



Centro Universitário de Brasília - UNICEUB

Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATECS

ALLISON JONATH DE LIMA

ANÁLISE ESTRUTURAL DE VIGAS EM PERFIS FORMADOS A FRIO, SUBMETIDOS  
À FLEXÃO SIMPLES PELO METODO DA SEÇÃO EFETIVA (MSE)

Brasília

2018

ALLISON JONATH DE LIMA

ANÁLISE ESTRUTURAL DE VIGAS EM PERFIS FORMADOS A FRIO, SUBMETIDOS  
À FLEXÃO SIMPLES PELO METODO DA SEÇÃO EFETIVA (MSE)

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de engenharia Civil do Centro Universitário de Brasília (UNICEUB), como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Eng. Henrique de Paula, MSc.

Brasília

2018

ALLISON JONATH DE LIMA

ANÁLISE ESTRUTURAL DE VIGAS EM PERFIS FORMADOS A FRIO, SUBMETIDOS  
À FLEXÃO SIMPLES PELO METODO DA SEÇÃO EFETIVA (MSE)

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de engenharia Civil do Centro Universitário de Brasília (UNICEUB), como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Eng. Henrique de Paula Faria, MSc

Brasília 30 jul. 2018

Banca Examinadora

---

Eng. Civil Henrique de Paula Faria, MSc

Orientador – Uniceub

---

Eng. Civil Honório Assis Filho Crispim, DSc.

Examinador Interno – Uniceub

---

Eng. Civil Ricardo Braz

Examinador Externo - R2 Engenharia

Dedico à minha família, onde encontrei carinho  
e apoio para suportar e transpor as dificuldades.  
A vocês, minha eterna gratidão.

## **AGRADECIMENTO**

A Deus, por me guiar com sua luz divina, permitindo seguir em frente com coragem e fé, enfrentando obstáculos necessários para o amadurecimento pessoal, profissional e espiritual.

Aos meus pais, a quem devo os ensinamentos de amor, respeito e responsabilidade e, sobretudo, por serem os principais responsáveis por minhas conquistas.

Ao professor, Henrique de Paula Faria, MSc pela orientação e apoio durante a trajetória.

Ao professor e Coordenador do curso, Jocinez Nogueira Lima, MSc pelo apoio durante todo curso.

Aos colegas de turma, pela amizade e valiosas trocas de conhecimentos durante essa caminhada.

A todos os docentes do Curso de Engenharia Civil, por compartilharem suas vivências e conhecimentos imprescindíveis para uma carreira profissional.

“Motivação é o empenho de aumentar ou manter tão alto quanto possível a capacidade de um indivíduo, afim de que este possa alcançar excelência na execução das atividades, das quais depende o sucesso ou o fracasso da organização à que pertence.”

**MANZOLLI**

## RESUMO

Perfis estruturais formados a frio, tem seu dimensionamento complexo e trabalhoso, cada vez mais empregado na construção civil, mais profissionais buscam forma de facilitar esse trabalho de cálculo, com isso tem se desenvolvidos métodos e planilhas de pré-dimensionamento desses perfis. Um dos métodos desenvolvidos recentemente é o método da seção efetiva (MSE), bem mais prático de pôr em prática no dia-a-dia da construção, cabe destacar que esse método é limitado para algumas seções de perfis formado a frio. Nesse trabalho de conclusão de curso, apresentam-se as principais características de perfis de aço formado a frio, seus processos de fabricação e seu comportamento estrutural, submetido ao esforços de flexão simples para o perfil U enrijecido, utilizando o mais recente método de dimensionamento, partindo das definições, suas propriedades, suas características geométricas, mecânicas e analisando seu comportamento estrutural, de acordo com as prescrições da normas brasileiras: NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço formado a frio – Procedimento e NBR 6355:2012 – Perfis estruturais formados a frio – Padronização.

Palavras-chave: Perfis formados a frio. Viga de aço. Dimensionamento estrutural.

## **ABSTRACT**

Cold-formed structural profiles have a complex and laborious dimensioning, which is increasingly used in civil construction. That's why professionals pursue ways to facilitate the task of calculation, so it has developed methods and worksheets for pre-scaling of these profiles. One of the methods developed recently is the method of effective section (MSE), what is more practical to put into practice in the day-to-day construction. It is worth noting that this method is limited to a few sections of cold- formed profiles. In this work, the main characteristics of cold-formed steel profiles, their manufacturing processes and their structural behavior are submitted to the simple flexural stresses for the stiffened U-profile, using the latest sizing method, starting from the definitions, their properties, their geometrical, mechanical characteristics and analyzing their structural behavior, according to the prescriptions of the Brazilian norms: NBR 14762: 2010 - Sizing of cold-formed steel structures - Procedure and NBR 6355: 2012 - Structural Profiles - NBR 14762: 2010 - Sizing of cold formed steel structures - Procedure and NBR 6355: 2012 - Structural profiles cold formed - Standardization.

**Keywords:** Profiles formed in the cold. Steel beam. Structural dimensioning.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Lingote de Aço.....	18
Figura 2- Rolos Laminadores .....	18
Figura 3- Bobinas de Aço no mandril desenrolador.....	23
Figura 4- Tesoura Rotativa.....	24
Figura 5- Tiras em Bobinas .....	24
Figura 6- Tira de aço no início da perfiladeira .....	25
Figura 7- Perfiladeira.....	25
Figura 8- Estoque de Perfis .....	26
Figura 9- Bobinas no mandril para desbobinamento.....	27
Figura 10- Rolos aplanadores .....	27
Figura 11- Corte da chapa .....	28
Figura 12- Dobradeira vista de frente.....	28
Figura 13- Conformação da Chapa.....	29
Figura 14- Posição do Centro de torção em perfil de seção aberta tipo Ue .....	33
Figura 15- Perfil após flambagem por distorção .....	35
Figura 16- Instabilidade distorcional.....	35
Figura 17- Trecho comprimido de uma viga submetida à flexão do tipo Ue.....	36
Figura 18 - Perfil Ue seção aberta .....	40
Figura 19 - Perfil Ue seção caixa.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Chapas finas de aço especificados por normas brasileiras para uso estrutural .....	22
Tabela 2- Demais aço para PFF.....	22
Tabela 3- Séries comerciais mais usuais de perfis estruturais e respectivas designações .....	30
Tabela 4- Valores do coeficiente $k_l$ de seção completa em barras sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia .....	46
Tabela 5- Valores do coeficiente $k_l$ de seção completa em barras sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia .....	47
Tabela 6- Valores mínimos da relação $D/b_w$ de seções do tipo $U_e$ e $Z_e$ sob flexão simples em torno do eixo de maior inercia, para dispensar a verificação da flambagem distorcional.....	50
Tabela 7- Deslocamentos máximos.....	53
Tabela 8 - Resultados da análise para seção tipo U enrijecido aberta.....	60
Tabela 9- Resultados da análise para seção tipo U enrijecido caixão .....	65
Tabela 10- Interface da Planilha do Excel.....	68
Tabela 11- Perfil 200x75x25 # 3,00 de seção aberta para uma vão de 6,0 metros .....	70
Tabela 12- Perfil 200x75x25 # 3,00 de seção fechada para um vão de 6,0 metros.....	71
Tabela 13- Resumo dos resultados dos softwares Cype3D e mCalc_perfis respectivamente..	73
Tabela 14 Tabela de Comparação dos resultados planilha e software para seção aberta.....	74
Tabela 15 Tabela de Comparação dos resultados planilha e software para seção caixa.....	74

## NOMENCLATURA

$A$  – Área da seção transversal de um perfil;

$b_w$  – Altura da alma do perfil;

$b_f$  – Largura da mesa do perfil;

$b_2$  – Largura efetiva reduzida da alma e adotada para o cálculo das propriedades da seção efetiva;

$b_1$  – Largura efetiva reduzida da mesa e adotada para o cálculo da propriedade da seção efetiva;

$b_4$  – Largura efetiva reduzida da mesa e adotada para o cálculo da propriedade da seção efetiva;

$C_b$  – Coeficiente de equivalência de momentos na flexão;

$C_w$  – Constante de empenamento;

$D$  – Largura nominal de um enrijecedor de borda;

$E$  – Módulo de elasticidade do aço (200.000 Mpa);

$F_{max}$  – Flecha máxima;

$F_{adm}$  – Flecha máxima admissível;

$F_y$  – Tensão de escoamento do aço;

$G$  – Módulo de elasticidade transversal do aço ( $\sim 0,385 E$ );

$I$  - Inércia à flexão;

$I_{b2x}$ ;  $I_{b2y}$  – Momento de inércia da alma do perfil aos eixos X e Y respectivamente;

$I_{b1x}$ ;  $I_{b1y}$  – Momento de inércia da mesa do perfil aos eixos X e Y respectivamente;

$I_{b4x}$ ;  $I_{b4y}$  – Momento de inércia do enrijecedor de mesa do perfil aos eixos X e Y respectivamente;

$I_x$ ;  $I_y$  – Inércia total da seção do perfil em relação aos eixos X e Y respectivamente;

$J$  – Momento de inércia à torção uniforme;

$K$  – Parâmetro de flambagem em função das condições de contorno a barra;

$K_x L_x$ ;  $K_y L_y$  – Comprimento de flambagem por flexão em relação aos eixos X e Y respectivamente;

$K_z L_z$  – Comprimento de flambagem por torção;

$K_l$  – Coeficiente de flambagem local para a seção completa;

$L$  – Vão da viga;

$M_e$  - Momento crítico de flambagem elástica lateral com torção;

$M_{rd}$  – Momento fletor resistente;

$M_{sd}$  – Momento fletor solicitante;

$r_0$  – Raio de giração polar da seção bruta em relação aos eixos de cisalhamento;

$r_x$ ;  $r_y$  – Raio de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia;

$t$  – Espessura do perfil;

$V_{rd}$  – Resistência de cálculo ao esforço cortante;

$V_{sd}$  – Força cortante de cálculo;

$x_0$ ;  $y_0$  – Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principais X e Y, respectivamente, em relação ao centroide da seção;

$W_{ef}$  – Módulo resistente elástico da seção efetiva relativa ao início do escoamento da seção;

$W_c$  – Módulo elástico resistente em relação à fibra comprimida;

$W_{c,ef}$  – Módulo resistente elástico da seção efetiva relativa a flambagem lateral por torção;

### **Letra Gregas**

$\chi_{fl}$  – Fator de redução associado a flambagem lateral com torção da barra;

$\gamma$  – Coeficiente de ponderação de ações;

$\nu$  – Coeficiente de Poisson ( $\nu = 0,3$  para aço)

$\lambda_p$  – Índice de esbeltez reduzido de um elemento;

$\lambda_{dist}$  – Índice de esbeltez reduzido referente à flambagem por distorção;

## LISTA DE ABREVEATURAS

MSE – Método da Seção Efetiva;

PFF – Perfil Formado a Frio;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

AISI – American Iron and Steel Institute

NBR - Norma Brasileira Regulamentada;

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

PUCRS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul;

UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos;

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia;

PUCRIO – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro;

USP/SC – Universidade Paulista Santa Catarina;

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais;

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto;

ASTM – American Society Standards Testing of Material;

MLE – Método da Largura Efetiva;

MRD – Método da Resistência Direta;

CBCA – Centro Brasileiro da Construção em Aço;

Ue – U enrijecido

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	15
<b>1 OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
1.1 Objetivo Geral.....	16
1.2 Objetivos específicos .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 História do Aço.....	17
2.2 Laminação .....	17
2.3 Laminação à quente.....	19
2.4 Laminação à frio .....	19
2.5 PFF – Perfis Formados a Frio .....	19
2.6 Definição .....	20
2.7 Propriedades.....	21
2.8 Processo de Fabricação .....	23
2.9 Padronização dos Perfis segundo a NBR 6355: 2012.....	29
2.10 Comportamento Estrutural do PFF á flexão.....	31
2.10.1 Flambagem .....	32
2.10.2 Torção e Empenamento.....	32
2.10.3 Modos de Instabilidade.....	33
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>38</b>
<b>4 DIMENSIONAMENTO SEGUNDO NBR 14762:2010 .....</b>	<b>39</b>
4.1 Características geométricas de PFF tipo Ue de seção aberta e caixa.....	40
4.1.1 Perfil Ue Seção Aberta .....	40
4.1.2 Perfil Ue duplamente simétrico (tipo caixa).....	43
4.2 Cálculo do momento Fletor resistente ao cálculo (MRd) conforme NBR14762:2010 .....	44
4.2.1 Início de escoamento da seção efetiva .....	45
4.2.2 Flambagem lateral com torção .....	47
4.2.3 Flambagem distorcional.....	49
4.3 Força cortante .....	50
4.4 Momento fletor e força cortante combinados .....	51
4.5 Calculo de deslocamento .....	51
<b>5 EXEMPLO PRÁTICO .....</b>	<b>54</b>
5.1 Perfil seção aberta.....	54
5.1.1 Cálculo do momento Fletor resistente ao cálculo (Mrd) .....	57
5.1.2 Força cortante.....	58

5.1.3	<i>Momento fletor e força cortante combinados</i> .....	59
5.1.4	<i>Cálculo de deslocamento</i> .....	59
5.2	<b>Perfil seção fechada (caixão)</b> .....	61
5.2.1	<i>Cálculo do momento Fletor resistente ao cálculo (Mrd)</i> .....	62
5.2.2	<i>Força cortante</i> .....	64
5.2.3	<i>Momento fletor e força cortante combinados</i> .....	64
5.2.4	<i>Cálculo de deslocamento</i> .....	64
6	<b>ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DA PLANILHA</b> .....	66
6.1	<b>Diretrizes</b> .....	66
6.2	<b>Sobre à da Planilha</b> .....	66
7	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	69
7.1	<b>Resultados da Planilha</b> .....	69
7.2	<b>Sobre os Softwares</b> .....	72
7.3	<b>Resultado dos Softwares</b> .....	72
7.4	<b>Comparação do Resultados</b> .....	74
8	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	75
8.1	<b>Sugestões de pesquisa futura</b> .....	76
	<b>CONCLUSÃO</b> .....	77
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	78
	<b>ANEXO A Memória de Cálculo do Cype3D 2016 (Seção Aberta)</b> .....	81
	<b>ANEXO B Memória de Cálculo mCalc_Perfis (Seção Fechada)</b> .....	85

## INTRODUÇÃO

Os perfis formados a frio PFF são elementos de aço que atendem bem às exigências da construção de aço e são cada vez mais utilizados em obra e pequeno a médio porte, como galpões industriais, cobertura, reforço de laje, mezaninos entre outros, são perfis formados por chapas finas com espessura em 0,40 mm a 8,0 mm. Cabe destacar, que os perfis podem ser fabricados em até 19 mm de aço e podem ser galvanizadas ou não. São vários os motivos da expansão do PFF, dentre elas está, a demanda em vencer grandes vãos, facilidade na fabricação, montagem do material, transporte matéria prima, tais como: bobinas de aço, chapas planas, perfil dobrado, treliças planas e especiais e etc.

Os PFF são submetidos aos esforços de tração, compressão, flexão, cisalhamento, torção, flexo-torção, seu dimensionamento é apresentado pela **NBR 14762:2010 Dimensionamento de Estruturas de Aço constituídas por Perfis Formados a Frio**, diferentemente dos demais perfis de aços (laminados e soldados) que seu dimensionamento é apresentado na **NBR 8800:2008 Projeto de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifício**, o dimensionamento desses perfis submetidos à flexão é complexo e trabalhoso, tendo em vista à grande quantidade de cálculos e análises dos vários modos de instabilidade a serem verificados. Para auxiliar os estudantes de engenharia e profissionais da área, elaboram-se planilhas de pré-dimensionamento desses perfis submetidos à flexão simples contendo informações a respeito de sua resistência, modo de colapso ou instabilidade, e os vão máximos a serem empregados. Com o uso dessas planilhas é possível analisar perfis com diferentes seções transversais, também facilitam na escolha rápida de perfis para o pré-dimensionamento orçado.

Nesse trabalho será apresentado uma análise estrutural de uma viga de perfil U enrijecido formada a frio em diferentes seções submetida à flexão simples em determinado vão, obtendo suas propriedades geométricas e sua resistência a flexão, seu carregamento máximo, entre outras propriedades de acordo com a NBR 14762:2010, pelo método da seção efetiva (MSE), o seu resultado será apresentado em uma planilha de Excel contendo toda a análise da viga, sendo ela em seção aberta ou seção fechada (caixão), o seu resultado será comparado com dois programas computacionais utilizados no dia a dia por profissionais da área sendo esses: O mCalc\_Perfis da Stabile e o Cype3D da Múltiplos, afim de verificar a eficiência do método empregado apenas em uma planilha de Excel.

# **1 OBJETIVOS**

## **1.1 Objetivo Geral**

Obtenção de propriedade geométricas e mecânicas e a análise de vigas metálicas em perfis de perfil U enrijecido formada a frio bi apoiada, submetido a flexão simples pelo método das seções efetivas (MSE) de acordo com as NBR 6355:2012 – Perfis estruturais formados a frio – Padronização e NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço formado a frio – Procedimento.

## **1.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos são:

- Apresentação do PFF e suas características estruturais
- Determinação de suas propriedades geométricas e mecânicas de perfis U enrijecido de seção aberta e fechada (caixão).
- Verificação do carregamento máximo distribuído para perfil U enrijecido em determinado vão analisando a resistência desse perfil em seção aberta e tipo caixa submetido a flexão simples e seu deslocamento máximo (flecha) pelo método da seção efetiva (MSE).
- Elaboração de uma planilha em Excel para análise obtenção rápida dos resultados
- Apresentação dos resultados obtidos.
- Comparação dos resultados obtidos com os programas computacionais de PFF, mCalc\_Perfis da Stabile e o Cype3D versão 2016.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 História do Aço**

Os primeiros indícios do surgimento do aço surgiram a aproximadamente a 6.000 anos A.C, em civilizações como Egito, Babilônia, e Índia, nessa época era um material considerado nobre devido a sua raridade.

Com o auge da produção em meados do século XVII, desenvolveram-se processos para elaboração e conformação desse metal.

A utilização em alta escala teve destaque na revolução industrial em meados do século XIX, em países desenvolvidos, tais como Inglaterra, França e Alemanha.

A conformação desse metal se dar por diversos processos, o mais utilizado é o método de laminação.

### **2.2 Laminação**

A Laminação é um processo utilizado para a conformação de metais, isso se dá no momento em que o metal passa entre dois rolos giratórios que comprimem o metal, diminuindo a espessura e aumentando o seu comprimento. Esse processo permite um alta produtividade e boa precisão dimensional, além de uma certa variedade de forma. Neste momento o metal é submetido a tensões compressivas e tensões cisalhantes superficiais resultando da ação dos dois rolos sobre o material.

A laminação pode ser realizada em temperaturas elevadas, (metade da temperatura de fusão que chega a 1538 ° C), sendo então conhecida como laminação à quente, ou à temperatura ambiente, sendo conhecida como laminação à frio. O laminador consiste em um conjunto de rolos, mananciais, uma carcaça (“gaiola”, cuja a função é envolver e suportar todo o conjunto) e um motor (cuja a função é fornecer a potência aos rolos e controlar a velocidade de rotação). O laminador mais simples é o duo (figura 2-a), no qual dois rolos com o mesmo diâmetro giram no mesmo sentido, no laminador duo reversível (figura 2-b) o material pode passar para frente para trás entre os rolos, que invertem o sentido da rotação (figura 2-c), existe também o laminador com dois rolos, nos quais dois estão em contato com material que está sendo laminado, e os outros como rolos de suporte. É o caso dos laminadores quadruplo (4 rolos) (figura 2-d) e laminadores agrupados (vários rolos).

Normalmente o processo inicial é a laminação a quente, que reduz a espessura do material o suficiente para que este, já transformado do **lingote** (peça de aço maciça refinado em tira contínua- figura 1) em chapa grossa, possa se submeter a laminação à frio, que permite uma melhor precisão na espessura e no resultado de um produto semielaborado (chapas finas, tira ou folhas com ótimas propriedades mecânicas, resultante da microestrutura refinada obtida pela laminação a frio). Este produto é vendido pelas usinas siderúrgicas ao fabricante de vários tipos de produtos, um deles são os perfis estruturais.

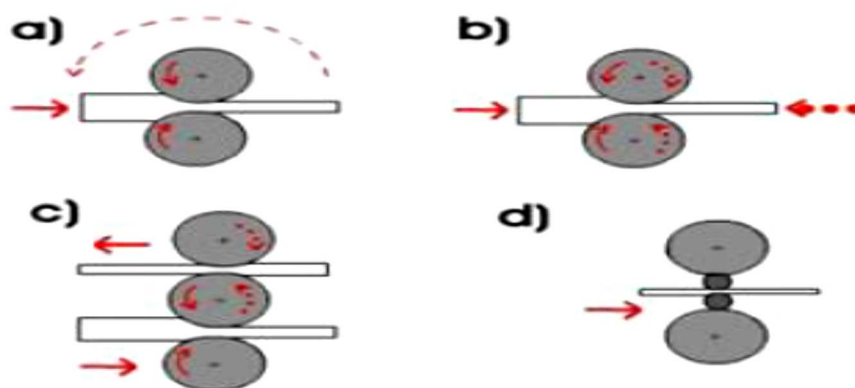
Figura 1- Lingote de Aço



Fonte: Steelcastingmachine, 2018

Figura 2- Rolos Laminadores

a) Laminador Duo b) Laminador Duo reversível c) Laminador Trio d) Laminador Quádruplo.



Fonte: MMborges,2018

### **2.3 Laminação à quente**

Executada no início do processo de laminação, a operação inicial de laminação a quente é realizada no laminador primário de desbaste, que recebe o lingote solidificado e transforma numa chapa ainda bastante grossa. Este laminador apresenta geralmente a configuração de duo reversível. Normalmente a laminação a quente de aços começa com temperaturas entre 1.100 e 1.300°C e termina entre a ordem de 700 a 900°C.

### **2.4 Laminação à frio**

É um processo de conformação complementar, que sucede a laminação à quente e tem por objetivo a produção de chapa finas, tiras e folhas de aço com melhores tolerância dimensionais e microestruturas mais refinadas, obtendo propriedades mecânicas adequadas para a aplicação desse produto nas indústrias. A laminação à frio é intercalada com tratamentos térmicos de recozimento, que restauram a ductilidade do material (normalmente por recristalização), que diminui sensivelmente pelo encruamento associado a deformação plástica introduzida no processo de conformação mecânica. Nesse processo forma uma camada de óxido sobre a superfície, com decorrência do aquecimento realizado no recozimento, geralmente para a remoção de óxido o material é mergulhado em tanques contendo soluções ácidas (ácido sulfúrico ou clorídrico concentrado), esse método é conhecido com decapagem. Mediante a realização desses tratamentos intercalados com laminações sucessivas, é possível reduzir a espessuras das chapas entre 50 e 90%.

No caso de aços que apresentam limite de escoamento descontínuo, associados a formação das chamadas bandas de Lüder, a prática consiste na redução final à frio no aço recozido, denominada passe de acabamento superficial, esse passe de acabamento proporciona a melhora do acabamento da superfície do material e o melhor controle da espessura (bitola). Existe outros métodos com essa finalidade, que são o aplainamento por rolos e o desempenho a tração.

### **2.5 PFF – Perfis Formados a Frio**

Os perfis formados à frio – *PFF* surgiram em meados do século XIX e logo em seguida se espalhou por todo mundo até chegar ao Brasil.

Os *PFF* logo no ano de 1850, foram usados nos Estados Unidos e Inglaterra.

1939 – Iniciaram-se pesquisas sobre esse material na Universidade de Cornell (EUA), sob orientação do Prof. George Winter;

1940 – Inicia-se o emprego em maior escala do *PFF* nos Estado Unidos;

1946 – Publicada a primeira norma para projetos e construções em estruturas de *PFF*;

1967 – Brasil: é publicado um projeto na norma (PNB 143/67) baseado na norma americana de *PFF* – AISI/62

1970 – O uso do *PFF* é consolidado na Construção Civil dos Estados Unidos;

1978 – Brasil: os Prof. Hennemann e Riera da UFRGS ministram um curso de extensão do *PFF*;

1980 – Brasil: no centro do país (SP, RJ e MG) existe, por desconhecimento, um grande preconceito em relação ao uso do *PFF*, enquanto no interior constroem-se em larga escala com o *PFF*;

1981 – Precisamente em agosto é iniciado na PUCRS, o primeiro curso regular em estruturas com *PFF*;

1984 – Em março deste ano o Prof. Tamagna ministra um curso de *PFF* na UNISINOS;

1990 – Surge excelentes centros de pesquisas e estudo do *PFF* em alguma universidade brasileira: COPPE, PUC-Rio, USP/SC, UFMG e UFOP.

No final dos anos de 1990 observa-se o bom do *PFF* no Brasil, sendo oferecidos diversos cursos de extensão em *PFF*, matéria que é adotada em cursos regulares de estrutura metálica e empresas começam a adotar o *PFF* em suas obras.

2001 – Precisamente em dezembro desse ano é publicada a tão esperada norma brasileira de *PFF*: a **NBR 14762:2001**.

2009 – Um grupo de pesquisadores brasileiros inicia a revisão do texto de 2001, apresentando um projeto de norma, cujo o grande avanço é inovador Método da Seção Efetiva (MSE), proposto pelo Prof. Eduardo Batista.

2010 – Em agosto com o texto aprovado, após consulta nacional, entra em vigor a nova **NBR 14762: 2010**.

## 2.6 Definição

De acordo com a NBR 6355:2012 – Perfis estruturais formados à frio – Padronização (item 3.1), o perfil estrutural de aço formado à frio é definido com um “ perfil obtido por dobramento, em prensa dobradeira, de tiras de chapas ou bobinas, ou por conformação continua de matrizes

rotativas, a partir de bobinas laminadas a frio ou a quente, revestidas ou não, sendo ambas as operações realizadas com o aço em temperatura ambiente. ”

Toda parte constituinte de um perfil formado a frio (mesa, alma, enrijecido, etc.) é definido por essa norma como elemento.

## 2.7 Propriedades

A NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituída por perfis formados a frio (item 4.1.1). Recomenda o uso de aços com qualificação estrutural e que possuam propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho à frio. Devem apresentar a relação entre a resistência a ruptura e a resistência ao escoamento  $F_u/F_y$ , maior ou igual a 1,08 e o alongamento após ruptura não devem ser maiores que 10%, para base de medidas igual a 50 mm ou 7% para base de medida igual a 200 mm, tornando-se como referência os ensaios de tração conforme ASTM A 370. Tendo as propriedades mecânicas como:

1. Modulo de Elasticidade,  $E = 200$  GPa.
2. Coeficiente de Poisson,  $\nu = 0,3$ .
3. Modulo de elasticidade transversal,  $G = 77$  GPa.
4. Massa especifica,  $\rho = 7850$ kg/m<sup>3</sup>.

A tabela 1 apresenta os valores nominais mínimos da resistência ao escoamento ( $F_y$ ) e da resistência a ruptura ( $F_u$ ) de aços relacionados por Normas Brasileiras referentes a chapas finas para uso estrutural, e na tabela 2 apresenta demais aços utilizados na fabricação de PFFs com nomenclaturas mais usuais no mercado.

Tabela 1- Chapas finas de aço especificados por normas brasileiras para uso estrutural

Especificação	Grau	$F_y$ (Mpa)	$F_u$ (Mpa)
ABNT NBR 6649/ NBR6650 Chapas finas (a frio/a quente) de aço carbono	CF-26	260/260	400/410
	CF-28	280/280	440/400
	CF-30	.../300	.../300
ABNT NBR 5004 Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica	F-32/Q-32	310	410
	F-35/Q-35	340	450
	Q-40	380	480
	Q-42	410	520
	Q-45	450	550
ABNT NBR 5920/ NBR 5921 Chapas finas e bobinas(a frio/a quente) de aço de baixa liga, resistentes a corrosão atmosférica	CFR 400	.../250	.../380
	CFR 500	310/370	450/490
ABNT NBR 7008/ NBR 7013/ NBR 14964 Chapas finas e boninas finas com revestimento metálico	ZAR 250	250	360
	ZAR 280	250	380
	ZAR 320	250	390
	ZAR 345	250	430
	ZAR 400	250	450
A faixa de espessura disponível varia de acordo com o produtor do aço Grau conforme NBR 7008			

Fonte: ABNT,2010.

Tabela 2- Demais aço para PFF

Aço	$F_y$ (Mpa)	$F_u$ (Mpa)	Espessuras disponíveis (mm)	Características
SAE 1010	180	330		Aço comercial
ASTM A36	250	400	2,0 a 150	Estrutural
ASTM A570 GR 36	250	365	2,0 a 5,84	Estrutural
COR-AR-COR 400	250	380	2,0 a 100	Aço Patinável
COS-CIVIL-300	300	400	2,0 a 150	Estrutural Especial
USI-SAC-300	300	400	2,0 a 12,7	Aço Patinável
COR-AR-COR 400 E	300	380	2,0 a 12,7	Aço Patinável
CSN-COR 420	300	420	2,0 a 6,35	Aço Patinável
COS-CIVIL-350	350	490	2,0 a 50,8	Estrutural Especial
ASTM A570 GR 50	345	450	2,0 a 5,84	Estrutural
USI-SAC-350	350	450	2,0 a 12,7	Aço Patinável
USI-LN 380	380	490	2,0 a 12,7	Estrutural Especial
COS-AR-COR 500	375	490	2,65 a 50,8	Aço Patinável

Fonte: (CARVALHO, GRIGOLETTI, BARBOSA), 2014.

## 2.8 Processo de Fabricação

São dois os processos de fabricação dos perfis formados à frio: Contínuo e Descontínuo.

O processo contínuo, adequado também a fabricação em série, é realizado a partir do desbobinamento da chapa no mandril (figura 3), passando pela tesoura rotativa (figura 4), depois sendo rebobinada em tiras de tamanhos inferiores a anterior (figura 5 - tamanho de acordo com o perfil a ser fabricado), chegando ao procedimento onde a chapa aço é deslocada forma longitudinal sobre roletes de uma linha de perfilação. Os roletes vão conferindo gradativamente à chapa, e dando a forma definitiva do perfil (figura 6 e7). Quando o perfil sai da linha de perfilação, ele é cortado no comprimento desejado e por fim estocado (figura 8).

Figura 3- Bobinas de Aço no mandril desenrolador



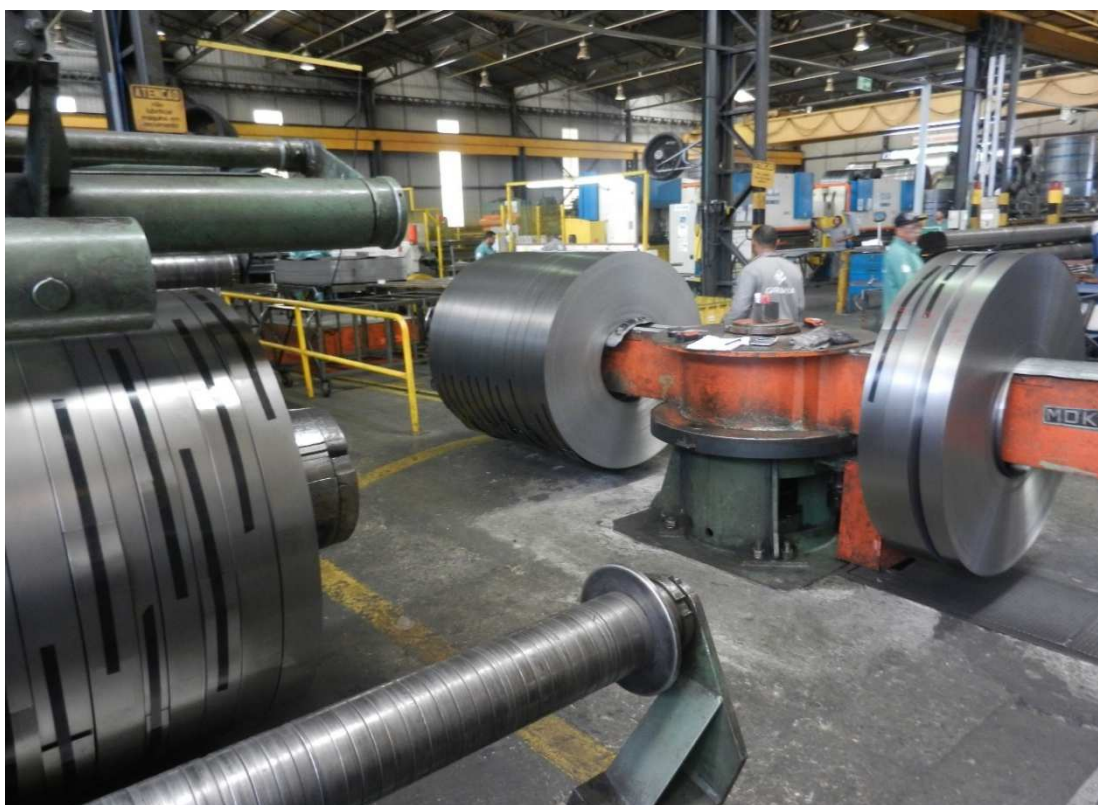
Fonte: Gravia Industria de Perfil e Aço: 2018

Figura 4- Tesoura Rotativa



Fonte: Gravia Industria de Perfil e Aço: 2018

Figura 5- Tiras em Bobinas



Fonte: Gravia Industria de Perfil e Aço: 2018

Figura 6- Tira de aço no início da perfiladeira



Fonte: Gravia Industria de Perfil e Aço: 2018

Figura 7- Perfiladeira



Fonte: Gravia Industria de Perfil e Aço: 2018

Figura 8- Estoque de Perfis



Fonte: Gravia Industria de Perfil e Aço: 2018

O processo descontínuo, adequado também a pequenas quantidades ou a perfis sob encomenda, o processo se inicia com o desbobinamento e o corte da chapa no tamanho desejado (figura 9), limitando-se ao tamanho da máquina, máquina essa chamada de dobradeira (figura 12), na maioria das dobradeiras tem o tamanho de 3 e 6 metros. Após o corte a chapa passa pelo processo de aplainamento (figura 10) logo em seguida estocada para que possa ser utilizada de acordo com sua necessidade. No momento em que é solicitado a dobra de um determinado perfil se for sobre medida é feito um novo desbobinamento, caso seja nos tamanhos de chapas estocadas, essa chapa é levada para o corte na guilhotina (figura 11) para cortar a tira de chapa a ser utilizada na dobra do perfil. Quando essa tira de chapa é colada na dobradeira o punção (peça superior da dobradeira) encosta na chapa que presa contra a matriz da dobradeira (peça inferior da dobradeira), obrigando-a a formar uma dobra (figura 13). Várias operações similares a essa, sobre a mesma chapa, fornecem a chapa a seção geométrica do perfil exigida em projeto.

Figura 9- Bobinas no mandril para desbobinamento



Fonte: Gravia Industria de Perfil e Aço: 2018

Figura 10- Rolos aplanadores



Fonte: Gravia Industria de Perfil e Aço: 2018

Figura 11- Corte da chapa



Fonte: Gravia Industria de Perfil e Aço: 2018

Figura 12- Dobradeira vista de frente



Fonte: Gravia Industria de Perfil e Aço: 2018

Figura 13- Conformação da Chapa



Fonte: Gravia Industria de Perfil e Aço: 2018

## 2.9 Padronização dos Perfis segundo a NBR 6355: 2012

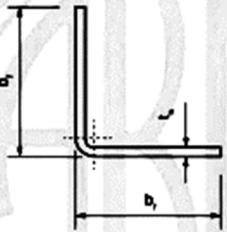
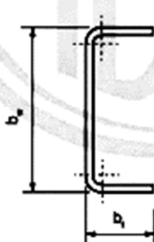
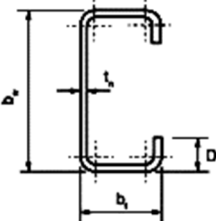
Segundo a NBR 6355:2012 os requisitos exigíveis para os PFF são os materiais, (aços e suas resistências NBR 14762:2010) como também as tolerâncias nas chapas, dimensões, massas (peso), propriedades geométricas de cada seção de PFF de serie comercial, identificação dos perfis segundo esta norma, inspeção (seja ela visual ou dimensional) e certificação.

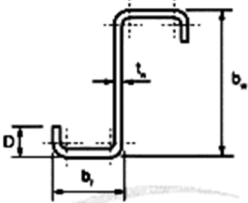
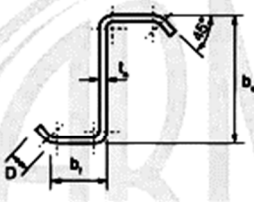
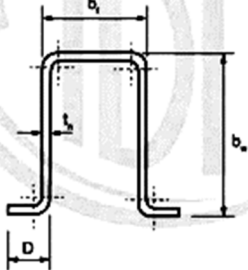
Para o cálculo das propriedades geométricas a norma adota as seguintes hipóteses e simplificações.

1. Seção transversal bruta do perfil e sua espessura constante.
2. Raio de dobramento interno é igual a espessura do perfil para espessuras menores ou iguais que 6,35 mm.
3. Para todo perfil o eixo X e paralelo com a mesa ou aba.

As series comerciais mais usuais de PFF e suas respectivas designações são apresentada na tabela a seguir e alguns ilustrações de mais formas de PFF

Tabela 3- Séries comerciais mais usuais de perfis estruturais e respectivas designações

Série	Seção transversal	Designação <sup>a</sup>
Cantoneira de abas iguais		$L\ b_f \times t_f$ Exemplo: L 50 x 3,00
U simples		$U\ b_w \times b_f \times t_f$ Exemplo: U 150 x 50 x 2,65
U enrijecido		$Ue\ b_w \times b_f \times D \times t_f$ Exemplo: Ue 150 x 60 x 20 x 2,65

Série	Seção transversal	Designação <sup>a</sup>
Z enrijecido a 90°		$Z_{90}\ b_w \times b_f \times D \times t_f$ Exemplo: Z <sub>90</sub> 200 x 75 x 20 x 2,25
Z enrijecido a 45°		$Z_{45}\ b_w \times b_f \times D \times t_f$ Exemplo: Z <sub>45</sub> 200 x 75 x 20 x 2,25
Cartola		$Cr\ b_w \times b_f \times D \times t_f$ Exemplo: Cr 100 x 50 x 20 x 3,35

<sup>a</sup> As dimensões devem ser apresentadas em milímetros.

Fonte: ABNT,2012.

## 2.10 Comportamento Estrutural do PFF á flexão

Uma viga fletida é quando a mesma está submetida a ações transversais. As vigas constituídas por PFF, requerem um esforço maior para o seu dimensionamento. No estudo da Resistencia de Materiais ensina que existem dois tipos de flexão:

- Flexão Simples: É quando o eixo de flexão é perpendicular ao plano de solicitação
- Flexão Obliqua: Quando não há ortogonalidade entre eles.

A solicitação de flexão quase nunca surge isolada, sempre se tem a flexão atuando em conjunto com outras solicitações, flexão e cisalhamento (casos mais comuns), flexão e compressão (flexocompressão, conhecida como viga-coluna), flexão e tração, flexão com cisalhamento e torção.

O cisalhamento, a compressão, tração e a torção podem atuar em conjunto com os dois tipos de flexão. Essa possibilidade junto com a instabilidade locais e globais cria um grau de dificuldade no dia a dia do profissional no trabalho com barras fletidas. Os PFF na construção civil são esbeltos ou super-esbeltos, isso porque sua relação de largura/espessura ( $b/t$ ) se aproximam dos limites da NBR 14762:2010, ou seja, são formados por espessuras em milímetros (pequenas), nesse caso os PFF têm a sua instabilidade local.

A maior desvantagem do uso do PFF na construção civil está relacionada a ocorrência de um fenômeno chamado flambagem. Flambagem é um fenômeno no qual uma estrutura cuja a forma estava em equilíbrio estável e passa a ficar com equilíbrio instável. Esse fenômeno ocorre principalmente porque os elementos individuais dos perfis têm sua relação largura/espessura muito pequena como descrito anteriormente.

A verificação de estabilidade tem como objetivo investigar os modos e as forças críticas de flambagem de elementos estruturais ocorrentes deste fenômeno. Venanci (2005) afirma que “ o projeto estrutural de barras de aço formado a frio é altamente dependente da análise de estabilidade, especialmente para o caso de barras classificadas como de paredes finas (espessura do perfil), cujo o comportamento de estabilidade deve ser obtido com precisão para se obter resultados seguros nos procedimentos de dimensionamentos ”.

O tipo de instabilidade está condicionado as características geométricas dos perfis e as condições de vínculos e carregamentos. A NBR 14762:2010 relacionado ao assunto utiliza métodos simplificados e iterativos de cálculo, com a finalidade de fornecer ao profissional do dia a dia resultados práticos e satisfatório para o dimensionamento de PFF.

Serão abordados a seguir os conceitos básicos de flambagem, torção e empenamento, como também os modos de instabilidade que suscita nos PFF.

### **2.10.1 Flambagem**

Flambagem ou encurvadura é um fenômeno que ocorre em peças esbeltas (a relação largura/espessura ( $b/t$ ) se aproximam dos limites da norma), quando submetidas ao esforço de compressão, flexão, torção ou ambos combinados. A flambagem acontece quando a peça sobre flexão transversalmente em relação ao seu eixo de menor inércia devido a algum esforço solicitante. A flambagem é considerada uma instabilidade elástica, assim, a peça pode perder sua instabilidade sem que o material tenha atingido a sua tensão de escoamento. Este colapso ocorrerá sempre na direção do eixo de menor inércia de sua seção transversal. A tensão crítica para ocorrer flambagem não depende da tensão de escoamento do material, mas sim do seu módulo de elasticidade ( $E$ )

Os PFF podem se tornar instáveis para tensões de valores inferiores ao limite de escoamento do material, quando sujeito a compressão, cisalhamento, flexão ou interação entre ambos. Afirma Timoshenko (1878), em muitos casos, a ruptura de uma estrutura deve ser atribuída a instabilidade elástica e não a falta de resistência por parte do material.

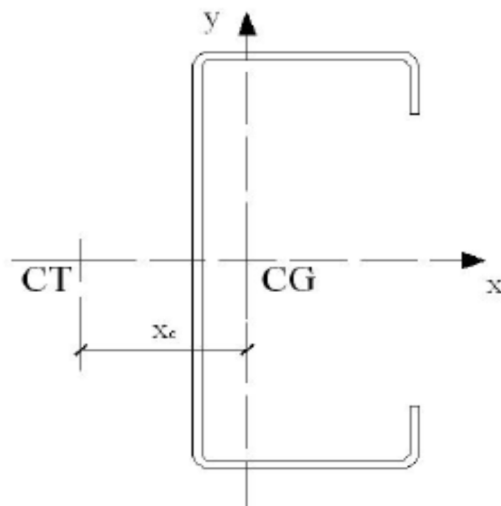
### **2.10.2 Torção e Empenamento**

A torção de uma seção é caracterizada por um deslocamento que ocorre fora do seu plano por ter seu centro de torção deslocado da peça (figura 14). O estudo da Resistência dos Materiais considera o efeito da torção aplicado em seções transversais circulares, pois estas permanecem planas e com sua forma conservada durante a deformação. O mesmo não acontece para seções diferentes das circulares. De acordo com Timoshenko (1878), o problema da torção de um eixo de seção retangular não simples devido ao encurvamento (empenamento) da seção durante a torção.

O empenamento da seção transversal é provocado pelo efeito das tensões tangenciais, devido aos diferentes alongamentos longitudinais das fibras. Quando a seção pode empenar livremente ocorre um estado de cisalhamento puro e a torção é denominada livre. Timoshenko (1878), afirma que para vigas com elementos de parede fina o impedimento ao encurvamento das seções durante a torção é acompanhado de flexão das mesas. Os efeitos da restrição ao empenamento devem ser considerados tanto na avaliação da instabilidade da barra quanto na

análise de tensões que leva em consideração duas parcelas: Um referente a torção livre e a outra em associada ao efeito da restrição ao empenamento.

Figura 14- Posição do Centro de torção em perfil de seção aberta tipo Ue



Fonte: Cerqueira Domin: 2009

### 2.10.3 Modos de Instabilidade

Na compressão e na flexão existem até três modos de instabilidade possíveis: local, global e interação entra ambos. Os principais modos de instabilidade para PFF serão explicados a seguir

#### 2.10.3.1 Flambagem Local e Método da Seção Efetiva

Os perfis metálicos têm por característica de apresentaram instabilidades globais, já os PFFs se constituídos por chapas finas tem sua instabilidade local, isso se dá quando ocorre um **enrugamento** de uma ou mais parte que compõe o perfil.

Esta instabilidade é conhecida como **Flambagem Local**, sempre foi levada em conta por meio de uma redução de área da parte comprimida do perfil, essa é uma consideração clássica que é uma ocorrência do conceito de **largura efetiva**.

O **Método de Largura Efetiva** (MLE), baseado no conceito de largura efetiva, requer um esforço de cálculo considerável para a avaliação de flambagem local. Outro modelo de avaliação de flambagem e o **Método da Resistência Direta** (MRD) que considera a flambagem local do perfil inteiro e não de cada elemento que o constitui. Esse método necessita de um valor de uma força de flambagem elástica, que pode ser determinado por um programa de elementos e finitos ou faixa finitas.

Para evitar o uso de programas toda vez que se desejar avaliar a flambagem local de um perfil, o prof. Eduardo Batista propôs junto com pesquisadores brasileiros o *Método de Seções Efetivas* que é uma padronização do MRD para os perfis mais utilizados no dia a dia profissional.

Assim a NBR 14762:2010 apresenta esses três métodos para avaliar a flambagem local de um perfil:

- MLE – Método da largura Efetiva, clássico e consagrado, que exige um razoável esforço de cálculo e que considera de forma simples o comportamento dos elementos que formam um perfil.
- MRD- Método da Resistência Direta, moderno, ainda em desenvolvimento, considera o comportamento real de um perfil, mais requer um programa computacional para disparar-se o método.
- MSE- Método da Seção Efetiva, brasileiro, fácil de ser usado, calibrado com o MLE e ainda limitado a alguns tipos de perfis.

Nesse trabalho iremos adotar nos cálculos o método da seção efetiva para a verificação de flambagem local de um perfil submetido a flexão simples.

### **2.10.3.2 Método da Seção Efetiva**

O método da seção efetiva proposto pelo Prof. Eduardo Batista, da COPPE- UFRJ, é uma parametrização do método da resistência direta.

O MRD como falado anteriormente necessita de uma força axial ou um momento de flambagem elástica local, obtidos por uma análise de flambagem elástica.

Esta análise normalmente é feita com auxílio de um programa de faixas finitas ou elementos finitos. No dia a dia nem todos os profissionais dispõem desse programa para determinar essa força e esse momento.

O brilhantismo da proposta do Prof. Batista foi escolhendo os perfis mais utilizados no dia a dia e aplicar o método inúmeras vezes para cada perfil.

Cada interação fornecia a força ou o momento de flambagem elástica local daquele perfil. Uma vez variando as dimensões do perfil, pode ser traçada uma curva, formada pelos pontos mínimos, que, relacionada com as dimensões externas do perfil (largura da mesa e altura do perfil), foi possível determinar o valor do coeficiente de flambagem local do perfil no todo. Com esse coeficiente foi possível determinar a força ou o momento para disparar o MSE.

### 2.10.3.3 Flambagem por distorção

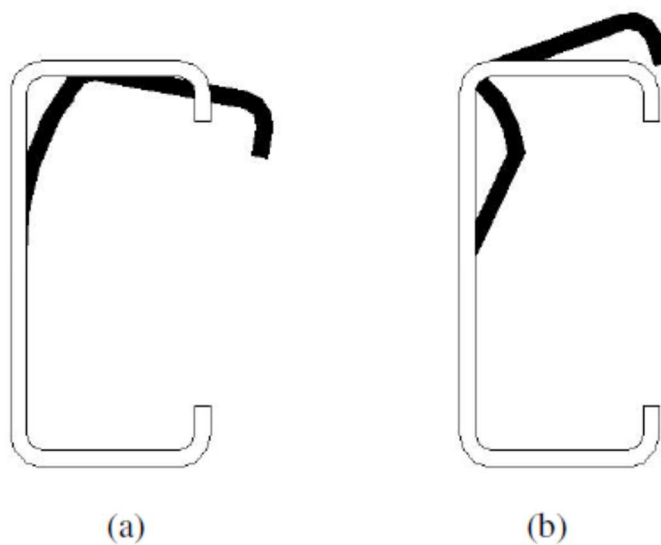
Na flambagem por distorção ocorre alteração na geométrica da seção decorrente da rotação de um conjunto de elementos de menor rigidez (figura 15). Em um perfil U enrijecido de seção aberta, a mesa comprimida associada ao enrijecedor de borda gira, quase como um corpo rígido, em torno da aresta entra a mesa e alma. Fazendo com que haja translação da aresta entre a mesa e o enrijecedor, no plano normal a alma (figura 16-a) ou não (figura 16-b), acompanhada da flexão da alma do perfil.

Figura 15- Perfil após flambagem por distorção



Fonte: Cerqueira Domin: 2009

Figura 16- Instabilidade distorcional



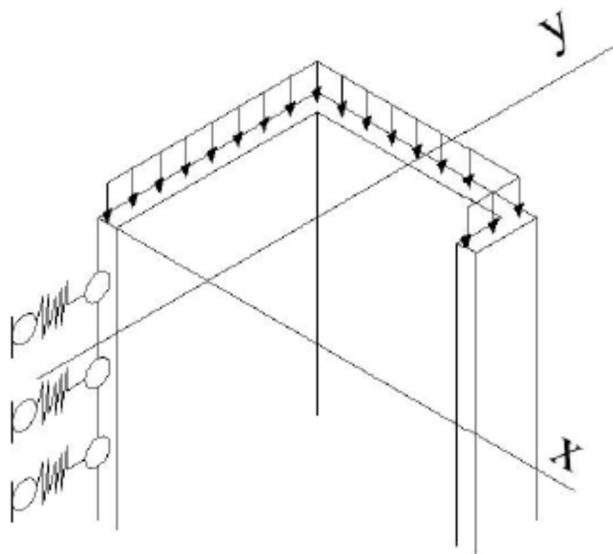
Fonte: Cerqueira Domin: 2009

Segundo Chodraui (2003) o fenômeno da flambagem por distorção é especialmente característico de perfis com enrijecedores de borda, sendo mais pronunciado no caso de aços com elevada resistência mecânica. Perfis sem enrijecedores de borda não apresentam a flambagem por distorção como crítica, pois, a instabilidade local é preponderante pelo fato do elemento do perfil possuir apenas uma borda apoiada. Embora, a adição de enrijecedores de borda seja uma solução prática e econômica para se elevar a resistência dos perfis quanto a instabilidade local do elemento, o comportamento estrutural do perfil também é alterado.

#### **2.10.3.4 Flambagem Lateral com Torção**

Essa instabilidade é considerada global, característica em vigas submetidas a flexão simples, e como em toda instabilidade global, apenas ocorrem os movimentos do corpo rígido, ou seja, não existe mudança da geométrica da seção transversal do perfil. Segundo Silva (2006), O trecho comprimido da viga é isolado da parte tracionada considerando-o como um pilar submetido a esforços de compressão, conforme a ilustração (figura 17). A seção tracionada pode ser considerada como uma série de apoios elásticos distribuídos ao longo do pilar que irá contribuir para a estabilidade da peça em torno do seu eixo x. Como o pilar comprimido está apoiado ao longo de um dos seus lados, quando ocorrer a perda de estabilidade, este tenderá a torcer e flambar lateralmente em torno do seu eixo de menor inércia, que no caso se trata do eixo y. Dessa forma, tanto na rigidez a flexão em torno do eixo y como na rigidez a torção irão definir a ocorrência, ou não, do fenômeno.

Figura 17- Trecho comprimido de uma viga submetida à flexão do tipo Ue



Fonte: Silva: 2006

### ***2.10.3.5 Cisalhamento***

Em barras submetidas a flexão, atua uma força cortante, essa força dá origem a uma tensão de cisalhamento. Essas tensões não se distribuem uniformemente pelos diversos pontos de uma seção transversal, embora a resultante desses esforços tangenciais coincida com as forças cortante atuante.

Para PFF, devido a pequena espessura das chapas, admite-se que toda força cortante seja absorvida pela alma da viga. Torna-se necessário, nesse caso, limitar as tensões atuantes, uma vez que a alma submetida aos esforços cisalhantes estará sujeita ao fenômeno de flambagem local. Além disso, deve-se verificar o efeito associado das tensões de momento fletor e cortante combinadas, como veremos mais adiante.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho consiste nas etapas abaixo discriminada

- Revisão bibliográfica elaborada a partir de pesquisas em teses de mestrado, doutorado e livros na área de Perfil formado a frio, com também sobre prescrição da Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT
- Análise e apresentação das principais características estruturais de perfis formados a frio.
- Dimensionamento de perfil PFF de U enrijecido tipo caixa e de seção aberta sobre método de seção efetiva, analisando sua resistência máxima a flexão simples (momento máximo), flecha máxima e resistência ao cisalhamento.
- Elaboração de planilha interativa de dimensionamento de perfil PFF de U enrijecido tipo caixa e de seção aberta sobre método de seção efetiva, analisando sua resistência máxima a flexão simples, flecha máxima e resistência ao cisalhamento.
- Comparação com o programa computacional de PFF mCalc\_Perfis da Stabile e o Cype3D da Múltiplos, afim de analisar e comparar os resultados obtidos.

#### **4 DIMENSIONAMENTO SEGUNDO NBR 14762:2010**

De acordo com o item 1(escopo) de NBR 14762:2010 essa norma tem base no método dos estados limites, estabelecendo os requisitos básicos que devem ser obedecidos no dimensionamento de PFFs estruturais constituídos por chapas ou tiras finas de baixa liga, conectados por parafuso ou soldas e destinados a estrutura de edifício.

Também pode ser empregada no dimensionamento de outras estruturas, além de edifícios, desde que sejam consideradas os particulares de cada tipo de estrutura, como por exemplo os efeitos de ações dinâmicas.

Esta norma foi elaborada considerando algumas prescrições, recomendações e procedimentos da versão anterior a essa e demais normas relacionadas ao tema, como também o método empregado nesse trabalho, supracitado a cima, que foi desenvolvido pelo professor Prof. Eduardo Batista, da COPPE- UFRJ.

No dimensionamento de uma estrutura segundo essa norma, deve ser obedecido os estados limites de utilização e últimos, nenhum estado limite aplicável deve ser excedidos quando a estrutura for submetida a todas as combinações apropriadas de ações. Assim a verificação da estrutura é feita levando em considerações os estados limites últimos e estados limites de utilização.

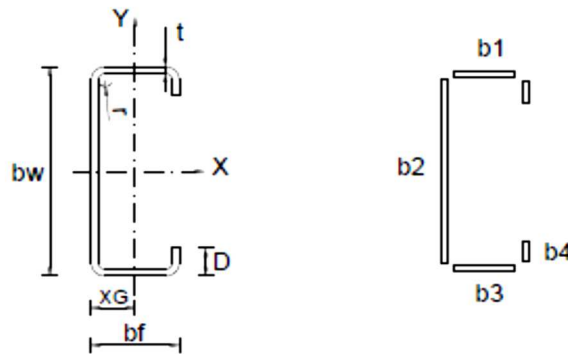
Nesse capítulo será abordado os cálculos necessários para verificação de perfil PFF pelo Método da Seção efetiva sobre flexão simples de acordo com a NBR 14762:10, sendo eles: o cálculo de momento fletor, força cortante e cálculo de deslocamento limite (flecha limite). Além disso será apresentado o cálculo das características geométricas e mecânicas de perfis Ue de seção aberta e caixa pelo método simples apresentado por Paulo R. M. de Carvalho e seus companheiros no livro Curso básico de Perfil formado a frio 3ª Ed, para aplicar as demais verificações citadas a cima.

## 4.1 Características geométricas de PFF tipo Ue de seção aberta e caixa

Pelo método simples apresentado por Paulo R. M. de Carvalho e seus companheiros no livro Curso básico de Perfil formado a frio 3ª Ed

### 4.1.1 Perfil Ue Seção Aberta

Figura 18 - Perfil Ue seção aberta



Fonte: Autor: 2018

$$Mesab1 = bf - 2 * t \text{ (cm)} \quad b3 = b1$$

$$Almab2 = bw - 2 * t \text{ (cm)}$$

$$Enrijecedorb4 = D - t \text{ (cm)}$$

$$\text{Área} \quad (4.1)$$

$$\text{Área} = (b2 + 2 * b1 + 2 * b4) * t \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$\text{Inércia no eixo X} \quad (4.2)$$

$$Ib2x = \frac{t * b2^3}{12} \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$Ib1x = \frac{b1 * t^3}{12} + b1 * t * d1x^2 \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$d1x = \frac{bw}{2} - \frac{t}{2} \text{ (cm) Distância entre o eixo x e a linha média de } b1$$

$$Ib4x = \frac{t * b4^3}{12} + b4 * t * d4x^2 \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$d4x = \frac{bw}{2} - \left( \frac{b4}{2} + t \right) \text{ (cm) Distância entre o eixo x e a linha média de } b4$$

$$Ixtsimples = (2 * Ib1x) + Ib2x + (2 * Ib4x) \text{ (cm}^4\text{)}$$

**Modulo resistente elástico Wx** (4.3)

$$W_x = \frac{I_{x\text{simples}}}{bw/2} \text{ (cm}^3\text{)}$$

**Distância baricêntrica Xg** (4.4)

$$X_g = \frac{b_2 * \frac{t}{2} + 2 * \left( b_1 * \left( \frac{b_1}{2} + t \right) \right) + 2 * \left( b_4 * \left( bf - \frac{t}{2} \right) \right)}{b_2 + 2 * b_1 + 2 * b_4} \text{ (cm)}$$

**Distância baricêntrica Yg** (4.5)

$$Y_g = \frac{bw}{2} \text{ (cm)}$$

**Inércia no eixo Y** (4.6)

$$I_{b2y} = \frac{b_2 * t^3}{12} + b_2 * t * d_{2y}^2 \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$d_{2y} = X_g - \frac{t}{2} \text{ (cm) Distancia entre o } X_g \text{ e a linha média de } b_2$$

$$I_{b1y} = \frac{t * b_1^3}{12} + b_1 * t * d_{1y}^2 \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$d_{1y} = \left( \frac{b_1}{2} + t \right) - X_g \text{ (cm) Distancia entre o } X_g \text{ e a linha média de } b_1$$

$$I_{b4y} = \frac{b_4 * t^3}{12} + b_4 * t * d_{4y}^2 \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$d_{4y} = \left( bf - \frac{t}{2} \right) - X_g \text{ (cm) Distancia entre o } X_g \text{ e a linha média de } b_4$$

$$I_{y\text{simples}} = (2 * I_{b1y}) + I_{b2y} + (2 * I_{b4y}) \text{ (cm}^4\text{)}$$

**Modulo resistente elástico Wy** (4.7)

$$W_y = \frac{I_{y\text{simples}}}{\frac{bf}{2} + dy_1} \text{ (cm}^3\text{)}$$

**Inercia a torção** (4.8)

Para o cálculo das características para flambagem lateram com torção, nos elementos dos perfis é necessário subtrair a espessura.

$$b = bf - t \text{ (cm)}$$

$$h = bw - t \text{ (cm)}$$

$$b1 = D - t \text{ (cm)}$$

$$J = \frac{t^3}{3} * (h + 2 * b + 2 * b1) \text{ (cm}^4\text{)}$$

**Constante de empenamento** (4.9)

$$Cw = t * \left( \frac{h^2 * b^2}{2} * \left( b1 + \frac{b}{3} - ct - \frac{2 * ct * b1}{b} + \frac{2 * b1^2}{h} \right) + \frac{h^2 * ct^2}{2} * \left( b + b1 + \frac{h}{6} - \frac{2 * ct^2}{h} \right) + \frac{2 * b1^3}{3} * (b + ct)^2 \right)$$

$$Ct = \frac{b * h * t}{4 * Ixtsimples} * (b * h + (2 * b1 * (h - b1))) \text{ (cm)}$$

**Raio de giração em X** (4.10)

$$rx = \sqrt{\frac{Ixtsimples}{Area}} \text{ (cm)}$$

**Raio de giração em Y** (4.11)

$$ry = \sqrt{\frac{Iytsimples}{Area}} \text{ (cm)}$$

**Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção** (4.12)

$$r0 = \sqrt{rx^2 + ry^2 + x0^2 + y0^2} \text{ (cm)}$$

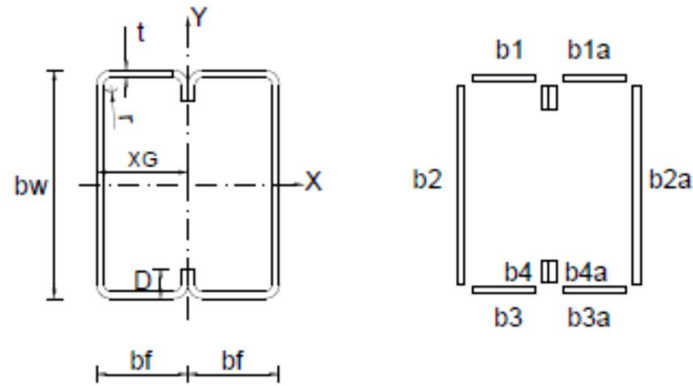
Onde:

$$x0 = Ct + \left( Xg - \frac{t}{2} \right) \text{ (cm)}$$

$$y0 = 0,0 \text{ (cm)}$$

#### 4.1.2 Perfil Ue duplamente simétrico (tipo caixa)

Figura 19 - Perfil Ue seção caixa



Fonte: Autor: 2018

**Área Caixa** (4.13)

$$\text{ÁreaCaixa} = 2 * (\text{Areasimples}) \text{ (cm}^2\text{)}$$

**Inércia no eixo X** (4.14)

Por ser um perfil duplamente simétrico, no seu eixo X a sua inercia e o dobro da inercia de um perfil de seção aberta

$$I_{xtcaixa} = 2 * (I_{xtsimples}) \text{ (cm}^4\text{)}$$

**Modulo resistente elástico Wx** (4.15)

$$W_{xcaixa} = \frac{I_{xtcaixa}}{bw/2} \text{ (cm}^3\text{)}$$

**Distância baricêntrica Xg** (4.16)

Sendo um perfil de dupla simetria a distância baricêntrica entre o eixo X e igual a 0 por ter seu eixo no centro do perfil.

$$Xg = 0,0 \text{ (cm)}$$

**Distância baricêntrica** (4.17)

$$Yg = \frac{bw}{2} \text{ (cm)}$$

**Inercia caixa no eixo Y** (4.18)

$$I_{ytcaixa} = 2 * (I_{ytsimples} + (dy^2 * A_{tsimples})) \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$dy = bf - Xg_{simples} \text{ (cm)}$$

**Modulo resistente elástico Wy** (4.19)

$$W_{ycaixa} = \frac{I_{ytcaixa}}{bf} \text{ (cm}^3\text{)}$$

**Inercia a torção** (4.20)

$$J_{caixa} = J_{simples} * 2 \text{ (cm}^4\text{)}$$

**Constante de empenamento** (4.21)

$$C_{wcaixa} = 0$$

**Raio de giração em X** (4.22)

$$r_x = \sqrt{\frac{I_{xtcaixa}}{Area}} \text{ (cm)}$$

**Raio de giração em Y** (4.23)

$$r_y = \sqrt{\frac{I_{ytcaixa}}{Area}} \text{ (cm)}$$

**Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção** (4.24)

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} \text{ (cm)}$$

Onde:

$$x_0 = C_{tsimples} + \left(\frac{t}{2}\right) \text{ (cm)}$$

$$y_0 = 0,0 \text{ (cm)}$$

## 4.2 Cálculo do momento Fletor resistente ao cálculo (MRd) conforme NBR14762:2010

O momento nominal máximo, resistido por uma barra, deve ser considerado como o menor valor calculado entre:

- Momento de cálculo que causa escoamento da seção na fibra mais solicitada;
- Momento de cálculo referente à flambagem lateral com torção;
- Momento de cálculo referente à flambagem por distorção da seção transversal quando aplicável.

O menor valor calculado deverá ser comparado com o momento solicitante de projeto.

#### 4.2.1 Início de escoamento da seção efetiva

$$MRd = \frac{W_{ef} * f_y}{\gamma} \quad (4.25)$$

$$\gamma = 1,10$$

Onde:

$W_{ef}$  é o modulo de resistência elástico da seção efetiva em relação a fibra extrema que atinge o escoamento, calculado como apresentado a seguir:

$$W_{ef} = W \text{ para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$W_{ef} = W * \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) * \frac{1}{\lambda_p} \text{ para } \lambda_p > 0,673$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W * f_y}{Ml}} \quad (4.26)$$

$Ml$  é o momento fletor de flambagem local elástica, calculado por meio de análise de estabilidade elástica, ou de forma direta, segundo a expressão seguinte:

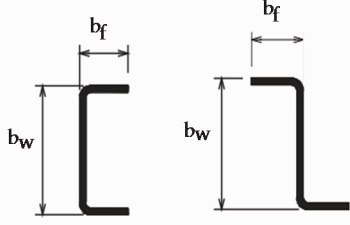
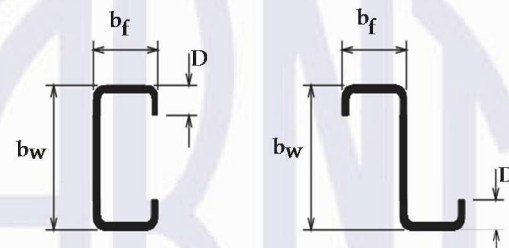
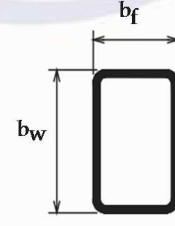
$$Ml = W_c * kl * \frac{\pi^2 * E}{12(1 - \nu^2) \left(\frac{bw}{t}\right)^2} \quad (4.27)$$

$W$  é o modulo de resistência elástico de seção bruta em relação a fibra extrema que atinge o escoamento

$W_c$  é modulo de resistência elástico da seção bruta em relação a fibra extrema comprimida.

Os valores do coeficiente de flambagem local para a seção completa  $kl$ , podem ser calculados pelas expressões indicadas nas tabelas a seguir.

Tabela 4- Valores do coeficiente  $k_{ff}$  de seção completa em barras sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia

Caso a	<p style="text-align: center;"><b>Seção U simples e Seção Z simples</b></p>  <p style="text-align: center;"><math>k_{ff} = \psi^{-1,843}</math> (0,1 ≤ <math>\psi</math> ≤ 1,0)</p>
Caso b	<p style="text-align: center;"><b>Seção U enrijecido e Seção Z enrijecido</b></p>  <p style="text-align: center;">As expressões a seguir são válidas para 0,2 ≤ <math>\psi</math> ≤ 1,0 e para os valores de <math>\mu</math> indicados</p> <p style="text-align: center;"><math>k_{ff} = a - b(\mu - 0,2)</math></p> <p style="text-align: center;"><math>a = 81 - 730\psi + 4\,261\psi^2 - 12\,304\psi^3 + 17\,919\psi^4 - 12\,796\psi^5 + 3\,574\psi^6</math></p> <p style="text-align: center;"><math>b = 0</math> para 0,1 ≤ <math>\mu</math> ≤ 0,2 e 0,2 ≤ <math>\psi</math> ≤ 1,0</p> <p style="text-align: center;"><math>b = 0</math> para 0,2 &lt; <math>\mu</math> ≤ 0,3 e 0,6 &lt; <math>\psi</math> ≤ 1,0</p> <p style="text-align: center;"><math>b = 320 - 2\,788\psi + 13\,458\psi^2 - 27\,667\psi^3 + 19\,167\psi^4</math> para 0,2 &lt; <math>\mu</math> ≤ 0,3 e 0,2 ≤ <math>\psi</math> ≤ 0,6</p>
Caso c	<p style="text-align: center;"><b>Seção tubular retangular com solda de costura contínua</b> (para seção tubular retangular formada por dois perfis U simples ou U enrijecido com solda de costura intermitente, <math>k_{ff}</math> deve ser calculado para cada perfil isoladamente).</p>  <p style="text-align: center;"><math>k_{ff} = 14,5 + 178\psi - 602\psi^2 + 649\psi^3 - 234\psi^4</math> (0,1 ≤ <math>\psi</math> ≤ 1,0)</p>
NOTA 1	<p><math>b_f</math>, <math>b_w</math> e <math>D</math> são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado na Figura correspondente.</p>
NOTA 2	<p><math>\psi = b_f / b_w</math>.</p>
NOTA 3	<p><math>\mu = D / b_w</math>.</p>

Fonte: ABNT,2010.

Tabela 5- Valores do coeficiente  $k_l$  de seção completa em barras sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia

$\eta=bf/bw$	Caso a	Caso b			Caso c
	Seção U simples e Seção Z simples	Seção U simples e Seção Z simples			Seção Tubular retangular (solda de costura contínua)
		$\mu \leq 0,2$	$\mu \leq 0,25$	$\mu \leq 0,3$	
0,2	18,4	32,0	25,8	21,2	31,0
0,3	9,6	29,3	23,8	19,7	28,9
0,4	5,6	24,8	20,7	18,2	25,6
0,5	3,6	18,7	17,6	16,0	19,5
0,6	2,6	13,6	13,3	13,0	14,2
0,7	1,9	10,2	10,1	10,1	10,6
0,8	1,5	7,9	7,9	7,9	8,2
0,9	1,2	6,2	6,3	6,3	6,6
1	1,0	5,1	5,1	5,1	5,3

NOTA 1  $bf$ ,  $bw$  e  $D$  são a lagura nominal da mesa, da alma e do enrijecedor de borda, respectivamente.  
 NOTA 2  $\mu \leq D/bw$   
 NOTA 3 Para valores intermediários interpolar linearmente

Fonte: ABNT,2010.

#### 4.2.2 Flambagem lateral com torção

O momento fletor resistente de cálculo referente à flambagem lateral com torção, tomando-se um trecho compreendido entre seções contidas lateralmente, deve ser calculado por:

$$MRd = \frac{X_{flt} * W_{c,ef} * f_y}{\gamma} \quad (4.28)$$

$$\gamma = 1,10$$

Onde:

$W_{c,ef}$  é o modulo de resistência elástico da seção efetiva em relação a fibra extrema comprimida.

$$W_{c,ef} = W_c \text{ Para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$W_{c,ef} = W_c * \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) * \frac{1}{\lambda_p} \text{ para } \lambda_p > 0,673$$

$$\lambda p = \sqrt{\frac{Xflt * W * fy}{Ml}} \quad (4.29)$$

$Xflt$  é o fator redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção.

$$Xflt = 1,0 \text{ Para } \lambda_0 \leq 0,6$$

$$Xflt = 1,11 * (1 - 0,278 * \lambda_0^2) \text{ Para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336$$

$$Xflt = \frac{1}{\lambda_0^2} \text{ Para } \lambda_0 \geq 1,336$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Wc * fy}{Me}} \quad (4.30)$$

$Me$  é momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico.

- Barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica, sujeitas a flexão em torno do seu eixo de simetria (eixo x):

$$Me = Cb * r_0 * \sqrt{Ney * Nez} \quad (4.31)$$

$$Ney = \frac{\pi^2 * E * Iy}{(Ky * Ly)^2} \quad (4.32)$$

$$Nez = \frac{1}{r_0^2} * \left( \frac{\pi^2 * E * Cw}{(Kz * Lz)^2} + G * J \right) \quad (4.33)$$

- Barras com seção fechada (caixão), sujeitas à flexão em torno do eixo x:

$$Me = Cb * \sqrt{Ney * G * J} \quad (4.34)$$

$Cb$  é o fator de modificação para o momento fletor não uniforme, que a favor da segurança pode ser tomado com 1,0 ou calculado pela seguinte expressão:

$$Cb = \frac{12,5Mmax}{2,5Mmax + 3Ma + 4Mb + 3Mc} \quad (4.35)$$

$M_{max}$  é o máximo do valor do mesmo momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no trecho analisado.

$M_a$  é o valor de momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 1º quarto do trecho analisado.

$M_b$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no centro do trecho analisado.

$M_c$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 3º quarto do trecho analisado.

#### 4.2.3 Flambagem distorcional

Para PFFs U enrijecido de seção transversal abertas sujeitas a flambagem distorcional, o momento de cálculo resistente deve ser calculado pela seguinte expressão:

$$MRd = \frac{X_{dist} * W * f_y}{\gamma} \quad (4.36)$$

$$\gamma = 1,10$$

$X_{dist}$  é o fator de redução do momento fletor resistente, associado a flambagem distorcional, calculado por:

$$X_{dist} = 1,0 \quad \text{Para } \lambda_{dist} \leq 0,673$$

$$X_{dist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}}\right) * \frac{1}{\lambda_{dist}} \quad \text{para } \lambda_{dist} > 0,673$$

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{W * f_y}{M_{dis}}} \quad (4.37)$$

$M_{dis}$  é o momento fletor de flambagem distorcional elástica, o qual deve ser calculado com base na análise de estabilidade elástica, conforme o anexo D da NBR 14762:2010, referente a seções do tipo U enrijecido submetidas à flexão ao seu eixo da maior inercia. Devido o cálculo do  $M_{dis}$  ser complexo, esse processo não será exposto nesse trabalho, o mesmo será extraído do programa Dimperfil da CBCA.

Com o intuito de simplificar o dimensionamento o NBR 14762:2010 apresenta uma tabela com os valores mínimos da relação D/bw de seções do tipo Ue e Ze submetidas a flexão para dispensar a verificação da flambagem por distorção. Por tanto, nos casos em que a relação apresentar valores maiores do que aqueles indicados na tabela, a flambagem por distorção não é crítica e sua verificação pode ser dispensada.

Tabela 6- Valores mínimos da relação D/bw de seções do tipo Ue e Ze sob flexão simples em torno do eixo de maior inercia, para dispensar a verificação da flambagem distorcional

bf/bw	bw/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	0,05	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 bf, bw e D são a lagura nominal da mesa, da alma e do enrijecedor de borda, respectivamente.  
NOTA 2 Para valores intermediários interpolar linearmente

Fonte: ABNT,2010.

### 4.3 Força cortante

A força cortante resistente de cálculo VRd deve ser calculada por:

$$\text{Para } \frac{h}{t} \leq 1,08 * \sqrt{\frac{E * kv}{fy}}$$

$$VRd = \frac{0,6 * fy * h * t}{\gamma} \text{ onde } \gamma = 1,10 \quad (4.38)$$

$$\text{Para } 1,08 * \sqrt{\frac{E * kv}{fy}} < \frac{h}{t} \leq 1,4 * \sqrt{\frac{E * kv}{fy}}$$

$$VRd = \frac{0,6 * t^2 * \sqrt{E * fy * kv}}{\gamma} \text{ onde } \gamma = 1,10 \quad (4.39)$$

$$\text{Para } \frac{h}{t} \geq 1,4 * \sqrt{\frac{E * kv}{fy}}$$

$$VRd = \frac{0,905 * E * kv * t^3}{\gamma * h} \text{ onde } \gamma = 1,10 \quad (4.40)$$

Onde:

$$h = bw - 2 * t \text{ (cm)}$$

kv é coeficiente de flambagem local por cisalhamento, dado por:

Para alma sem enrijecedores transversais, ou para h/a > 3

$$kv = 5$$

Para alma com enrijecedores transversais

$$kv = 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2}$$

#### 4.4 Momento fletor e força cortante combinados

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante ( $Msd$ ) e a força cortante solicitante ( $Vsd$ ) devem satisfazer a seguinte expressão de interação:

$$\left(\frac{Msd}{Mrd}\right)^2 + \left(\frac{Vsd}{Vrd}\right)^2 \leq 1,0 \quad (4.41)$$

Para barras com enrijecedores transversais de alma, além de serem atendidas as exigências do item 9.8.2.1 e 9.8.3 dessa norma, quando  $Msd/Mrd > 0,5$  e  $Vsd/Vrd > 0,7$  deve ser satisfeita também:

$$0,6 * \left(\frac{Msd}{Mrd}\right) + \left(\frac{Vsd}{Vrd}\right) \leq 1,3 \quad (4.42)$$

#### 4.5 Calculo de deslocamento

Para verificação dos deslocamentos, deve se levar em conta as combinações de ações para o estado limite de utilização. Nessas combinações, são consideradas todas as ações permanentes com seus valores integrais e ações variáveis correspondentes a cada um dos tipos de

combinações com seus respectivos fatores de redução, conforme se encontra no item 5.3 da NBR 14762:2010. Usualmente, em edificações utilizam-se as combinações quase permanentes de ações.

No anexo A dessa norma, encontra-se a apresentação de uma tabela com os deslocamentos limites, recomendados para os casos mais frequentes nas construções. Os valores fornecidos são utilizados para a verificação do estado limite de utilização da estrutura e podem ser alterados em função do tipo e da finalidade da construção.

O critério da flecha estabelece que:

$$f_{max} \leq f_{adm}$$

Onde:

$f_{max}$  é a flecha máxima de serviço calculada no ELU em vigas bi apoiadas pela seguinte expressão:

$$f_{max} = \frac{5 * q * L^4}{384 * E * I_x} \quad (4.43)$$

$f_{adm}$  é flecha limite admissível definida, no anexo A da NBR 14762:2010.

Tabela 7- Deslocamentos máximos

Descrição	$\delta^a$
Travessas de fechamento	$L/180^b$
	$L/120^c$ <sub>d</sub>
Terças de cobertura <sup>g</sup>	$L/180^e$
	$L/120^f$
Vigas de cobertura <sup>g</sup>	$L/250^h$
Vigas de piso	$L/350^h$
Vigas que suportam pilares	$L/500^h$
Galpões em geral e edifícios de um pavimento:	$H/300$
— Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/400^i$
— Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base	
Edifícios de dois ou mais pavimentos:	
— Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/400$
— Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos	$H/500^j$
<p><sup>a</sup> <math>L</math> é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço, <math>H</math> é a altura total do pilar (distância do topo à base) ou a distância do nível da viga de rolamento à base, <math>h</math> é a altura do andar (distância entre centros das vigas de dois pisos consecutivos ou entre centros das vigas e a base no caso do primeiro andar).</p> <p><sup>b</sup> Deslocamento paralelo ao plano do fechamento (entre linhas de tirantes, caso eles existam).</p> <p><sup>c</sup> Deslocamento perpendicular ao plano do fechamento.</p> <p><sup>d</sup> Considerar apenas as ações variáveis perpendiculares ao plano de fechamento (vento no fechamento) com seu valor característico.</p> <p><sup>e</sup> Considerar combinações raras de serviço, utilizando-se as ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente.</p> <p><sup>f</sup> Considerar apenas as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente (vento de sucção) com seu valor característico.</p> <p><sup>g</sup> Deve-se também evitar a ocorrência de empoçamento, com atenção especial aos telhados de pequena declividade.</p> <p><sup>h</sup> Caso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não deve exceder a 15 mm.</p> <p><sup>i</sup> O diferencial do deslocamento horizontal entre pilares do pórtico que suportam as vigas de rolamento não pode superar 15 mm.</p> <p><sup>j</sup> Tomar apenas o deslocamento provocado pelas forças cortantes no andar considerado, desprezando-se os deslocamentos de corpo rígido provocados pelas deformações axiais dos pilares e vigas.</p>	

Fonte: ABNT,2010.

## 5 EXEMPLO PRÁTICO

Nesse capítulo será calculado conforme as equações apresentadas anteriormente às características geométricas e mecânicas para um perfil Ue 200x75x25x3.00 de seção aberta e também de seção fechada tipo caixão conformada em aço ASTM A36 onde seu  $F_y = 250 \text{ Mpa}$  e  $F_u = 400$ , como também a verificação de sua resistência a flexão, ao cortante, fletor e cortante combinados e seu deslocamento máximo, considerando que mesma seja bi apoiada submetida a um carregamento distribuído de  $0,15 \text{ kN/cm}$  em um vão de  $2,00 \text{ m}$ .

Sendo a seu momento e cortante solicitante para uma viga bi apoiada igual:

$$M_k = \frac{ql^2}{8} = \frac{0,15 * 200^2}{8} = 750 \text{ kN.cm}$$

$$V_k = \frac{q * l}{2} = \frac{0,15 * 200}{2} = 15 \text{ kN}$$

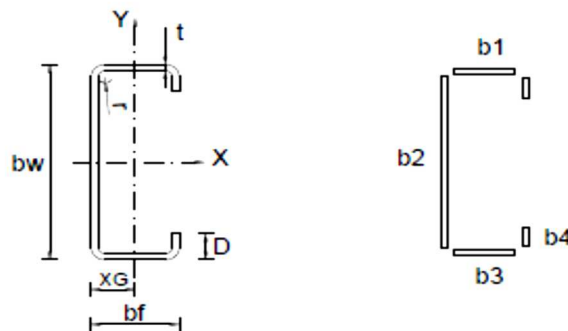
Aplicando-se um coeficiente de ponderação  $\lambda = 1,4$

$$M_{sd} = 750 * 1,4 = 1050 \text{ kN.cm}$$

$$V_{sd} = 15 * 1,4 = 21 \text{ kN}$$

### 5.1 Perfil seção aberta

Conforme figura 18



$$b_1 = 7,5 - 2 * 0,3 = 6,9 \text{ cm}$$

$$b_2 = 20 - 2 * 0,3 = 19,4 \text{ cm}$$

$$b_4 = 2,5 - 0,3 = 2,2 \text{ cm}$$

- **Área**

$$A = (19,4 + 2 * 6,9 + 2 * 2,2) * 0,3 = 11,28 \text{ cm}^2$$

- **Inercia no eixo X**

$$Ib2x = \frac{0,3 * 19,4^3}{12} = 182,54 \text{ cm}^4$$

$$Ib1x = \frac{6,9 * 0,3^3}{12} + 6,9 * 0,3 * 9,85^2 = 199,63 \text{ cm}^4$$

$$d1x = \frac{20}{2} - \frac{0,3}{2} = 9,85 \text{ cm}$$

$$Ib4x = \frac{0,3 * 2,2^3}{12} + 2,2 * 0,3 * 8,6^2 = 49,08 \text{ cm}^4$$

$$d4x = \frac{20}{2} - \left( \frac{2,2}{2} + 0,3 \right) = 8,6 \text{ cm}$$

$$Ixtsimples = (2 * 199,63) + 182,54 + (2 * 49,08) = 682,4 \text{ cm}^4$$

- **Modulo resistente elástico Wx**

$$Wx = \frac{682,04}{20/2} = 68,24 \text{ cm}^3$$

- **Distância baricêntrica Xg**

$$Xg = \frac{19,4 * \frac{0,3}{2} + 2 * \left( 6,9 * \left( \frac{6,9}{2} + 0,3 \right) \right) + 2 * \left( 2,2 * \left( 7,5 - \frac{0,3}{2} \right) \right)}{19,4 + 2 * 6,9 + 2 * 2,2} = 2,29 \text{ cm}$$

- **Distância baricêntrica Yg**

$$Yg = \frac{20}{2} = 10 \text{ cm}$$

- **Inercia no eixo Y**

$$Ib2y = \frac{19,4 * 0,3^3}{12} + 19,4 * 0,3 * 2,14^2 = 26,67 \text{ cm}^4$$

$$d2y = 2,29 - \frac{0,3}{2} = 2,14 \text{ cm}$$

$$Ib1y = \frac{0,3 * 6,9^3}{12} + 6,9 * 0,3 * 1,46^2 = 12,62 \text{ cm}^4$$

$$d1y = \frac{6,9}{2} + 0,3 - 2,29 = 1,46 \text{ cm}$$

$$Ib4y = \frac{2,2 * 0,3^3}{12} + 2,2 * 0,3 * 5,06^2 = 16,90 \text{ cm}^4$$

$$d4y = 7,5 - \frac{0,3}{2} - 2,29 = 5,06 \text{ cm}$$

$$I_{y\text{simples}} = (2 * 12,62) + 26,67 + (2 * 16,90) = 85,75 \text{ cm}^4$$

- **Modulo resistente elástico Wy**

$$W_y = \frac{85,75}{\frac{7,5}{2} + 1,46} = 16,45 \text{ cm}^3$$

- **Inercia a torção**

Para o cálculo das características para flambagem lateram com torção, nos elementos dos perfis é necessário subtrair a espessura.

$$b = 7,5 - 0,3 = 7,2 \text{ cm}$$

$$h = 20 - 0,3 = 19,7 \text{ cm}$$

$$b_1 = 2,5 - 0,3 = 2,2 \text{ cm}$$

$$J = \frac{0,3^3}{3} * (19,7 + 2 * 7,2 + 2 * 2,2) = 0,3465 \text{ cm}^4$$

- **Constante de empenamento**

$$C_w = 0,3 * \left( \frac{19,7^2 * 7,2^2}{2} * \left( \left( 2,2 + \frac{7,2}{3} - 3,44 \right) - \frac{2 * 3,44 * 2,2}{7,2} + \frac{2 * 2,2^2}{19,7} \right) + \frac{19,7^2 * 3,44^2}{2} \right. \\ \left. * \left( 7,2 + 2,2 + \frac{19,7}{6} - \frac{2 * 2,2^2}{19,7} \right) + \frac{2 * 2,2^3}{3} * (7,2 + 3,44)^2 \right) = 7277,95 \text{ cm}^6$$

$$C_t = \frac{7,2 * 19,7 * 0,3}{4 * 677,04} * (7,2 * 19,7 + (2 * 2,2 * (19,7 - 2,2))) = 3,44 \text{ cm}$$

- **Raio de giração em X e Y**

$$r_x = \sqrt{\frac{677,04}{11,28}} = 7,75 \text{ cm}$$

$$r_y = \sqrt{\frac{85,756}{11,28}} = 2,76 \text{ cm}$$

- **Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção**

$$r_0 = \sqrt{7,75^2 + 2,76^2 + 5,604^2 + 0,0^2} = 9,95 \text{ cm}$$

Onde:

$$x_0 = 3,44 + \left(2,314 - \frac{0,3}{2}\right) = 5,604 \text{ cm}$$

$$y_0 = 0,0 \text{ (cm)}$$

### 5.1.1 Cálculo do momento Fletor resistente ao cálculo (Mrd)

- **Início de escoamento da seção efetiva**

Conforme tabela 4:  $kl = 27,01$

$$M_l = 67,7 * 27,01 * \frac{\pi^2 * E}{12(1 - 0,3^2) \left(\frac{20}{0,3}\right)^2} = 7496,8 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{67,7 * 25}{7496,8}} = 0,473$$

como:  $\lambda_p < 0,673$

$$W_{ef} = W_x = 68,24$$

$$M_{Rd} = \frac{68,24 * 25}{1,10} = 1550,6 \text{ kN.cm}$$

- **Flambagem lateral com torção**

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 * E * 85,76}{200^2} = 423,22 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{9,95^2} * \left( \frac{\pi^2 * E * 6790,15}{200^2} + G * 0,3465 \right) = 390,62 \text{ kN}$$

Adotando-se  $C_b = 1,0$

$$M_e = 1 * 9,95 * \sqrt{423,22 * 390,62} = 4040,8 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{67,7 * 25}{4040,8}} = 0,649$$

como:  $\lambda_0 > 0,6$

$$X_{flt} = 1,11 * (1 - 0,278 * 0,649^2) = 0,977$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{0,977 * 67,7 * 25}{7574,9}} = 0,467 < 0,673:$$

$$W_{c,ef} = 68,24$$

$$MRd = \frac{0,977 * 68,24 * 25}{1,10} = 1519,45 \text{ kN.cm}$$

- **Flambagem distorcional**

$$M_{dist} = 1514,7 : \text{valor extraído do programa Dimperil}$$

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{67,7 * 25}{1514,7}} = 1,057$$

como:  $\lambda_{dist} > 0,673$

$$X_{dist} = \left(1 - \frac{0,22}{1,057}\right) * \frac{1}{1,057} = 0,75$$

$$MRd = \frac{0,75 * 68,24 * 25}{1,10} = 1158,43 \text{ kN.cm}$$

Comparando os valores de momento resistentes de cálculo obtidos, 1550,06 kN.cm para escoamento inicial, 1519,45 kN.cm para flambagem lateral com torção e 1158,43 kN.cm para flambagem por distorção, conclui-se que o menor momento resistente de cálculo ocorre para a flambagem por distorção.

### 5.1.2 Força cortante

$$\frac{h}{t} = \frac{19,4}{0,3} = 65 \text{ cm}$$

$$1,08 * \sqrt{\frac{E * 5}{f_y}} = 68,3$$

Como:  $65 < 68,3$

$$VRd = \frac{0,6 * 25 * 19,4 * 0,3}{1,10} = 79,36 \text{ kN}$$

### 5.1.3 Momento fletor e força cortante combinados

$$\left(\frac{1000}{1158,0}\right)^2 + \left(\frac{20}{79,36}\right)^2 = 0,814 \leq 1,0$$

### 5.1.4 Cálculo de deslocamento

Onde:

$$f_{max} = \frac{5 * 0,15 * 200^4}{384 * E * 682,40} = 0,23 \text{ cm}$$

$f_{adm}$  é flecha limite admissível definida, no anexo A da NBR 14762:2010, considerando ser uma viga de piso tem se:

$$f_{adm} = \frac{200}{350} = 0,53 \text{ cm}$$

$$0,30 \leq 0,53$$

Tabela 8 a seguir mostra os resultados obtidos nessa análise, com esse resultado tem-se que o perfil atende às exigências.

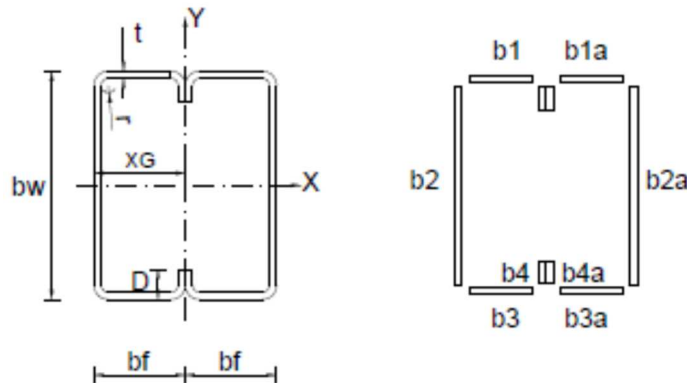
Tabela 8 - Resultados da análise para seção tipo U enrijecido aberta

Resultado para Perfil 200X75X25 # 3,00 de seção aberta em um vão de 2,00 metros																						
Dimensão			Área cm <sup>2</sup>	Direção em X				Direção em Y			Jt cm <sup>4</sup>	Cw cm <sup>6</sup>	r0 cm	Msd kN.cm	Vsd kN	MrdIni kN.cm	MrdFlt kN.cm	MrdDist kN.cm	MrdFi n kN.cm	Vrd kN	fmax cm	fadm cm
bw	bf	D		Ix cm <sup>4</sup>	Wx cm <sup>3</sup>	rx cm	Xcg cm	Iy cm <sup>4</sup>	Wy cm <sup>3</sup>	ry cm												
mm	mm	mm																				
200	75	25	11,28	682,40	68,2	7,75	2,29	85,8	16,45	2,76	0,347	7278	9,95	1050,0	21,0	1550,6	1519,5	1158,4	1158,4	79,96	0,3	0,53
LEGENDA																						
bw : Alma do perfil;				bf : Mesa do perfil				D: Enrijecedor perfil;				t : Espessura do perfil;										
Ix;Iy : Inércia em x e y;				rx;ry : Raio de giração em x e y;				Wx; Wy : Módulo elástico em x e y;				Jt : Inércia à torção;										
Cw: Constante de empenamento;				r0 : Raio de giração polar;				Msd : Momento solicitante;				Vsd : Cortante solicitante;										
Mrd : Momento resistente;				Vrd : Cortante resistente;				fmax : Flecha máxima;				fadm : Flecha admissível;										

Fonte: Autor 2018

## 5.2 Perfil seção fechada (caixão)

Conforme figura 19



- **Área**

$$AreaCaixa = 22,56 \text{ cm}^2$$

- **Inercia no eixo X**

$$Ixtcaixa = 1364,80 \text{ cm}^4$$

- **Modulo resistente elástico Wx**

$$Wxcaixa = \frac{1364,08}{20/2} = 136,4 \text{ cm}^3$$

- **Distância baricêntrica Xg**

$$Xg = 0,0(\text{cm})$$

- **Distância baricêntrica Yg**

$$Yg = \frac{20}{2} = 10 (\text{cm})$$

- **Inercia no eixo Y**

$$Iytcaixa = 2 * ((85,8 + (5,19^2 * 11,28)) = 779,27 \text{ cm}^4$$

$$dy = 7,5 - 2,31 = 5,19 \text{ cm}$$

- **Modulo resistente elástico Wy**

$$Wycaixa = \frac{779,27}{7,5} = 103,9 \text{ cm}^3$$

- **Inercia a torção**

$$J_{caixa} = 0,35 * 2 = 0,70 \text{ cm}^4$$

- **Constante de empenamento**

$$c_w = 0,0 \text{ cm}^6$$

- **Raio de giração em X e Y**

$$r_x = \sqrt{\frac{1354,08}{22,56}} = 7,75 \text{ cm}$$

$$r_y = \sqrt{\frac{1271,66}{22,56}} = 7,51 \text{ cm}$$

- **Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção**

$$r_0 = \sqrt{7,75^2 + 7,51^2 + 3,59^2 + 0^2} = 11,39 \text{ cm}$$

Onde:

$$x_0 = 3,44 + \left(\frac{0,3}{2}\right) = 3,59 \text{ cm}$$

$$y_0 = 0,0 \text{ (cm)}$$

### 5.2.1 Cálculo do momento Fletor resistente ao cálculo (Mrd)

- **Início de escoamento da seção efetiva**

Conforme tabela 4 :  $kl = 9,13$

$$M_l = 136,4 * 9,13 * \frac{\pi^2 * E}{12(1 - 0,3^2) \left(\frac{20}{0,3}\right)^2} = 5069,49 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{136,4 * 25}{5069,49}} = 0,82$$

Como  $0,82 > 0,673$

$$W_{ef} = W * \left(1 - \frac{0,22}{0,82}\right) * \frac{1}{0,82} = 121,75$$

$$MRd = \frac{121,75 * 25}{1,10} = 2767,04 \text{ kN.cm}$$

- **Flambagem lateral com torção**

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 * E * 1272,0}{200^2} = 6285,32$$

$$M_e = 1 * \sqrt{6285,32 * G * 0,70} = 5791,33 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{136,4 * 25}{5971,33}} = 0,768$$

como :  $0,755 > 0,6$

$$X_{flt} = 1,11 * (1 - 0,278 * 0,769^2) = 0,9282$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{0,928 * 136,04 * 25}{5069,49}} = 0,790$$

como :  $0,790 > 0,673$

$$W_{c,ef} = 136,4 * \left(1 - \frac{0,22}{0,790}\right) * \frac{1}{0,790} = 124,61$$

$$MRd = \frac{0,9282 * 124,61 * 25}{1,10} = 2628,72 \text{ kN.cm}$$

- **Flambagem distorcional**

Não se aplica por ser um perfil com seção fechada

Comparando os valores de momento resistentes de cálculo obtidos, 2767,04 kN.cm para escoamento inicial, 2628,72 kN.cm para flambagem lateral com torção, conclui-se que o menor momento resistente de cálculo ocorre para a flambagem lateral com torção.

### 5.2.2 Força cortante

$$\frac{h}{t} = \frac{19,4}{0,3} = 65 \text{ cm}$$

$$1,08 * \sqrt{\frac{E * 5}{fy}} = 68,3$$

como :  $65 < 68,3$

$$VRd = \left( \frac{0,6 * 25 * 19,4 * 0,3}{1,10} \right) * 2 = 158,72 \text{ kN}$$

### 5.2.3 Momento fletor e força cortante combinados

$$\left( \frac{1000}{2871,0} \right)^2 + \left( \frac{20}{79,36} \right)^2 = 0,185 \leq 1,0$$

### 5.2.4 Cálculo de deslocamento

$$f_{max} = \frac{5 * 0,15 * 200^4}{384 * E * 1364,8} = 0,115 \text{ cm}$$

$f_{adm}$  é flecha limite admissível definida, no anexo A da NBR 14762:2010, considerando ser uma viga de piso tem se:

$$f_{adm} = \frac{200}{350} = 0,53 \text{ cm}$$

$$0,154 \leq 0,53$$

Tabela 9 a seguir mostra os resultados obtidos nessa análise, com esse resultado tem-se que o perfil atende às exigências.

Tabela 9- Resultados da análise para seção tipo U enrijecido caixão

Resultado para Perfil 200X75X25 # 3,00 de seção aberta em um vão de 2,00 metros																						
Dimensão			Área cm <sup>2</sup>	Direção em X				Direção em Y			Jt cm <sup>4</sup>	Cw cm <sup>6</sup>	r0 cm	Msd kN.cm	Vsd kN	MrdIni kN.cm	MrdFlt kN.cm	MrdDist kN.cm	MrdFi n kN.cm	Vrd kN	fmax cm	fadm cm
bw	bf	D		Ix cm <sup>4</sup>	Wx cm <sup>3</sup>	rx cm	Xcg cm	Iy cm <sup>4</sup>	Wy cm <sup>3</sup>	ry cm												
mm	mm	mm																				
200	75	25	11,28	682,40	68,2	7,75	2,29	85,8	16,45	2,76	0,347	7278	9,95	1050,0	21,0	1550,6	1519,5	1158,4	1158,4	79,96	0,3	0,53
LEGENDA																						
bw : Alma do perfil;				bf : Mesa do perfil				D: Enrijecedor perfil;				t : Espessura do perfil;										
Ix;Iy : Inércia em x e y;				rx;ry : Raio de giração em x e y;				Wx; Wy : Módulo elástico em x e y;				Jt : Inércia à torção;										
Cw: Constante de empenamento;				r0 : Raio de giração polar;				Msd : Momento solicitante;				Vsd : Cortante solicitante;										
Mrd : Momento resistente;				Vrd : Cortante resistente;				fmax : Flecha máxima;				fadm : Flecha admissível;										

Fonte: Autor 2018

## **6 ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DA PLANILHA**

No presente capítulo, será apresentada as tabelas de pré-dimensionamento, elaboradas no Excel com perfis formados a frio, sendo esses perfis os mais utilizados no mercado da construção civil e padronizados pela NBR 6355:2012.

### **6.1 Diretrizes**

Na NBR 6355:2012 apresenta seis tipos de perfis, sendo eles, a cantoneira de abas iguais, U simples, U enrijecido, Z enrijecido a 90° e 45° e o cartola. Para a escolha dos perfis a serem analisados nesse trabalho, deu-se prioridade para perfis mais utilizados como vigas e terças na área da construção de galpões, mezaninos e cobertura, que são os perfis U enrijecido em seção aberta e U enrijecido tipo caixão. Os demais perfis não foram escolhidos por serem perfis pouco utilizado nessa área da construção.

O U enrijecido empregado como viga apresenta várias vantagens, como a disponibilidade de ter as mesas distanciadas do centro de gravidade, o que favorece a eficiência do funcionamento como viga e, conseqüentemente, conduz a soluções mais econômicas. A escolhas das dimensões e das espessuras a serem analisadas foram escolhidas a partir de catálogos de fabricantes desses perfis disponíveis no mercado, como também pela NBR 6355:2012. Do total de 12 espessuras padronizadas por essa norma, que são as 1,20; 1,50; 2,00; 2,25; 2,65; 3,00; 3,35; 3,75; 4,25; 4,75; 6,35; 8,00 mm, apenas quatro delas não será apresentada nesse trabalho que são 1,20; 1,50; 6,35; 8,00 mm por serem pouco utilizada nesse tipo de perfis.

### **6.2 Sobre à da Planilha**

Através da literatura utilizada no trabalho, da NBR 14762:2010, NBR 6355:2012, do programa Dimperfil da CBCA, foram obtidos todos os formulários e procedimentos para a elaboração da planilha em Excel, otimizando a análise e obtendo resultados rápidos.

Com a ajuda do programa Dimperfil foi possível realizar a análise distorcional dos perfis U enrijecidos escolhidos para esse trabalho.

A planilha é uma otimização do capítulo 4 desse trabalho para diversas seções, espessuras e aços.

Nela é possível aplicar o carregamento em kgf/m, sobre uma viga forma por perfil U enrijecido, sendo sua seção aberta ou fechada (caixão), de forma interativa obtendo todas as

características geométricas e mecânicas do perfil selecionado, como também a resistência de momento fletor, cortante, flecha e momento fletor e cortante combinado. Sendo possível selecionar perfis U enrijecido mais utilizados na construção civil e também aços disponíveis no mercado e vão que será aplicado, dessa forma obtendo seu digrama de momento fletor e cortante resistente e a verificação se o perfil selecionado atende ao carregamento e ao vão solicitado. A tabela 10 a seguir apresenta a interface da planilha.

Tabela 10- Interface da Planilha do Excel

PLANILHA DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA PFFS TIPO PERFIL U ENRRIJECIDO																											
CARREGAMENTO		100	kg/m	1,4	Coef. Ponderação		Dimensão			Área cm <sup>2</sup>	Direção em X				Direção em Y			Jt cm <sup>4</sup>	Cw cm <sup>6</sup>	r0 cm							
PERFIL	ESP.	PERFIL/ ESP.	AÇO	Fy ( Mpa )	VÃO (m)	SEÇÃO	bw	bf	D		Ix cm 4	Wx cm <sup>3</sup>	rx cm	Xcg cm	Iy cm 4	Wy cm <sup>3</sup>	ry cm										
300X85X30	3,00	300X85X30x3	ASTM- A36	250	6,00	CAIXA	mm	mm	mm																		
TIPO DE VIGA							300	85	30	30,36	3940,64	262,7	11,39	0,00	1461,5	171,9	6,94	0,927	0,00	13,9							
4	Vigas de Piso				L/350				LEGENDA																		
Msd kfg,m	Vsd kgf	MrdIni kgf.m	MrdFlt kgf.m	MrdDist kgf.m	MrdFin kgf.m	Vrd kgf	F max mm	F adm mm	bw : Alma do perfil;																		
630,0	420,0	4904,8	2174,3	#DIV/0!	2174,3	15111	2,1	17,1	bf : Mesa do perfil																		
VERIFICAÇÃO																											
MOMENTO FLETOR									MOMENTO CORTANTE									D : Enrijecedor perfil;									
PASSA									PASSA									t : Espessura do perfil;									
FLECHA									MOMENTO FLETOR E CORTANTE									Ix;Iy : Inércia em x e y;									
PASSA									0,0847									PASSA									rx;ry : Ralo de giração em x e y;
Diagrama de Momento Mrd/Msd																			Wx; Wy : Módulo elástico em x e y;								
																			Jt : Inércia à torção;								
Diagrama de Cortante Vrd/Vsd																			Cw; Constante de empenamento;								
																			r0 : Ralo de giração polar;								
Msd : Momento solicitante;																											
Vsd : Cortante solicitante;																											
MrdIni : Momento Início de Escoamento;																											
MrdFlt : Momento Flambagem lateral com torção;																											
MrdDist : Momento Distorcional;																											
Mrd : Momento resistente;																											
Vrd : Cortante resistente;																											
fmax : Flecha máxima;																											
fadm : Flecha admissível;																											

Fonte: Autor 2018

## 7 ESTUDO DE CASO

Nesse capítulo será feita à análise comparativa entre os resultados obtidos na planilha otimizada com os programas computacionais Cype3D da Múltiplos para seção aberta e o mCalc\_Perfis da Stabile para seção caixão, será apresentado o resultado um perfil, sendo ele em seção fechada (caixão) e aberta com espessura de 3,00 mm fabricado no aço ASTM A36, sendo esse perfil: 200x75x25 # 3,00, sobe um carregamento distribuído de 100 kg/m em um vão de 6,0 metros.

Os esforços solicitantes podem ser calculados pela seguinte expressão:

$$M_k = \frac{ql^2}{8} = \frac{100 * 6,0^2}{8} = 450 \text{ kgf.m}$$

$$V_k = \frac{q * l}{2} = \frac{100 * 6,0}{2} = 300 \text{ kf}$$

Aplicando-se um coeficiente de ponderação  $\lambda=1,4$

$$M_{sd} = 450 * 1,4 = 280,0 \text{ kgf.m}$$

$$V_{sd} = 300 * 1,4 = 280,0 \text{ kf}$$

### 7.1 Resultados da Planilha

Os resultados obtidos com a planilha é apresentados nas tabelas 11 para o perfil 200x75x25 #3,00 em aço ASTM-A36 para um vão de 6,0 metros e 12 para o mesmo perfil porém em seção fechada.



Tabela 12- Perfil 200x75x25 # 3,00 de seção fechada para um vão de 6,0 metros

PLANILHA DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA PFFS TIPO PERFIL U ENRRIJECIDO																				
CARREGAMENTO		100	kg/m	1,4	Coef. Ponderação		Dimensão			Área cm <sup>2</sup>	Direção em X				Direção em Y			Jt cm <sup>4</sup>	Cw cm <sup>6</sup>	r0 cm
PERFIL	ESP.	PERFIL/ ESP.	AÇO	Fy (Mpa)	VÃO (m)	SEÇÃO	bw	bf	D		Ix cm <sup>4</sup>	Wx cm <sup>3</sup>	rx cm	Xcg cm	Iy cm <sup>4</sup>	Wy cm <sup>3</sup>	ry cm			
200X75X25	3,00	200X75X25x3	ASTM- A36	250	6,00	CAIXA	mm	mm	mm											
TIPO DE VIGA							200	75	25	22,56	1364,80	136,5	7,78	0,00	784,2	104,6	5,90	0,693	0,00	10,4
4	Vigas de Piso				L/350													LEGENDA		
							Msd kfg.m	Vsd kgf	MrdIni kgf.m	MrdFlt kgf.m	MrdDist kgf.m	MrdFin kgf.m	Vrd kgf	F max mm	F adm mm					
							630,0	420,0	2767,0	1377,1	#DIV/0!	1377,1	15873	6,2	17,1					
VERIFICAÇÃO																				
MOMENTO FLETOR											MOMENTO CORTANTE									
PASSA											PASSA									
FLECHA											MOMENTO FLETOR E CORTANTE									
PASSA											0,2100					PASSA				
														bw : Alma do perfil; bf : Mesa do perfil D: Enrijecedor perfil; t : Espessura do perfil; Ix;Iy : Inércia em x e y; rx;ry : Ralo de giração em x e y; Wx; Wy : Módulo elástico em x e y; Jt : Inércia à torção; Cw: Constante de empenamento; r0 : Raio de giração polar; Msd : Momento solicitante; Vsd : Cortante solicitante; MrdIni : Momento Inicio de Escoamento; MrdFlt : Momento Flambagem lateral com torção; MrdDoist : Momento Distorcional; Mrd : Momento resistente; Vrd : Cortante resistente; fmax : Flecha máxima; fadm : Flecha admissível;						

Fonte: Autor 2018

## **7.2 Sobre os Softwares**

Os softwares utilizados para comparativos de resultado nesse trabalho como citado a cima são dois, o Cype3D da múltiplos e o mCalc\_Perfis da stabile.

O Cype 3D é um software de nacionalidade estrangeira, eficiente e prático pensado para realizar o cálculo de estruturas em 3D de barras de betão, de aço, mistas (aço e betão), de alumínio, de madeira, ou de qualquer material, incluindo o dimensionamento de ligações (soldadas e aparafusadas de perfis de aço laminado e composto em duplo T e perfis tubulares) e as fundações com placas de amarração, sapatas, maciços de encabeçamento de estacas e vigas de equilíbrio, tendo interação com várias normas da ABNT com a NBR 14762:2010 e a NBR 8800:2008

O mCalcPerfis é software de nacionalidade brasileira, sendo uma calculadora de perfis de aço, onde se pode verificar perfis obtendo-se as resistências de cálculo, a compressão/tração, cortante (em duas direções) e flexão (em torno dos dois eixos principais de inércia). Com o uso desse software obtém-se resistências de perfis muito mais rápido que se obtém quando se usa ferramentas tradicionais, tem entrada de dados amigável e interativa, com o uso de perfis laminados, soldados e perfis formados a frio com seus procedimentos de cálculo de acordo com as normas NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010. Esse programa permite a verificação de 19 tipos de perfis formados a frio e 23 tipos de perfis laminados e soldados, desempenha funções tais como cálculo de tração, cálculo da compressão, cálculo da resistência à flexão e cálculo de resistência ao cortante, e também trabalha independente de qualquer programa.

## **7.3 Resultado dos Softwares**

Nesse tópico é apresentado a seguir a tabela 13 com o resumo dos resultados obtidos nos softwares, a essa tabela é o resumo do resultado dos softwares Cype3D 2016 para o perfil de seção aberta e o mCalc\_Perfis de seção fechada, ambas memórias de cálculos se encontra no anexo A e B respectivamente.

Tabela 13- Resumo dos resultados dos softwares Cype3D e mCalc\_perfis respectivamente

Resultado no Cype3D para Perfil 200X75X25 # 3,00 de seção aberta em um vão de 6,00 metros																						
Dimensão			Área cm <sup>2</sup>	Direção em X				Direção em Y			Jt cm <sup>4</sup>	Cw cm <sup>6</sup>	r0 cm	Msd kgf.cm	Vsd kgf	MrdIni kgf.m	MrdFlt kgf.m	MrdDist kgf.m	MrdFi n kgf.m	Vrd kfg	fmax cm	fadm cm
bw	bf	D		Ix cm <sup>4</sup>	Wx cm <sup>3</sup>	rx cm	Xcg cm	Iy cm <sup>4</sup>	Wy cm <sup>3</sup>	ry cm												
mm	mm	mm																				
200	75	25	11,55	701,93	70,2	7,80	1,42	88,3	16,45	2,76	0,36	7357,9	10	0,0	0,0	1561,0	530,0		530,0	7620		
LEGENDA																						
bw : Alma do perfil;				bf : Mesa do perfil				D: Enrijecedor perfil;				t : Espessura do perfil;										
Ix;Iy : Inércia em x e y;				rx;ry : Raio de giração em x e y;				Wx; Wy : Módulo elástico em x e y;				Jt : Inércia à torção:										
Cw: Constante de empenamento;				r0 : Raio de giração polar;				Msd : Momento solicitante;				Vsd : Cortante solicitante;										
Mrd : Momento resistente;				Vrd : Cortante resistente;				fmax : Flecha máxima;				fadm : Flecha admissível;										

Resultado no mCalc_Perfis para Perfil 200X75X25 # 3,00 de seção caixa em um vão de 6,00 metros																						
Dimensão			Área cm <sup>2</sup>	Direção em X				Direção em Y			Jt cm <sup>4</sup>	Cw cm <sup>6</sup>	r0 cm	Msd kgf.m	Vsd kfg	MrdIni kgf.m	MrdFlt kgf.m	MrdDis t kgf.m	MrdFin kgf.m	Vrd kfg	fmax cm	fadm cm
bw	bf	D		Ix cm <sup>4</sup>	Wx cm <sup>3</sup>	rx cm	Xcg cm	Iy cm <sup>4</sup>	Wy cm <sup>3</sup>	ry cm												
mm	mm	mm																				
200	75	25	22,56	1364,80	136,5	7,77	0,00	778,7	104,9	5,87	1707,90	0,0				3101,8	3101,8		3101,8	15381,8	0,115	0,53
LEGENDA																						
bw : Alma do perfil;				bf : Mesa do perfil				D: Enrijecedor perfil;				t : Espessura do perfil;										
Ix;Iy : Inércia em x e y;				rx;ry : Raio de giração em x e y;				Wx; Wy : Módulo elástico em x e y;				Jt : Inércia à torção:										
Cw: Constante de empenamento;				r0 : Raio de giração polar;				Msd : Momento solicitante;				Vsd : Cortante solicitante;										
Mrd : Momento resistente;				Vrd : Cortante resistente;				fmax : Flecha máxima;				fadm : Flecha admissível;										

Fonte: Autor 2018

## 7.4 Comparação do Resultados

Tabela 14 Tabela de Comparação dos resultados planilha e software para seção aberta

Resultado na Planilha otimizada para Perfil 200X75X25 # 3,00 de seção aberta em um vão de 6,00 metros																			
Dimensão			Área cm <sup>2</sup>	Direção em X				Direção em Y			Jt cm <sup>4</sup>	Cw cm <sup>6</sup>	r0 cm	Msd kgf.cm	Vsd kgf	MrdIni kgf.m	MrdFlt kgf.m	MrdDist kgf.m	Vrd kgf
bw mm	bf mm	D mm		Ix cm <sup>4</sup>	Wx cm <sup>3</sup>	rx cm	Xcg cm	Iy cm <sup>4</sup>	Wy cm <sup>3</sup>	ry cm									
200	75	25	11,28	682,04	68,2	7,78	2,29	85,8	17,5	2,76	0,35	7278,0	10	630,0	420,0	1550,9	508,7	1158,4	7936
Resultado no Cype3D para Perfil 200X75X25 # 3,00 de seção aberta em um vão de 6,00 metros																			
Dimensão			Área cm <sup>2</sup>	Direção em X				Direção em Y			Jt cm <sup>4</sup>	Cw cm <sup>6</sup>	r0 cm	Msd kgf.cm	Vsd kgf	MrdIni kgf.m	MrdFlt kgf.m	MrdDist kgf.m	Vrd kgf
bw mm	bf mm	D mm		Ix cm <sup>4</sup>	Wx cm <sup>3</sup>	rx cm	Xcg cm	Iy cm <sup>4</sup>	Wy cm <sup>3</sup>	ry cm									
200	75	25	11,55	701,93	70,2	7,80	1,42	88,3	16,45	2,76	0,36	7357,9	10	613,0	409,0	1561,0	530,0	Não Ver!!	7620

Fonte: Autor:2018

Tabela 15 Tabela de Comparação dos resultados planilha e software para seção caixa

Resultado na Planilha otimizada para Perfil 200X75X25 # 3,00 de seção caixa em um vão de 6,00 metros																			
Dimensão			Área cm <sup>2</sup>	Direção em X				Direção em Y			Jt cm <sup>4</sup>	Cw cm <sup>6</sup>	r0 cm	Msd kgf.m	Vsd kgf	MrdIni kgf.m	MrdFlt kgf.m	MrdDist kgf.m	Vrd kgf
bw mm	bf mm	D mm		Ix cm <sup>4</sup>	Wx cm <sup>3</sup>	rx cm	Xcg cm	Iy cm <sup>4</sup>	Wy cm <sup>3</sup>	ry cm									
200	75	25	22,56	1364,80	136,5	7,77	0,00	778,7	104,9	5,87	0,69	0,0	10,4	630,0	420,0	2767,0	1377,0	Não Ver!!	15873,0
Resultado no mCalc_Perfis para Perfil 200X75X25 # 3,00 de seção caixa em um vão de 6,00 metros																			
Dimensão			Área cm <sup>2</sup>	Direção em X				Direção em Y			Jt cm <sup>4</sup>	Cw cm <sup>6</sup>	r0 cm	Msd kgf.m	Vsd kgf	MrdIni kgf.m	MrdFlt kgf.m	MrdDist kgf.m	Vrd kgf
bw mm	bf mm	D mm		Ix cm <sup>4</sup>	Wx cm <sup>3</sup>	rx cm	Xcg cm	Iy cm <sup>4</sup>	Wy cm <sup>3</sup>	ry cm									
200	75	25	22,56	1364,80	136,5	7,77	0,00	778,7	104,9	5,87	1707,90	0,0	10	618,0	412,0	3101,8	3101,8	Não Ver!!	15381,8

Fonte: Autor:2018

## 8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos resultados apresentado anteriormente, é possível analisar que o perfil U enrijecido tanto em seção aberta ou fechada, seus esforços resistentes praticamente são mesmo se comparados os programas citados.

Para o perfil em seção aberta, comparando com o programa Cype3D, seus esforços resistentes praticamente se igualam, apenas com algumas variações, essa variação se dá pela pequena diferença numérica de aproximação das características geométricas e mecânicas calculas de forma diferentes, uma vez que a forma utilizada para o cálculo dessas características nesse trabalho, é um método simplificado apresentado na literatura usada de referência para essa análise, método esse chamado de método da seção efetiva. O cálculo para o momento e cortante solicitante, esse software aplica uma majoração de ELU direto ao carregamento, enquanto a planilha considera a que a carga inserida nela já estava com essa majoração, aplicando apenas um coeficiente de majoração direto no momento solicitante. O cálculo de momento resistente de início de escoamento os valores encontrados se equivalem, porém apenas com algumas variações numéricas. O cálculo de momento resistente com torção é possível ver que esse sobre um flambagem com torção excessiva, isso se dar pelo motivo do vão está ligado direto a essa verificação, tornando o perfil frágil a esse vão e a esse carregamento. A análise de flambagem distorcional, esse software não verifica essa interação, porém na planilha essa análise só foi possível, por ter sido utilizado o valor de Momento distorcional ( $M_{dist}$ ) extraído do programa de Desperfilo.

Para o mesmo perfil em seção fechada, comparando com o programa mCalc\_Perfis, seus esforços resistentes se igualam apenas, apenas com algumas variações, variação essa citada anteriormente, O cálculo de momento de início de escoamento os valores encontrados se equivalem, porém apenas com algumas variações numéricas, pelo motivo do mCalc\_perfis calcula através do método da largura efetiva (MLE) e a planilha pelo método da seção efetiva (MSD). O cálculo do momento resistente com torção, é possível perceber que o mCalc\_perfis considera a inércia da torção ( $J_t$ ) para perfis de seção fechada, sendo a soma das inércias do eixo X e Y, fazendo essa consideração, irá implicar diretamente no fator redução  $X_{flt}$ , fazendo mesmo ser igual a 1,0. Na planilha esse valor de inercia a torção é considerado o dobro da inércia a torção de um perfil simples, aproximadamente igual a literatura utilizada para essa análise. A análise de flambagem distorcional, não verifica por se tratar de um perfil de seção fechada.

## **8.1 Sugestões de pesquisa futura**

Sugere-se para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Analise Estrutural de colunas em Perfil formado a frio.
- Analise comparativa de resistência entre perfis formados a frio e perfis laminados.
- Analise comparativa de custo entre construção de residência em perfis formado a frio e perfis laminados.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados o fundamento teóricos para uma breve compreensão a respeito do que são perfis formado a frio, as particularidades do seu comportamento estrutural, as prescrições e recomendações normativas a respeito do seu dimensionamento, um exemplo prático, e a planilha de pré-dimensionamento para vigas submetidas à flexão simples.

Constatou-se a grande utilização dessas planilhas como mais uma ferramenta de trabalho e estudo no dia-a-dia de profissionais.

Analisando-se os resultados, pode-se destacar a fragilidade dos perfis de seção aberta, quando submetido a flambagem lateral com torção, com elevado ocorrência, mesmo em vão pequenos, isso decorre pelo motivo dos esforços aplicados nos perfis estarem fora do centro de torção.

Os perfis em seção caixão, como já é tido em pratica tem sua resistência maior do que os perfis simples, porém essa maior resistência torna o perfil rígido ao colapso, atuando também um flambagem lateral com torção, quando se tratar de peças com altura de alma elevada em relação a mesa e seu comprimento.

Tendo grandes vantagens e facilidades as planilhas de pré-dimensionamento são muito utilizadas no dia-a-dia dos profissionais e estudantes, é importante destacar as limitações dessas planilhas sobre o MSE para flexão, principalmente por não abranger todas as dimensões de perfis, como também as demais solicitações como: tração, compressão centrada e flexocompressão. A análise de momento fletor e cortante combinados formam realizada nessa planilha, considerando que o carregamento inerido já esteja com as interações de carregamento recomendadas pelas NBRs para seu estado de limite de serviço (ELS) e estado de limite último. (ELU). Cabe também destacar que o uso dessas planilhas não dispensa a consulta a um engenheiro calculista para verificar sua eficiência. A continuação na elaboração de planilhas como essa, dariam aos engenheiros e estudantes uma facilidade nos trabalhos do dia-a-dia em dimensionamento de pequenas estruturas.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço por perfis formado a frio: Procedimento**, Rio de Janeiro 2010.

\_\_\_\_\_, NBR 14724: **Informações e documentação: Trabalhos acadêmicos: Apresentação**, Rio de Janeiro 2011.

\_\_\_\_\_, NBR 6355: **Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio: Padronização**, Rio de Janeiro 2012.

\_\_\_\_\_, NBR 6649: **Bobinas e Chapas Finas a Frio de Aço-Carbono para uso Estrutural – Especificações**, Rio de Janeiro 2014.

\_\_\_\_\_, **NBR 6649: Bobinas e Chapas Finas a Quente de Aço-Carbono para uso Estrutural – Especificações**, Rio de Janeiro 2014.

CARVALHO, Paulo Roberto; GRIGOLETTI, Gladimir; BARBOSA, Giovana. Curso Básico de Perfil formado a Frio. 3. ed. Porto Alegre: [s.n.], 2014.

CHODRAUI, Gustavo, **Flambagem por distorção da seção transversal em perfis de aço formado à frio submetido à compressão centrada e à flexão**. São Carlos USP, 2003, 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas São Carlos, 2003. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-18072003-124917/pt-br.php> > Acesso em 10 maio 2018.

DONIM, Victor, **Tabela de Verificação de Perfis Formados a Frio**. Bahia: UCSAL, 2009, Monografia (Graduação), Universidade Católica de Salvador, Salvador 2009. Disponível em: < <http://proalpha.com.br/onewebmedia/apostila%20de%20met%C3%A1lica.pdf> > Acesso em 12 Fev. 2018.

GRAVIA INDÚTRIA DE PERFILADOS, **Catálogo Técnico**. Disponível em: < <http://www.gravia.net.br/industria-de-perfilados/catalogos> > Acesso em 12 fev.2018.

INFOMET, **Laminação**. Disponível em: < <http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=238> >, Acesso em dia 13 mar. 2018.

LIMA, Luciano, **Torção**. Rio de Janeiro: UERJ, 2001, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Mestrado Acadêmico Faculdade de Engenharia – FEN/UERJ, Rio de Janeiro 2001. Disponível em: <<http://www.labciv.eng.uerj.br/pgeciv/files/Notas%20de%20Aula%2001%20-%20Tor%C3%A7%C3%A3o.pdf> > Acesso em 10 maio 2018.

MMBORGES, **Laminação**. Disponível em:< [http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont\\_html/laminacao.htm](http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont_html/laminacao.htm) >. Acessado em 13 mar. 2018.

PERFINAÇO, **Catálogo Técnico**. Disponível em: < <http://perfinaco.com.br/produtos/perfis-especiais/> > Acesso em 12 fev. 2018.

PORTAL METALICA, **Catálogo Técnico**. Disponível em: < <http://www.metalica.com.br/perfil-u-enrijecido-de-chapa-dobrada> > Acesso em 12 fev. 2018.

SILVA, Edson Lubas; PIERIN, Igor; PIGNSTTA, Valdir. **Dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação** 192p ,conforme ABNT, NBR 14762:2010 e NBR 6355:2012 – Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil / CBCA, 2010. Disponível em < <http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/publicacoes-manuais.php> > Acesso em 15 mar. 2018.

SILVA, Júlio, **Análise teórica-experimental de perfis de aço formado a frio devido à instabilidade por distorção na flexão**, São Carlos: US, 2004, 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas São Carlos, 2004. Disponível em: < <http://www.set.eesc.usp.br/producao/47> > Acesso em 10 maio 2018.

VENANCI, Vitaliano, **Resistência de vigas-colunas formadas por perfis de aço de chapa dobrados, com base no método da resistência direta**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Estruturas, Rio de Janeiro 2005. Disponível em: < <http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/105-msc-pt-2005/2027-vitalino-venanci> > Acesso em 11 maio 2018.

**ANEXO A Memória de Cálculo do Cype3D 2016 (Seção Aberta)**

Perfil: C200X75X25X3.04 Material: Aço (CF-24)									
Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas						
Inicial	Final		Área (cm <sup>2</sup> )	I <sub>x</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>t</sub> <sup>(2)</sup> (cm <sup>4</sup> )	x <sub>g</sub> <sup>(3)</sup> (mm)	y <sub>g</sub> <sup>(3)</sup> (mm)	
N1	N2	6.000	11.55	701.93	88.27	0.36	-14.21	0.00	
<i>Notas:</i> (1) Inércia em relação ao eixo indicado (2) Momento de inércia à torção uniforme (3) Coordenadas do centro de gravidade									
		Flambagem		Flambagem lateral					
		Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.		Aba inf.			
β		1.00	1.00	1.00		1.00			
L <sub>k</sub>		6.000	6.000	6.000		6.000			
C <sub>m</sub>		-	-	1.000		1.000			
C <sub>b</sub>		-		1.000					
<i>Notação:</i> β: Coeficiente de flambagem L <sub>k</sub> : Comprimento de flambagem (m) C <sub>m</sub> : Coeficiente de momentos C <sub>b</sub> : Fator de modificação para o momento crítico									

**Resistência à flexão eixo X** (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

**X**

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

$\eta : \underline{1.156} \quad \mathbf{X}$

O momento fletor solicitante de cálculo desfavorável **M<sub>Sd</sub>** produz-se num ponto situado a uma distância de 3.000 m do nó N1, para a combinação de hipóteses 1.25·PP+1.25·CP1.

**M<sub>Sd</sub>** : 0.613 t·m

O momento fletor resistente de cálculo **M<sub>Rd</sub>** deve ser tomado como o menor valor calculado em a), b) y c):

**M<sub>Rd</sub>** : 0.530 t·m

**a) Início de escoamento da la seção efetiva (9.8.2.1)**

$$M_{Rd} = W_{ef} \cdot f_y / \gamma$$

**M<sub>Rd</sub>** : 1.561 t·m

Onde:

**W<sub>ef</sub>**: Módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 9.2, com  $\sigma$  calculada para o estado limite último de escoamento da seção.

**f<sub>y</sub>**: Tensão de escoamento.

$\gamma$ : Coeficiente de ponderação das resistências.

$$W_{ef} : \underline{70.19} \text{ cm}^3$$

$$f_y : \underline{2446.48} \text{ kgf/cm}^2$$

$$\gamma : \underline{1.1}$$

### b) Flambagem lateral com torção (9.8.2.2)

$$M_{Rd} = \chi_{FLT} W_{c,ef} f_y / \gamma$$

$$M_{Rd} : \underline{0.530} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

**W<sub>c,ef</sub>**: Módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 9.2, adotando  $\sigma = \chi_{FLT} f_y$ .

**f<sub>y</sub>**: Tensão de escoamento.

$\gamma$ : Coeficiente de ponderação das resistências.

**$\chi_{FLT}$** : Fator de redução associado à flambagem lateral com torção.

$$W_{c,ef} : \underline{70.19} \text{ cm}^3$$

$$f_y : \underline{2446.48} \text{ kgf/cm}^2$$

$$\gamma : \underline{1.1}$$

$$^{(1)} \lambda_0 \leq 0.6 \rightarrow \chi_{FLT} = 1$$

$$^{(2)} 0.6 < \lambda_0 < 1.336 \rightarrow \chi_{FLT} = 1.11(1 - 0.278\lambda_0^2)$$

$$^{(3)} \lambda_0 \geq 1.336 \rightarrow \chi_{FLT} = 1/\lambda_0^2$$

$$^{(1)} \lambda_0 \leq 0.6 \rightarrow \chi_{FLT} = 1$$

$$^{(2)} 0.6 < \lambda_0 < 1.336 \rightarrow \chi_{FLT} = 1.11(1 - 0.278\lambda_0^2)$$

$$^{(3)} \lambda_0 \geq 1.336 \rightarrow \chi_{FLT} = 1/\lambda_0^2$$

$$^{(3)} \chi_{FLT} : \underline{0.34}$$

Sendo:

$$\lambda_0 = (W_c f_y / M_e)^{0.5}$$

$$\lambda_0 : \underline{1.72}$$

**W<sub>c</sub>**: Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida.

$$W_c : \underline{70.19} \text{ cm}^3$$

O momento fletor de flambagem lateral com torção **M<sub>e</sub>**, em regime elástico, pode ser calculado pela seguinte expressão para barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica sujeitas à flexão em torno do eixo de simetria:

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{et})^{0.5}$$

$$M_e : \underline{0.584} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

**C<sub>b</sub>**: Coeficiente de equivalência de momento na flexão.

$$C_b : \underline{1.00}$$

$$N_{ey} : \underline{4.933} \text{ t}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right]$$

$$N_{ez} : \underline{6.905} \text{ t}$$

**I<sub>y</sub>**: Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo Y.

$$I_y : \underline{88.27} \text{ cm}^4$$

**I<sub>t</sub>**: Momento de inércia à torção uniforme.

$$I_t : \underline{0.36} \text{ cm}^4$$

**C<sub>w</sub>**: Constante de empenamento da seção.

$$C_w : \underline{7357.93} \text{ cm}^6$$

**E**: Módulo de elasticidade.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

**G**: Módulo de elasticidade transversal.

$$G : \underline{784129} \text{ kgf/cm}^2$$

**K<sub>y</sub>L<sub>y</sub>**: Comprimento efetivo de flambagem lateral.

$$K_y L_y : \underline{6.000} \text{ m}$$

**K<sub>z</sub>L<sub>z</sub>**: Comprimento efetivo de flambagem por torção.

$$K_z L_z : \underline{6.000} \text{ m}$$

**r<sub>0</sub>**: Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção.

$$r_0 = \left[ r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2 \right]^{0.5}$$

$$r_0 : \underline{10.00} \text{ cm}$$

Sendo:

**r<sub>x</sub>, r<sub>y</sub>**: Raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia X e Y, respectivamente.

$$r_x : \underline{7.80} \text{ cm}$$

$$r_y : \underline{2.76} \text{ cm}$$

**x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>**: Coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais X e Y, respectivamente, em relação ao centróide da seção.

$$x_0 : \underline{-56.14} \text{ mm}$$

$$y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

### **Resistência ao esforço cortante Y** (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.054} \checkmark$$

O esforço cortante solicitante de cálculo desfavorável **V<sub>Sd</sub>** produz-se no nó N1, para a combinação de hipóteses 1.25·PP+1.25·CP1.

$$V_{Sd} : \underline{0.409} \text{ t}$$

A força cortante resistente de cálculo da alma **V<sub>Rd</sub>** deve ser calculada por:

$$^{(1)}V_{Rd} : \underline{7.620} \text{ t}$$

$$\text{para } ^{(1)}h/t \leq 1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.6f_y h t / \gamma$$

$$1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} : \underline{69.71}$$

$$\text{para } ^{(2)}1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} < h/t \leq 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.65t^2 (k_v f_y E)^{0.5} / \gamma$$

$$h/t : \underline{61.79}$$

para  $^{(3)}h/t > 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = [0.905Ek_v t^3/h] / \gamma$

$$1.4(EK_v/f_y)^{0.5} : \underline{90.37}$$

Onde:

**t**: Espessura da alma.

$$t : \underline{3.04} \text{ mm}$$

**h**: Largura da alma.

$$h : \underline{187.84} \text{ mm}$$

**f<sub>y</sub>**: Tensão de escoamento.

$$f_y : \underline{2446.48} \text{ kgf/cm}^2$$

**E**: Módulo de elasticidade.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

**γ**: Coeficiente de ponderação das resistências.

$$\gamma : \underline{1.1}$$

**K<sub>v</sub>**: Coeficiente de flambagem local por cisalhamento, que para a alma sem enrijecedores transversais é dado por:

$$K_v : \underline{5.00}$$

$$k_v = 5.00$$

**Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados** (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Os esforços solicitantes de cálculo desfavoráveis **M<sub>Sd</sub>** e **V<sub>Sd</sub>** produzem-se num ponto situado a uma distância 2.625 m do nó N1, para a combinação de hipóteses 1.25·PP+1.25·CP1.

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante de cálculo e a força cortante solicitante de cálculo devem satisfazer à seguinte expressão de interação:

$$\eta = \left( \frac{M_{Sd}}{M_{0,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{V_{Sd}}{V_{0,Rd}} \right)^2$$

$$\eta : \underline{0.150} \checkmark$$

Onde:

**M<sub>Sd</sub>**: Momento fletor solicitante de cálculo.

$$M_{Sd} : \underline{0.604} \text{ t}\cdot\text{m}$$

**M<sub>0,Rd</sub>**: Momento fletor resistente de cálculo conforme 9.8.2.1.

$$M_{0,Rd} : \underline{1.561} \text{ t}\cdot\text{m}$$

**V<sub>Sd</sub>**: Força cortante solicitante de cálculo.

$$V_{Sd} : \underline{0.051} \text{ t}$$

**V<sub>Rd</sub>**: Força cortante resistente de cálculo conforme 9.8.3.

$$V_{Rd} : \underline{7.620} \text{ t}$$

## ANEXO B Memória de Cálculo mCalc\_Perfis (Seção Fechada)

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 200 x 75 x 25 x 3  
Aço: ASTM A36  $f_y = 250$  MPa  $f_u = 400$  MPa

### COMPRIMENTOS DA BARRA

$K_x L_x = 6$  m  $K_t L_t = 6$  m  
 $K_y L_y = 6$  m  $L_b = 6$  m

## Cálculo da Resistência à Flexão - eixo X

### Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned} A_{ef} &= 0,00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{xef} &= 0,00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo X} \\ d &= 0,00 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ Y_{G \text{ final}} &= Y_G + d = 0,10 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0,00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\ W_{ef} &= \frac{I_G}{Y_{G \text{ final}}} = 0,00 \text{ m}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\ M_{Rdx}^{FL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 3101,81 \text{ kgf.m} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento} \end{aligned}$$

### Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção

$$\begin{aligned} M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 74915,01 \text{ kgf.m} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\ W_c &= 0,00 \text{ m}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\ \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,21 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0 \end{aligned}$$

$\chi_{FLT} = 1,00$  Fator de redução associado à flambagem lateral com torção

$$\text{Cálculo de } \sigma \text{ na tensão} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 25000000,00 \text{ kgf/m}^2$$

$$\begin{aligned} A_{ef} &= 0,00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{xef} &= 0,00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo X} \\ d &= 0,00 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ Y_{G \text{ final}} &= Y_G + d = 0,10 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0,00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\ W_{cef} &= \frac{I_G}{Y_{G \text{ final}}} = 0,00 \text{ m}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\ M_{Rdx}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 3101,81 \text{ kgf.m} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT} \\ M_{Rdx} &= 3101,81 \text{ kgf.m} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo X} \end{aligned}$$

## Cálculo da Resistência ao cortante - eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 62,67 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68,31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88,54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

então

$$V_{Rdy} = 15381,82 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

mCalc\_Perfis - Stabile Engenharia Ltda. - [www.stabile.com.br](http://www.stabile.com.br)

### CA 200 x 75 x 25 x 3

<b>Perfil Simplex</b>	
$I_x$ :	1364,797 cm <sup>4</sup>
$I_y$ :	778,277 cm <sup>4</sup>
$x_g$ :	0 cm
$y_g$ :	10 cm
Área:	22,56 cm <sup>2</sup>
$I_t$ :	1707,991 cm <sup>4</sup>
$C_w$ :	0 cm <sup>6</sup>
$x_0$ :	0 cm
$y_0$ :	0 cm
Peso:	17,71 kgf/m
$r_x$ :	7,778 cm
$r_y$ :	5,874 cm