhamento e ao efeito combinado do momento fletor e força cortante, Silva, Pierin e Pignatta propõe o exercício na página 71, que utiliza o mesmo perfil dos exercícios anteriores. O enunciado é: “Verificação quanto ao cisalhamento do perfil do exemplo 07 para uma força concentrada de cálculo no meio do vão da viga biapoiada no valor de 1,5 kN”. Os resultados obtidos no exercício são:

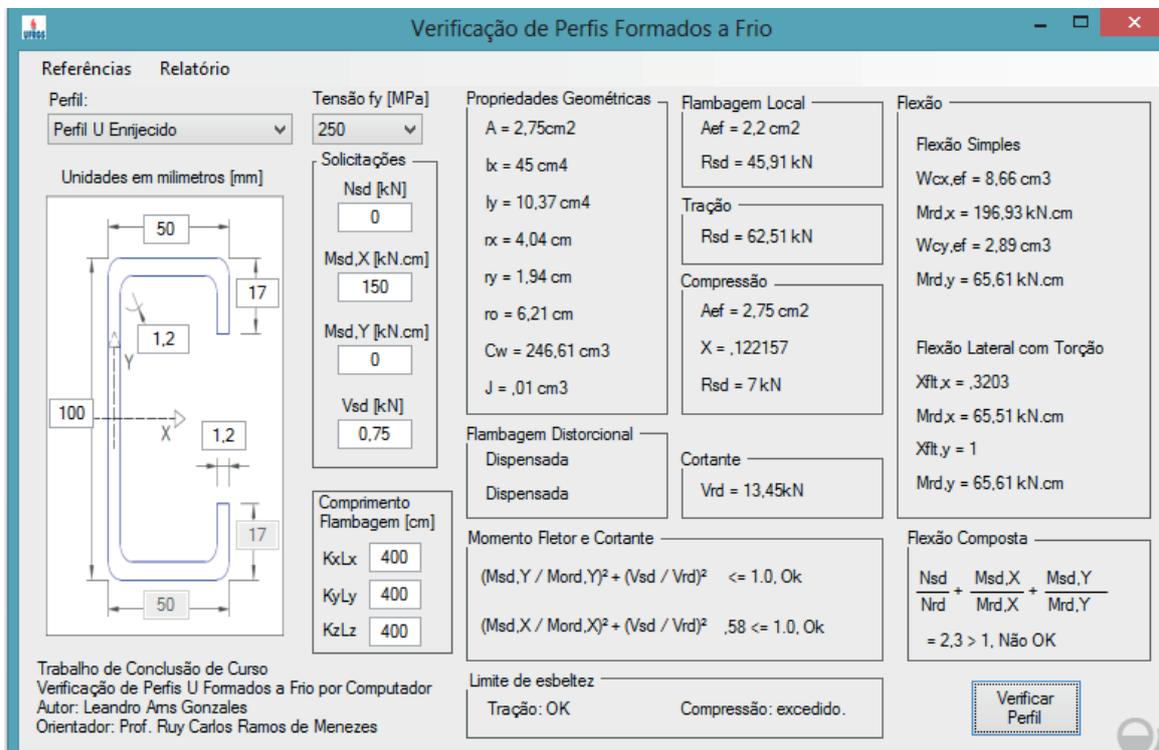
$$M_{sd} = 150 \text{ kN.cm}$$

$$V_{Rd} = 13,45 \text{ kN}$$

$$\left(\frac{M_{sd}}{M_{0,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{sd}}{V_{Rd}}\right)^2 = 0,592 \leq 1,0$$

Os resultados obtidos pelo programa, utilizando os dados dos exercícios propostos por Silva, Pierin e Pignatta para compressão, flexão simples, cortante e momento fletor e força cortante combinados, esta apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Verificação dos resultados



(Fonte: desenvolvido pelo autor)

5.4.2 Validação com Carvalho, Grigoletti e Barbosa

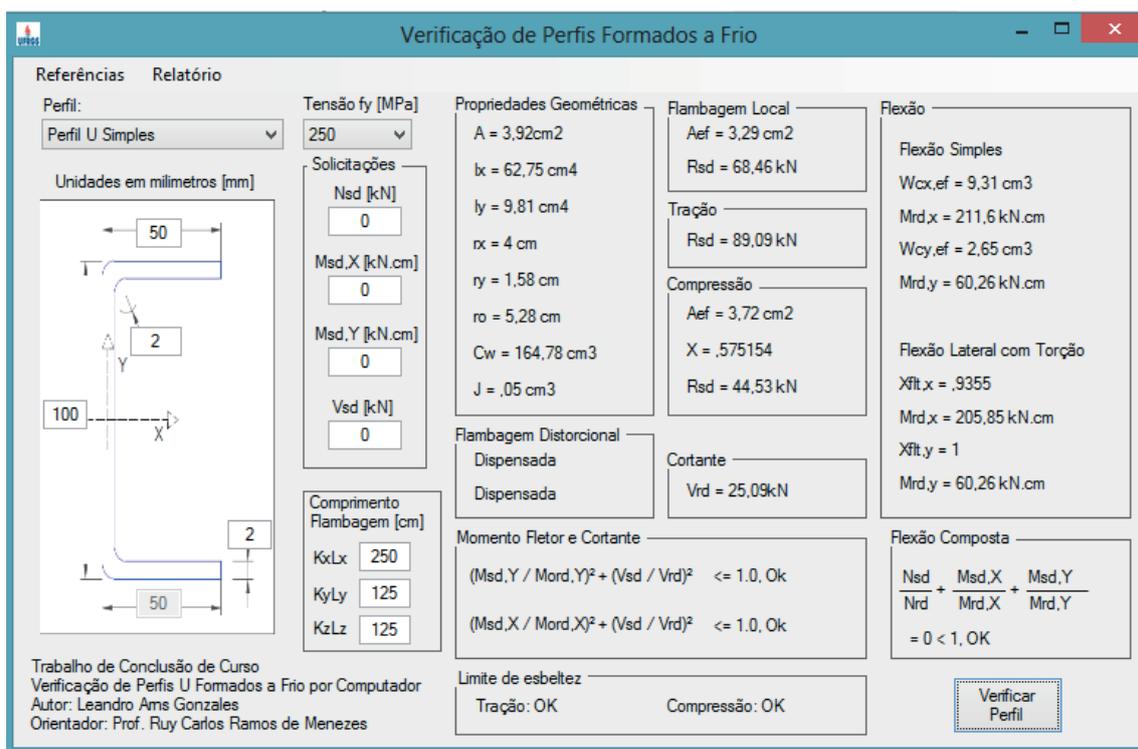
Para a verificação a compressão Carvalho, Grigoletti e Barbosa, propõe um exercício contido na página 122, cujo enunciado é: "A treliça abaixo tem modulação de 1,25m e 1,00m de altura. O banzo superior, que é constituído por um perfil U, está contido lateralmente a cada 2 nós. Verificar as condições de segurança dos banzos a e b, cujas solicitações de cálculo são". Os resultados apresentados no exercício são:

$$\chi = 0,581$$

$$N_{c,Rd} = \chi \times A_{ef} \times f_y / 1,2 = 41,63 \text{ kN}$$

A Figura 18 apresenta os resultados obtidos pelo o programa desenvolvido utilizando os dados do exercício de compressão, proposto por Carvalho, Grigoletti e Barbosa.

Figura 18 – Validação da compressão com Carvalho, Grigoletti e Barbosa



(Fonte: desenvolvido pelo autor)

Para a verificação à flexão simples Carvalho, Grigoletti e Barbosa propõe o exercício na página 154. O exercício se trata de verificar as condições de segurança de uma viga, bi apoiada, com vão de 4 metros e um travamento lateral no meio do vão, e uma solicitação de cálculo de $Msd = 16,00$ kN. O perfil que compõe a viga é o Ue (perfil U enrijecido) 200x75x25x2,65, utilizando uma resistência ao escoamento de $25,0$ kN/cm². Os resultados apresentados no exercício são:

1. Início do escoamento:

$$W_{ef} = 59,71 \text{ cm}^3$$

$$M_{Rd} = W_{ef} \times f_y / 1,1 = 1899,86 \text{ kN.cm}$$

2. Instabilidade lateral com torção:

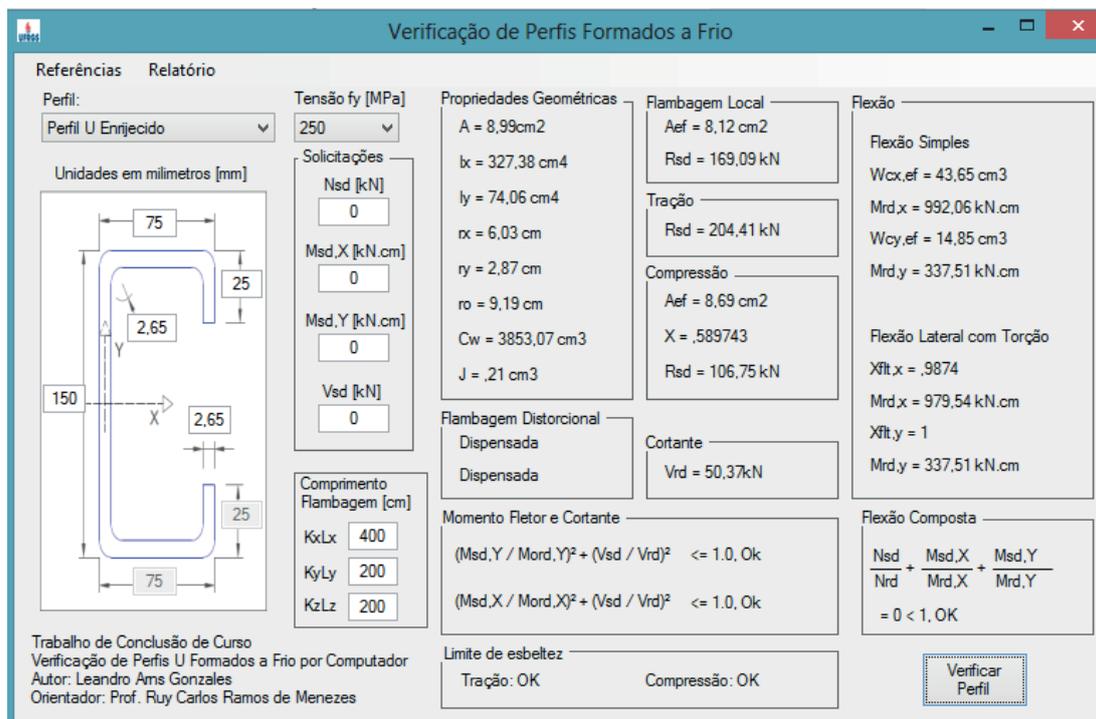
$$\chi_{FLT} = 0,958$$

$$M_{Rd} = \chi_{FLT} \times W_{ef} \times f_y / 1,1 = 1847 \text{ kN.cm}$$

No exercício, se realiza o cálculo do fator de modificação para diagrama de momentos fletores não uniformes (C_b) e que se obtém um valor igual a 1,3. O programa não realiza este cálculo e sempre adota $C_b = 1,0$.

A Figura 19 apresenta os resultados do exercício de flexão obtidos pelo programa.

Figura 19 – Validação da flexão com Carvalho, Grigoletti e Barbosa



(Fonte: desenvolvido pelo autor)

Para a verificação a força cortante, Carvalho, Grigoletti e Barbosa, propõe o exercício na página 217. Que se trata de verificar as condições de segurança a cisalhamento de uma viga biapoiada, com carregamento uniforme, com vão de 7,62 metros, composto pelo perfil Eu (Perfil U enrijecido) 203x70x16x4,76 e uma resistência de escoamento de 380 MPa. Os resultados do exercício são:

$$V_{Rd} = 15,2 \text{ kN}$$

O resultado obtido do exercício, utilizando o programa, esta apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Validação a força cortante com Carvalho, Grigoletti e Barbosa

Referências Relatório

Perfil: Perfil U Enrijecido

Unidades em milímetros [mm]

Tensão f_y [MPa]: 250

Solicitações

Nsd [kN]: 0

Msd,X [kN.cm]: 0

Msd,Y [kN.cm]: 0

Vsd [kN]: 0

Comprimento Flambagem [cm]

KxLx: 762

KyLy: 762

KzLz: 762

Propriedades Geométricas

A = 5,61 cm²

$I_x = 355,14$ cm⁴

$I_y = 35,35$ cm⁴

$r_x = 7,96$ cm

$r_y = 2,51$ cm

$r_o = 9,61$ cm

$C_w = 2795,11$ cm³

J = ,04 cm³

Flambagem Local

Aef = 3,55 cm²

Rsd = 73,96 kN

Tração

Rsd = 127,45 kN

Compressão

Aef = 5,61 cm²

X = ,075186

Rsd = 8,78 kN

Flambagem Distorcional

Dispensada

Dispensada

Momento Fletor e Cortante

$(Msd,Y / Mord,Y)^2 + (Vsd / Vrd)^2 \leq 1,0$, Ok

$(Msd,X / Mord,X)^2 + (Vsd / Vrd)^2 \leq 1,0$, Ok

Limite de esbeltez

Tração: excedido. Compressão: excedido.

Flexão

Flexão Simples

$W_{cx,ef} = -105,06$ cm³

$Mrd,x = -2387,64$ kN.cm

$W_{cy,ef} = 6,85$ cm³

$Mrd,y = 155,67$ kN.cm

Flexão Lateral com Torção

$X_{fit,x} = ,1419$

$Mrd,x = 112,88$ kN.cm

$X_{fit,y} = 1$

$Mrd,y = 128,26$ kN.cm

Flexão Composta

$$\frac{Nsd}{Nrd} + \frac{Msd,X}{Mrd,X} + \frac{Msd,Y}{Mrd,Y} = 0 < 1, OK$$

Trabalho de Conclusão de Curso
Verificação de Perfis U Formados a Frio por Computador
Autor: Leandro Ams Gonzales
Orientador: Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes

Verificar Perfil

(Fonte: desenvolvido pelo autor)

5.4.3 Resumo da Validação dos Resultados

A Tabela 6 apresenta os resultados dos exercícios juntamente com os resultados obtidos através do programa. Nota-se que há diferença entre os resultados. Estas se dão em parte pela diferença na precisão do cálculo, já que os exemplos utilizam até duas casas decimais e o programa utiliza uma precisão muito maior e, principalmente, devido aos diferentes métodos de cálculo das propriedades geométricas da seção.

Tabela 6 – Resumo dos Resultados

Exercício		Edson Lubas	Programa	Carvalho	Programa
Tração		78,82 kN	80,00 kN		
Compressão		7,00 kN	7,00 kN	41,63 kN	44,53 kN
Flexão Simples em X	Início do escoamento	195,45 kN.cm	196,93 kN.cm	1899,86 kN.cm	1992,50 kN.cm
	Lateral com Torção	64,60 kN.cm	65,61 kN.cm	1847,00 kN.cm	1885,24 kN.cm
Flexão Simples em Y	Início do escoamento	67,30 kN.cm	65,51 kN.cm		
	Lateral com Torção	67,30 kN.cm	65,61 kN.cm		
Cortante		13,45 kN.cm	13,45 kN.cm	15,20 kN.cm	15,17 kN.cm
Momento e Cortante		0,592	0,58		

(Fonte: desenvolvido pelo autor)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do trabalho foi apresentado como se realiza a verificação das resistências de perfis formados a frio, para esforços de tração, compressão, flexão e cisalhamento, todos de forma individual e a combinação de esforços solicitantes. Assim como as características dos materiais e o método de cálculo das propriedades geométricas da seção, que são essenciais para a execução da verificação.

Em relação ao programa desenvolvido, julga-se que o objetivo proposto foi alcançado, já que a ferramenta é capaz de realizar todas as verificações de resistências dos perfis propostos, com grande precisão, como apresentado no capítulo 5.3.3.

Embora o programa tenha alcançado seu objetivo, ele é muito restrito e ainda necessita de melhorias, seu uso é indicado apenas para análise de elementos isolados, ou para fins acadêmicos. Sugere-se para trabalhos futuros, a ampliação de possibilidades de perfis a serem verificados e a possibilidade de realizar uma análise distorcional das seções.

REFERÊNCIAS

SILVA, Edson Lubas; PIERIN, Igor; PIGNATTA, Valdir – **Estruturas compostas por perfis formados a frio**: Dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012. Rio de Janeiro, 2014

CARVALHO, PRM; GRIGOLETTI, Gladimir; BARBOSA, Giovana Daltrozo. **Curso Básico de Perfis de Aço Formados a Frio**. Porto Alegre, 2004.

YU, Wei-Wen; LABOUBE, Roger A. **Cold-formed steel design**. John Wiley & Sons, 2010

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

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