

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MÁRIO SERGIO MANDÚ KLEINA

MILENA PORTES CASEKER

INSTABILIDADE POR DISTORÇÃO DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO,  
AVALIAÇÃO ANALÍTICA E EXPERIMENTAL

CURITIBA

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MÁRIO SERGIO MANDÚ KLEINA

MILENA PORTES CASEKER

INSTABILIDADE POR DISTORÇÃO DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO,  
AVALIAÇÃO ANALÍTICA E EXPERIMENTAL

Trabalho Final de Curso apresentado  
como requisito para obtenção do título  
de graduação do curso de Engenharia  
Civil, Setor de Tecnologia da  
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marco André  
Argenta

CURITIBA

2014

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

MÁRIO SERGIO MANDÚ KLEINA

MILENA PORTES CASEKER

Instabilidade por distorção de perfis de aço formados a frio, avaliação analítica e experimental

Trabalho de conclusão de curso como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil pelo Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

---

Prof. Dr. Marco André Argenta  
Orientador – Departamento de Construção Civil, UFPR.

---

Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosembach Miranda  
Departamento de Construção Civil, UFPR.

---

Fabiani Franzen  
Arquiteta

Curitiba, 04 de Dezembro de 2014.

## RESUMO

Atualmente, os perfis de aço formados a frio têm encontrado intensa aplicação como elementos estruturais nas construções e, como consequência, estão sujeitos aos mais diversos tipos de carregamento. Por serem constituídas de perfis com seções abertas e de pequena espessura, as barras, podem ter problemas de instabilidade, deformações excessivas ou atingir os limites da resistência do aço devido a esforços quando solicitados à flexão.

Este trabalho trata dos aspectos do dimensionamento de perfis de chapa de aço formados a frio quando submetidos à flexão, através da análise de quatro seções do tipo “U” enrijecido (Ue): Ue 90x40x9x0,80, Ue 90x40x9x0,95, Ue 140x40x9x0,80 e Ue 140x40x9x0,95. Tais seções foram escolhidas pela larga utilização dentro da construção.

O objetivo foi variar a espessura de chapa e altura da alma das seções transversais analisadas e observar a sua influência na resistência às instabilidades ocorridas. Ainda assim, pode-se estabelecer coeficientes de correlação através das verificações prescritas na *ABNT NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio*.

Os ensaios à flexão foram realizados com os perfis biapoiados travados lateralmente nos apoios e em dois pontos intermediários, submetidos a esforços concentrados.

Verificou-se um incremento considerável na resistência à instabilidade dos perfis, podendo chegar a mais de 70% em alguns casos, além da boa correlação com as prescrições da norma brasileira para dimensionamento dos perfis formados a frio, sempre à favor da segurança.

*Palavras-chave: estruturas de aço; perfis formados a frio; instabilidade distorcional; flexão; ABNT NBR 14762.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos nossos pais e família, pelo incansável apoio durante toda esta etapa das nossas vidas.

Ao Professor Marco André Argenta pela orientação e apoio na elaboração deste trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais e Estruturas dos Institutos Lactec, pelo auxílio prestado na elaboração dos ensaios.

A todos os professores do curso, que são os responsáveis pela nossa formação acadêmica.

Aos nossos amigos e colegas, que, de alguma maneira, sempre estiveram nos apoiando e nos ajudando nesta jornada.

## SUMÁRIO

### RESUMO

4

### 1. INTRODUÇÃO

11

### 2. JUSTIFICATIVA

12

### 3. OBJETIVO

13

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

13

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

13

### 4. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

14

#### 4.1 HISTÓRICO

14

#### 4.2 GENERALIDADES

15

##### 4.2.1 O SISTEMA CONSTRUTIVO

15

##### 4.2.2 PRINCÍPIOS DE EXECUÇÃO

16

##### 4.2.3 VANTAGENS DO SISTEMA LIGHT STEEL FRAME

17

##### 4.2.4 DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS

18

##### 4.2.5 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO SISTEMA

22

### 5. PERFIS FORMADOS A FRIO

24

5.1	APLICAÇÃO	24
5.2	PROCESSO DE FABRICAÇÃO	26
5.3	AÇO GALVANIZADO	28
5.4	EFEITOS DO PROCESSO PRODUTIVO NAS PROPRIEDADES DO PERFIL	28
5.5	PADRONIZAÇÃO DOS PERFIS FORMADOS A FRIO	29
<b>6.</b>	<b>INSTABILIDADE DO PERFIL</b>	29
6.1	INSTABILIDADE LOCAL – FLAMBAGEM DE CHAPA	30
6.1.1	FLAMBAGEM LOCAL DA MESA	31
6.1.2	FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA (FLA)	32
6.2	INSTABILIDADE GLOBAL	32
6.2.1	FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO (FLT)	32
6.3	INSTABILIDADE POR DISTORÇÃO	33
6.3.1	FLAMBAGEM DISTORCIONAL	34
6.3.2	O MODELO DE HANCOCK	35
<b>7.</b>	<b>APLICAÇÃO DA ABNT NBR 14762:2010 AOS PERFIS FLETIDOS</b>	36
7.1	MÉTODOS	36

7.1.1	MÉTODO DA LARGURA EFETIVA (MLE)	37
7.1.1.1	ELEMENTOS AA E AL	37
7.1.1.2	ELEMENTOS UNIFORMEMENTE COMPRIMIDOS COM ENRIJECEDOR DE BORDA SIMPLES	39
7.1.2	MÉTODO DA SEÇÃO EFETIVA (MSE)	41
7.1.3	MÉTODO DA RESISTÊNCIA (MRD)	41
7.2	ELEMENTOS SUBMETIDOS À FLEXÃO SIMPLES	42
7.2.1	INÍCIO DE ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA	42
7.2.2	FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO	44
7.2.3	FLAMBAGEM DISTORCIONAL	46
7.2.3.1	MOMENTO FLETOR DE FLAMBAGEM DISTORCIONAL ELÁSTICA	48
<b>8.</b>	<b>METODOLOGIA</b>	50
8.1	INTRODUÇÃO	50
8.2	PERFIS UTILIZADOS	51
8.3	MÉTODOLOGIA DE ENSAIO	53
8.4	METODOLOGIA DE CÁLCULO	55
<b>9.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	56

9.1 PERFIS ENSAIADOS

56

**10. CONCLUSÃO**

65

**REFERÊNCIAS**

67

**ANEXOS**

70

**CÁLCULOS**

70

**PERFIL Ue 90x40x9x0,8**

70

1. INÍCIO DO ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA

70

2. FLAMBAGEM LATERAL POR TORÇÃO

71

3. FLAMBAGEM DISTORCIONAL

73

**PERFIL Ue 90x40x9x0,95**

76

1. INÍCIO DO ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA

76

2. FLAMBAGEM LATERAL POR TORÇÃO

77

3. FLAMBAGEM DISTORCIONAL

79

**PERFIL Ue 140x40x9x0,8**

82

1. INÍCIO DO ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA

82

2. FLAMBAGEM LATERAL POR TORÇÃO

84

85 3. FLAMBAGEM DISTORCIONAL

**PERFIL Ue 140x40x9x0,95**

88

1. INÍCIO DO ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA

89

2. FLAMBAGEM LATERAL POR TORÇÃO

90

3. FLAMBAGEM DISTORCIONAL

91

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes e subsistemas que compõem o Sistema Construtivo em Light Steel Framing (Fonte: CRASTO, 2006).....	16
Figura 2 - Exemplo de uma casa em construção no Sistema Light Steel Framing (Fonte: REFORMOLAR).....	18
Figura 3 - Painel composto por montantes e guias no Sistema construtivo em Light Steel Framing (Fonte: CRASTO, 2006).....	19
Figura 4 - Fita metálica para travamento dos painéis do Sistema Light Steel Framing (Fonte: CRASTO, 2006).....	20
Figura 5 - Vigas de piso no Sistema construtivo em Light Steel Framing (Fonte: CRASTO, 2006).....	21
Figura 6 - Distribuição de esforços entre os painéis do Sistema Light Steel Framing (Fonte: CRASTO, 2006).....	23
Figura 7 - Máquina perfiladeira (Fonte: ZHONGYUON).....	27
Figura 8 – Dobradeira (Fonte: VEGA MÁQUINAS).....	27
Figura 9 - Flambagem local da mesa (Fonte: JAVARONI,1999).....	31
Figura 10 - Flambagem lateral com torção (Fonte: JAVARONI,1999).....	33
Figura 11 - Instabilidade por distorção (Fonte: JAVARONI, 1999).....	34
Figura 12 - Flambagem por distorção (Fonte: JAVARONI, 1999).....	35
Figura 13 - Modelo simplificado proposto por Hancock e Lau (Fonte: JAVARONI,1999).....	36
Figura 14 – Larguras efetivas dos elementos AL e AA (Fonte: ABNT NBR 14.762:2010).....	37
Figura 15 – Elemento uniformemente comprimido com enrijecedor de borda simples (Fonte: ABNT NBR 14.762:2010).....	40
Figura 16 – Fórmulas para determinação do coeficiente de flambagem local para perfis do tipo U enrijecido e Z enrijecido. (Fonte: ABNT NBR 14.762:2010).....	43
Figura 17 - Seção considerada para determinação da instabilidade por distorção. . .	50
Figura 18 - Perfil Ue 90x40x9, com espessuras de chapa de 0,80mm e 0,95mm (Fonte: BARBIERI DO BRASIL).....	51
Figura 19 – Perfil Ue140x40x9, com espessuras de chapa de 0,80mm e 0,95mm (Fonte: BARBIERI DO BRASIL).....	52

Figura 20 – Esquema de carregamento dos perfis, sendo $L=2,7$ m para os perfis Ue90x40x9x0,95 e $L=3,0$ m para os demais perfis.....	53
Figura 21 – Detalhe do apoio rotulado.....	54
Figura 22 - Esquema de travamento dos perfis ensaiados.....	54
Figura 23 – Uso do ShapeBuilder para determinação de propriedades avançadas da seção transversal em estudo.....	56
Figura 24- Instabilidade ocorrida no meio do vão.....	58
Figura 25- Instabilidade ocorrida no travamento intermediário.....	59
Figura 26 – Força x deformação do conjunto. Perfil: Ue 90x40x9x0,80.....	60
Figura 27 - Força x deformação do conjunto. Perfil: Ue 90x40x9x0,95.....	61
Figura 28 - Força x deformação do conjunto. Perfil: Ue 140x40x9x0,80.....	62
Figura 29 - Força x deformação do conjunto. Perfil: Ue 140x40x9x0,95.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Designações dos perfis de aço formados a frio para uso em Light Steel Framing e suas respectivas aplicações (Fonte NBR15253:2005).....	25
Tabela 2 - Dimensões nominais usuais dos perfis de aço para Light Steel Framing (Fonte NBR15253:2005).....	26
Tabela 3 - Limites para verificação da instabilidade por distorção (Fonte: ABNT NBR14762:2010).....	47
Tabela 4 – Propriedades geométricas dos perfis analisados.....	52
Tabela 5 - Resultados obtidos nos perfis submetidos à flexão.....	57
Tabela 6 – Valores últimos obtidos.....	63
Tabela 7 – Propriedades geométricas da seção composta pela mesa e enrijecedor de borda do perfil Ue 90x40x9x0,8.....	73
Tabela 8 – Propriedades geométricas da seção composta pela mesa e enrijecedor de borda do perfil Ue 90x40x9x0,95.....	79
Tabela 9 - Propriedades geométricas da seção composta pela mesa e enrijecedor de borda do perfil Ue 140x40x9x0,8.....	86
Tabela 10 - Propriedades geométricas da seção composta pela mesa e enrijecedor de borda do perfil Ue 140x40x9x0,95.....	92

## 1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade na construção civil e as diversas vantagens apresentadas pelo sistema construtivo em aço promovem a aplicação em larga escala dos perfis de aço formados a frio nos últimos tempos.

Estes elementos, dada a grande variedade das seções transversais e da boa relação massa/resistência, alcançaram lugar de destaque entre as estruturas metálicas. Podem ser projetados para cada aplicação específica com dimensões adequadas às necessidades, como no caso de elementos estruturais leves como terças, montantes, treliças travamentos, etc. Seu uso é eficaz em galpões de pequeno e médio porte, coberturas, mezaninos, moradias de interesse social, edifícios de pequeno e médio porte, entre outros.

A definição da NBR 14762 de 2010 - "Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio" facilitou o correto dimensionamento desses elementos, pois é necessário conhecer com detalhes o seu comportamento estrutural, dado que os perfis formados a frio possuem algumas particularidades em relação às demais estruturas de concreto ou mesmo as compostas por perfis soldados ou laminados de aço.

Este trabalho visa analisar os diversos tipos de falha aos quais os perfis de aço estão sujeitos quando submetidos à flexão. O estudo foi realizado utilizando perfis tipo "U" enrijecido, travados lateralmente em pontos discretos. Serão discutidos os modos de falha encontrados, a carga última de ensaio, os deslocamentos ocorridos e os valores teóricos correspondentes à norma.

## 2. JUSTIFICATIVA

O Light Steel Framing se fundamenta como um sistema construtivo padronizado de tecnologia avançada, que permite uma obra concluída rapidamente, com melhor produtividade e menores desperdícios.

Neste aspecto, a construção em aço atende às exigências da construção civil, que se encontra em crescente avanço tecnológico, visto que é eficiente, tem uma boa produtividade e gera menor impacto ambiental.

O estudo do comportamento estrutural dos elementos que compõem este sistema construtivo torna-se necessário, pelo interesse dos fabricantes e porque a eficiência das edificações construídas neste modelo depende da correta aplicação dos perfis.

Outro ponto importante é a difusão das determinações da NBR 14762 (ABNT, 2010), que vem atualizar as filosofias de projeto e firmar a aceitação dos perfis de aço formados a frio no mercado da construção civil.

### 3. OBJETIVO

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a instabilidade dos perfis de aço formados a frio, utilizando o método simplificado de análise descrito na ABNT NBR 14.762:2010, comparando com as verificações estabelecidas em norma quanto à resistência à flexão.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Verificar se o momento solicitante obtido em ensaio atende aos requisitos da ABNT NBR 14.762:2010;
- 2) Estabelecer um coeficiente de correlação entre os valores encontrados nos ensaios e as verificações apresentadas na ABNT NBR 14.762:2010;
- 3) Analisar a influência da variação da espessura da chapa e da altura da alma da seção transversal dos perfis no comportamento em relação aos modos de instabilidade.

## 4. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

### 4.1 HISTÓRICO

Segundo Jardim e Campos (entre 2004 e 2009, p.1), no século XIX, quando os Estados Unidos começou a conquista do território, a população americana se multiplicou por dez e, para atender a necessidade por habitações, recorreu-se à utilização da madeira disponível na região, utilizando os conceitos de praticidade, velocidade e produtividade oriundos da Revolução industrial. Assim, surge um novo sistema construtivo, composto por quadros estruturais de madeira, denominado *Wood Framing*.

Na segunda metade do século XX, o mercado do aço americano começou a disponibilizar aços com maior resistência à corrosão e menos espessos, dando início assim a tecnologia dos aços galvanizados. Tal fato possibilitou a substituição lenta e sucessiva das estruturas de madeira por perfis de aço, tendo maior intensidade no momento em que as seguradoras atribuíram elevadas taxas às obras construídas no sistema *Wood Framing* e subtaxaram o *Light Steel Framing*, incentivando amplamente o desenvolvimento e aplicação da tecnologia em perfis leves de aço (JARDIM; CAMPOS, [entre 2004 e 2009], p. [1]).

O panorama atual dos países pioneiros no uso de estruturas em aço demonstra que o sistema LSF é uma solução muito consolidada como sistema eficiente de construção. Porém, no panorama nacional, segundo Silva e Silva (2004, p. 6), a carência de tecnologia para introduzir o aço à execução de vedações é uma das maiores dificuldades para viabilizar o emprego generalizado de construções metálicas no Brasil, uma vez que a utilização de estruturas metálicas é muito inferior à capacidade produtiva da indústria siderúrgica brasileira.

A arquiteta Heloísa Pomaro, no site “Metalica”, ainda ressalta que temos muito que caminhar para alcançar o patamar de países vizinhos ao nosso, aqui mesmo na América do Sul, como o Chile, onde o LSF é empregado em cerca de 35% das construções. Diferente do Brasil, os chilenos conseguiram alcançar essa margem graças aos subsídios governamentais, que têm papel fundamental na difusão e implantação das políticas habitacionais. O governo entendeu que

minimizaria os déficits habitacionais oferecendo um produto de qualidade aos chilenos, estimulando assim o crescimento da tecnologia LSF.

Santiago e Araújo (2008, p. 2) acrescentam que no Brasil o sistema ainda é pouco usual, mas vem mostrando um visível potencial de crescimento visto o interesse do mercado da construção em buscar soluções mais eficientes que os sistemas artesanais predominantes.

## 4.2 GENERALIDADES

### 4.2.1 O SISTEMA CONSTRUTIVO

De acordo com Freitas e Crasto (2006, p. 12), há dois conceitos referentes ao sistema Light Steel Frame: Frame é o esqueleto estrutural projetado para dar forma e suportar a edificação, sendo composto por elementos leves – os perfis formados a frio (PFF) e Framing é o processo pelo qual são unidos e vinculados esses elementos. No Geral, o esqueleto estrutural é composto por paredes, pisos e cobertura. Reunidos, eles possibilitam a integridade estrutural da edificação, resistindo aos esforços solicitantes.

Este capítulo tratará da evolução do sistema construtivo LSF, seu desempenho como painéis estruturais e alguns princípios básicos de dimensionamento.

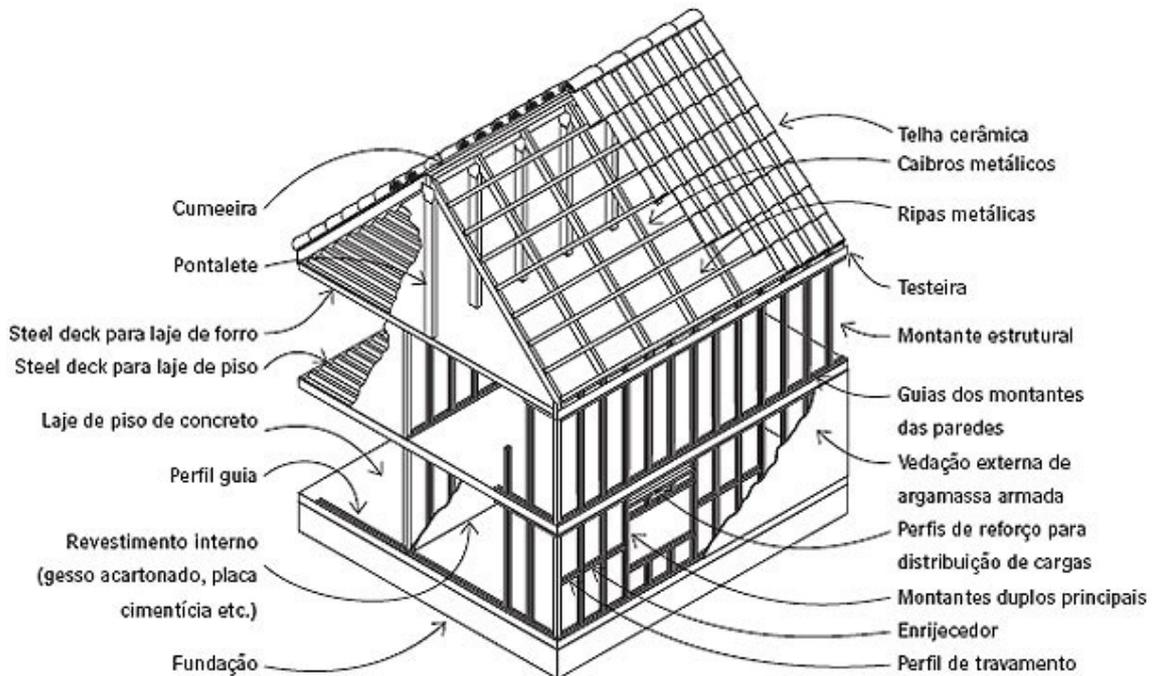


Figura 1 - Componentes e subsistemas que compõem o Sistema Construtivo em Light Steel Framing (Fonte: CRASTO, 2006).

#### 4.2.2 PRINCÍPIOS DE EXECUÇÃO

Existem basicamente quatro métodos de construção utilizando o sistema LSF:

a) Método stick: neste método, os perfis são cortados no próprio canteiro de obras e os painéis montados no local. Normalmente utilizado em locais onde não é viável a pré-fabricação;

b) Método por painéis: os painéis são pré-fabricados fora do canteiro e montados no local. Os painéis são conectados utilizando técnicas e materiais convencionais (parafusos auto-atarrachantes). Alguns materiais de fechamento podem ser montados ainda na fábrica, diminuindo o tempo de construção no canteiro;

c) Construção modular: as unidades são completamente pré-fabricadas, sendo entregues no local da obra com todos os acabamentos internos, como revestimentos, peças sanitárias, bancadas, instalações elétricas e hidráulicas etc. Exemplos comuns dessa metodologia de construção são os módulos de banheiros para obras.

d) Sistema “Frame CAD”: A fabricação das estruturas, perfis e painéis são customizadas através de sistema de perfiladeira CAD/CAM. As peças são pré-furadas, pré-cortados e etiquetados, de modo a otimizar a montagem.

#### 4.2.3 VANTAGENS DO SISTEMA LIGHT STEEL FRAME

De acordo com Pinho e Penna (2008, p. 12), existem vários paradigmas relacionados à construção em aço que podem estar impedindo uma análise correta desta alternativa de sistema estrutural, dentre os mais comuns podem ser citados: o alto custo da estrutura de aço; a falsa ideia de que o aço enferruja facilmente; as dificuldades com as interfaces e a proteção contra o fogo.

Em relação ao custo das estruturas de aço, em geral é maior do que os sistemas convencionais, porém, as diversas vantagens o tornam um sistema altamente viável:

- Rapidez de execução: Na fase de montagem a estrutura de aço é muito mais eficiente se comparada a estruturas convencionais. Esta redução de cronogramas pode gerar um retorno mais rápido do capital investido;
- Flexibilidade dos projetos: Permite facilmente alterações de projeto, reforços e soluções não previstas nas fases preliminares. Torna os processos dinâmicos e as alterações constantes;
- Grande precisão: Aumento do desempenho de outras atividades na obra, pela preocupação com a precisão no momento da fabricação;
- Alta resistência: Apresenta elevada resistência mecânica, resultando em elementos estruturais com menores dimensões e capacidade de vencer grandes vãos;
- Material totalmente reciclável: Apesar do baixo volume de desperdício, é um material 100% reciclável, atendendo às demandas de sustentabilidade.



*Figura 2 - Exemplo de uma casa em construção no Sistema Light Steel Framing (Fonte: REFORMOLAR).*

#### 4.2.4 DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS

O conceito principal do projeto segundo o Sistema LSF é dividir a estrutura em uma grande quantidade de elementos estruturais, de maneira que cada um resista a uma pequena parcela da carga total aplicada. Com este critério, é possível utilizar perfis mais esbeltos e painéis mais leves e fáceis de manipular (RODRIGUES, 2006).

Guias: serve como base e topo das paredes e entrepiso, fixando as extremidades dos montantes, para isso são constituídas por perfis U. Também são combinadas com fitas e bloqueadores para o travamento lateral de montantes e na montagem das vergas. Quando compõem paredes internas ou externas, são dimensionadas para a solicitação do esforço de compressão.

Montantes: utilizados quase sempre na vertical para composição das paredes, podem ser considerados como rotulados em suas extremidades. Quando compõem paredes internas, são dimensionados aos esforços de compressão e tração isoladamente. Nas paredes externas, a flexo-compressão e a flexo-tração precisam ser consideradas, devido ao vento. Como nesse elemento o perfil utilizado é o do tipo C e o centro de gravidade deste não coincide com o centro de torção, o montante irá flambar por flexo-torção, sendo então necessária a instalação de bloqueadores ou de fitas perpendiculares à seção, para realizar o travamento lateral. Quando são utilizadas, em um dos lados do painel, placas de revestimento com desempenho estrutural comprovado, só é necessário instalar uma fita de aço do lado oposto, para realizar o travamento.

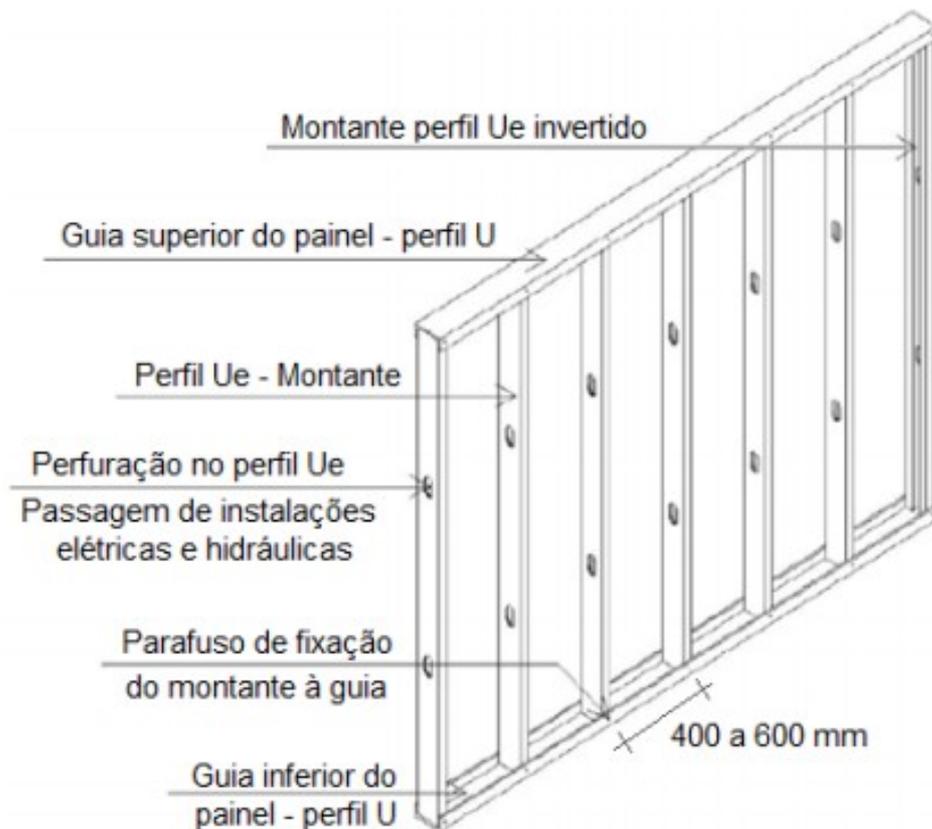


Figura 3 - Painel composto por montantes e guias no Sistema construtivo em Light Steel Framing (Fonte: CRASTO, 2006).

Vigas: as vigas compõem o entrepiso horizontalmente e têm suas mesas coincidentes às mesas dos montantes dos painéis, por tanto, seu espaçamento coincide com o espaçamento dos montantes, produzindo uma estrutura alinhada que

garante a predominância de esforços axiais nos elementos. Elas são dimensionadas ao momento fletor, ao cortante e à combinação cortante - momento fletor (vigas contínuas). Pode ser que aconteça a solicitação de compressão e tração ocasionadas pelo vento, para isso as vigas precisam ser travadas lateralmente por bloqueadores e fitas galvanizadas, instalados perpendicularmente à seção de modo similar aos montantes. Quando são utilizadas placas de piso com comprovado desempenho estrutural, a fita só precisa ser instalada na mesa inferior das vigas.

Fitas de Aço Galvanizado: trabalham somente à tração e são protendidas para garantir um bom funcionamento. Também são utilizadas para diminuir o comprimento de flambagem dos montantes dos painéis de parede, em conjunto com o bloqueador.



*Figura 4 - Fita metálica para travamento dos painéis do Sistema Light Steel Framing (Fonte: CRASTO, 2006).*

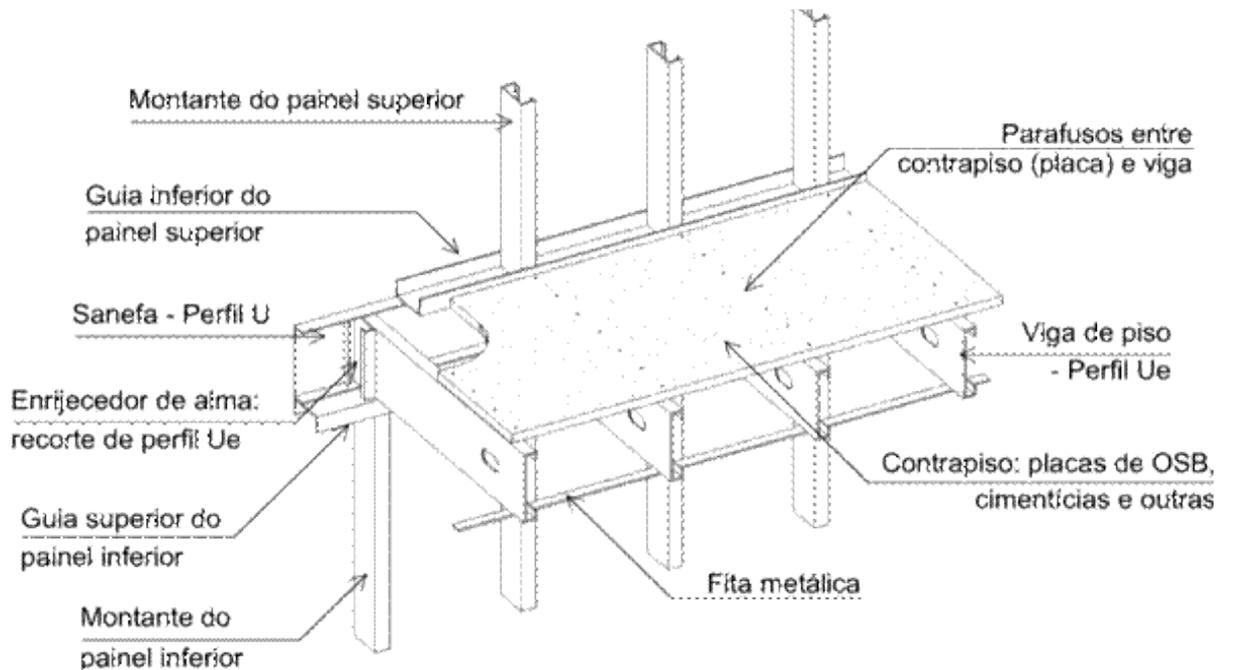


Figura 5 - Vigas de piso no Sistema construtivo em Light Steel Framing (Fonte: CRASTO, 2006).

Existem mais alguns elementos estruturais utilizados na concepção da estrutura como as ombreiras e vergas. Eles são utilizados nas aberturas de portas e janelas no painel para redistribuir as cargas dos montantes que foram interrompidos. As ombreiras são instaladas na vertical, delimitando o vão e suportando as vergas. Estas são colocadas horizontalmente sobre as aberturas para suportar a estrutura de entrepiso e/ou do painel do andar superior.

Assim, de acordo como descrito anteriormente, fundamenta-se esse sistema como sendo: estrutura “painelizada”, alinhada e modulada.

No Brasil, os perfis são considerados estruturais a partir de 0,91 mm de espessura e não estruturais a partir de 0,50 mm.

Além da espessura, a resistência de um perfil de aço depende da dimensão, forma e limite de elasticidade do aço. O limite de escoamento dos perfis de aço zincado, determinado de acordo com a norma NBR 6673, não deve ser inferior a 230 MPa (NAHB, 1996, p.10).

#### 4.2.5 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO SISTEMA

O sistema estrutural total de um edifício pode ser dividido em dois grupos de subsistemas, os verticais e os horizontais. Os subsistemas horizontais precisam ser suportados pelos subsistemas verticais. Ao mesmo tempo, os subsistemas verticais são geralmente esbeltos no tocante a uma ou ambas as dimensões da seção transversal (em relação à altura total do edifício), e não são muito estáveis por si próprios. Eles precisam ser mantidos em posição pelos subsistemas horizontais. Os subsistemas horizontais recebem e transmitem, para os subsistemas verticais, as cargas de piso e teto através da flexão e as cargas horizontais através da ação de diafragma (RODRIGUES, 2006).

Os painéis no sistema Light Steel Framing podem não só compor as paredes de uma edificação, como também funcionar como o sistema estrutural da mesma. Os painéis associados a elementos de vedação exercem a mesma função das paredes das construções convencionais (CRASTO, 2006).

Os painéis estruturais estão sujeitos a cargas horizontais de vento ou de abalos sísmicos, assim como a cargas verticais praticadas por pisos, telhados e outros painéis. Essas cargas verticais são originadas do peso próprio da estrutura e de componentes construtivos e da sobrecarga devido à utilização (pessoas, móveis, máquinas, águas pluviais, etc.). Por tanto, a função dos painéis é absorver esses esforços e transmiti-los à fundação (CRASTO, 2006).

De maneira geral, os montantes que compõe os painéis, transferem as cargas verticais por contato direto através de suas almas, estando suas seções em coincidência de um nível a outro, dando origem ao conceito de estrutura alinhada (CRASTO, 2006).

Tanto a disposição dos montantes dentro da estrutura como suas características geométricas e resistentes e os sistemas de fixação utilizados para a própria fabricação do painel, têm que estar aptos a absorver e transmitir as cargas verticais axiais – na direção do eixo da barra – e as cargas horizontais perpendiculares ao plano do painel. Para absorver as cargas horizontais paralelas ao plano do painel, devidas principalmente à ação do vento e sismos, é necessário prover à estrutura algum outro elemento capaz de resistir e transmitir tais esforços (RODRIGUES, 2006).

O método mais comum de estabilização da estrutura em LSF é o contraventamento em X, que consiste em utilizar fitas em aço galvanizado fixadas na face do painel, cuja largura, espessura e localização são determinadas pelo projeto estrutural (CRASTO, 2006).

O efeito diafragma em painéis de parede pode também ser obtido com o emprego de placas estruturais de OSB (RODRIGUES, 2006).

O OSB é um painel estrutural de tiras de madeira, geralmente provenientes de reflorestamento, orientadas em três camadas perpendiculares, o que aumenta sua resistência mecânica e rigidez. Essas tiras de madeira são unidas com resinas e prensadas sob alta temperatura (MASISA, 2003).

A estrutura em Steel Frame é muito leve, por isso, ela exige bem menos da fundação quando comparada a outras construções. Como os painéis distribuem as cargas uniformemente ao longo de sua seção, a fundação também precisa ser contínua, suportando toda a extensão dos painéis. A laje radier é a fundação mais comumente utilizada para construções em Light Steel Frame.

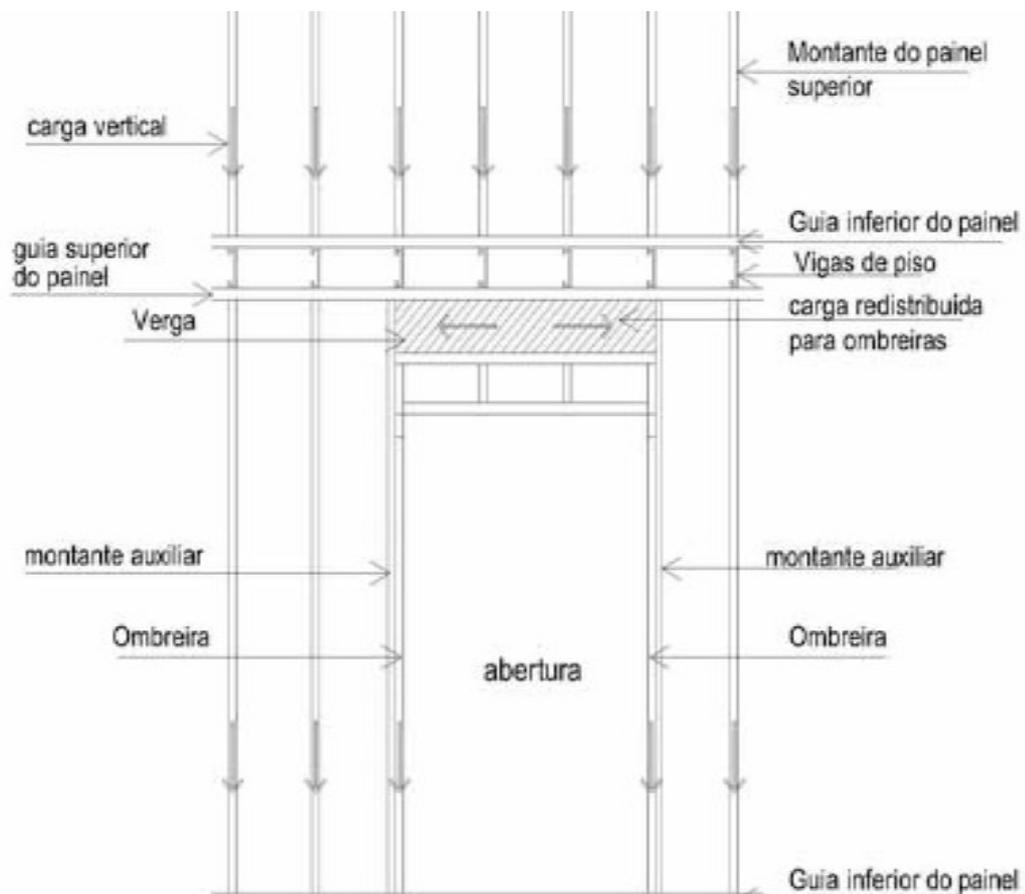


Figura 6 - Distribuição de esforços entre os painéis do Sistema Light Steel Framing (Fonte: CRASTO, 2006).

## 5. PERFIS FORMADOS A FRIO

### 5.1 APLICAÇÃO

O desenvolvimento da engenharia civil aliado à industrialização no processo construtivo torna a utilização dos perfis formados a frio extremamente viável. Também conhecidos por perfis leves, ou ainda perfis de chapa dobrada, mobilizam grande versatilidade, e podem ser usados de maneira eficaz em diversas aplicações onde a utilização de perfis de aço laminados ou soldados não é econômica.

As seções mais comuns nas edificações em LSF são as com formato “U” enrijecido (“Ue”) para montantes e vigas e o “U” usado como guia na base e no topo dos painéis. As dimensões da alma dos perfis “Ue” geralmente variam de 90mm a 300mm, sendo possível a utilização de outras dimensões. Os perfis “U” apresentam largura de alma maior do que a do perfil “Ue”, a fim de permitir o encaixe deste no perfil “U”. No Brasil as dimensões comercializadas são 90mm, 140mm e 200mm para a alma e as mesas podem variar de 35mm a 40mm, dependendo do fabricante e do tipo de perfil.

Tabela 1 - Designações dos perfis de aço formados a frio para uso em Light Steel Framing e suas respectivas aplicações (Fonte NBR15253:2005).

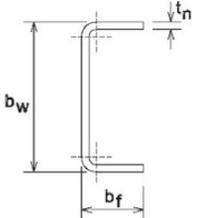
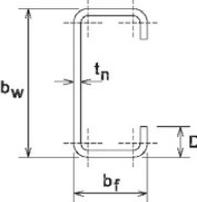
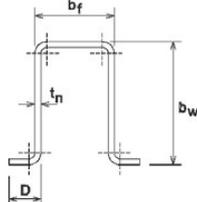
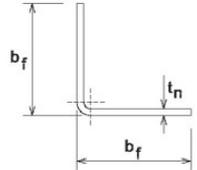
SEÇÃO TRANSVERSAL	SÉRIE Designação NBR 6355:2003	Utilização
	<p>U simples</p> <p>U <math>b_w \times b_f \times t_n</math></p>	<p>Guia</p> <p>Ripa</p> <p>Bloqueador</p> <p>Sanefa</p>
	<p>U enrijecido</p> <p>Ue <math>b_w \times b_f \times D \times t_n</math></p>	<p>Bloqueador</p> <p>Enrijecedor de alma</p> <p>Montante</p> <p>Verga</p> <p>Viga</p>
	<p>Cartola</p> <p>Cr <math>b_w \times b_f \times D \times t_n</math></p>	<p>Ripa</p>
	<p>Cantoneira de abas desiguais</p> <p>L <math>b_{f1} \times b_{f2} \times t_n</math></p>	<p>Cantoneira</p>

Tabela 2 - Dimensões nominais usuais dos perfis de aço para Light Steel Framing (Fonte NBR15253:2005).

DIMENSÕES (mm)	DESIGNAÇÃO (mm)	LARGURA DA ALMA bw (mm)	LARGURA DA MESA bf (mm)	LARGURA DO ENRIJECEDOR DE BORDA - D(mm)
Ue 90x40	Montante	90	40	12
Ue 140x40	Montante	140	40	12
Ue 200x40	Montante	200	40	12
Ue 250x40	Montante	250	40	12
Ue 300x40	Montante	300	40	12
U 90x40	Guia	92	38	-
U 140x40	Guia	142	38	-
U 200x40	Guia	202	38	-
U 250x40	Guia	252	38	-
U 300x40	Guia	302	38	-
L 150x40	Cantoneiras de abas desiguais	150	40	-
L 200x40	Cantoneiras de abas desiguais	200	40	-
L 250x40	Cantoneiras de abas desiguais	250	40	-
Cr 20x30	Cartola	30	20	12

## 5.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

São conhecidos dois processos de fabricação dos PFF: contínuo e descontínuo. Por essas operações ocorrerem com o aço em temperatura ambiente, advém o termo “formados a frio”.

O processo contínuo, quando se demanda da fabricação em série, é realizado a partir do deslocamento longitudinal de tiras de aço cortadas, chapas ou bobinas laminadas sobre roletes de uma linha de perfilação. Os roletes conferem gradativamente à chapa, a forma final do perfil. Assim que o perfil deixa a linha de perfilação, é cortado no comprimento indicado conforme projeto.



*Figura 7 - Máquina perfiladeira (Fonte: ZHONGYUON).*

O processo descontínuo é voltado à produção de perfis em pequena escala, realizado mediante o emprego de uma dobradeira. A matriz da dobradeira é prensada contra a chapa de aço, forçando-a a criar uma dobra. Após algumas operações similares a essa, sobre a mesma chapa, é conferida a seção do perfil conforme exigências de projeto. O comprimento do perfil fica limitado à largura da prensa.



*Figura 8 – Dobradeira (Fonte: VEGA MÁQUINAS).*

O processo contínuo é utilizado por fabricantes especializados em perfis formados a frio e o processo descontínuo é geralmente utilizado pelos fabricantes de estruturas metálicas.

### 5.3 AÇO GALVANIZADO

A NBR 14762:2001 “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento” recomenda o uso de aços com qualificação estrutural e que possuam propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. Devem apresentar a relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento  $f_u/f_y$  maior ou igual a 1,08, o alongamento após ruptura não deve ser menor que 10% para base de medida igual a 50 mm ou 7% para base de medida igual a 200 mm, tomando-se como referência os ensaios de tração conforme ASTM A370.

A utilização de aços sem qualificação estrutural para perfil é tolerada se o aço possuir propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. Não devem ser adotados no projeto valores superiores a 180MPa e 300MPa para a resistência ao escoamento ( $f_y$ ) e resistência à ruptura ( $f_u$ ), respectivamente.

### 5.4 EFEITOS DO PROCESSO PRODUTIVO NAS PROPRIEDADES DO PERFIL

O processo de dobramento de uma chapa por perfilação ou através da utilização de dobradeira, leva ao fenômeno conhecido como envelhecimento do aço (carregamento até a zona plástica, descarregamento, e posterior, porém não imediato, carregamento), um aumento da resistência ao escoamento ( $f_y$ ) e da resistência à ruptura ( $f_u$ ), com conseqüente redução de ductilidade, isto é, o diagrama tensão versus deformação sofre uma elevação na direção das resistências limites, acompanhado de um estreitamento no patamar de escoamento. A redução de ductilidade leva o material a uma menor capacidade de se deformar, motivo pelo qual a chapa deve ser conformada com o raio de dobramento compatível ao material e espessura, evitando assim o aparecimento de fissuras.

No processo descontínuo, o aumento das resistências ao escoamento e à ruptura se concentra na região das curvas, pois somente esta região está sob carregamento. No processo contínuo esse acréscimo abrange maiores regiões do perfil, pois toda a parte do perfil entre roletes da linha de perfilação está sob tensão.

O cálculo das características geométricas dos perfis formados a frio deve ser realizado criteriosamente, pois a existência da curva ao invés do ângulo reto das dobras faz com que os valores das características geométricas (área, momento de inércia, módulo resistente etc.) possam ser, dependendo das dimensões da seção, sensivelmente reduzidos. Por outro lado, a variação das dimensões da seção devido à estricção ocorrida na chapa quando dobrada, pode ser desconsiderada para efeito de dimensionamento.

## 5.5 PADRONIZAÇÃO DOS PERFIS FORMADOS A FRIO

A Norma NBR 6355:2012 – Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio, padroniza uma série de perfis formados com chapas de espessuras entre 1,50mm a 4,75mm, indicando suas características geométricas, pesos e tolerâncias da fabricação.

A nomenclatura dos perfis também foi padronizada, sendo a designação dos nomes realizada da seguinte forma: tipo do perfil x dimensões dos lados x espessura, todas as dimensões são dadas em mm.

## 6. INSTABILIDADE DO PERFIL

Este capítulo apresentará os aspectos teóricos sobre a instabilidade dos perfis de seção aberta, os modos de flambagem local e global, que constituem a fundamentação teórica para o projeto e dimensionamento dos perfis.

O perfil de chapa dobrada está sujeito a modos de falha por instabilidade sob carregamentos usualmente menores que os que levam à plastificação total ou parcial de sua seção transversal.

A instabilidade do perfil pode ser classificada como sendo do tipo local ou global, podendo ocorrer simultaneamente. A ocorrência de um ou de outro tipo de instabilidade está condicionada às características geométricas dos perfis e às condições de vínculos e de carregamentos (JAVARONI, 1999).

Por exemplo, na flambagem local da mesa, um fenômeno da instabilidade local, a mesa comprimida, que é um elemento de chapa componente do perfil, sofre deslocamentos na direção normal ao seu plano. Porém, esta ocorrência não ocasiona o fim da capacidade resistente do perfil, pois ocorre a redistribuição das tensões, estabilizando a chapa.

Outro modo de instabilidade local, a instabilidade por distorção, envolve deslocamentos laterais e rotações das partes componente do perfil.

A flambagem lateral com torção, a flambagem por flexão e a flambagem por torção, são fenômenos da instabilidade global de um perfil.

Deve-se observar que os modos de instabilidade citados anteriormente, local e global, podem ocorrer simultaneamente, o que é tratado através do método da largura efetiva.

## 6.1 INSTABILIDADE LOCAL – FLAMBAGEM DE CHAPA

A seção transversal dos perfis é constituída por elementos de chapas finas com elevada relação largura/espessura, por isso é necessário que sejam verificados quanto à flambagem local.

Os elementos planos que constituem a seção do perfil nas estruturas de chapa dobradas podem deformar-se (flambar) localmente quando solicitados à compressão axial, à compressão com flexão, ao cisalhamento, etc. Diferentemente da flambagem de barra, a flambagem local não implica necessariamente no fim da capacidade portante do perfil, mas, apenas uma redução de sua rigidez global à deformação. (SILVA, 2008).

Isto acontece porque as chapas, ao contrário de elementos unidimensionais, não atingem o colapso quando a tensão de flambagem é alcançada. Os acréscimos de tensão são redistribuídos para as partes enrijecidas desta chapa. Este fenômeno é denominado “resistência pós-flambagem”.

Posto isso, o enrijecedor de extremidade, ou intermediário, é adicionado à borda livre para que a resistência do perfil seja aumentada, fornecendo um apoio longitudinal aos elementos comprimidos.

Sua capacidade resistente chegará ao limite somente quando as fibras mais comprimidas atingirem a resistência ao escoamento do aço. Isso significa que o correto dimensionamento desses elementos depende de uma análise não linear. Costuma-se substituí-la por expressões diretas, deduzidas a partir de teorias simplificadas e calibradas empiricamente. Atualmente, na norma brasileira para o dimensionamento de perfis formados a frio, NBR 14762:2001, é recomendado o método das larguras efetivas (SILVA, 2008).

### 6.1.1 FLAMBAGEM LOCAL DA MESA

A flambagem local da mesa pode ocorrer isoladamente junto à seção crítica ou ao longo de um comprimento grande, caso a incidência do esforço atuante se aproxime de uma distribuição uniforme ao longo do perfil. Nesse tipo de colapso por flambagem, o elemento estrutural (viga ou pilar) tende a manter seu eixo reto, enquanto que as placas comprimidas flambam formando ondas na direção longitudinal (SOUZA, 2006).

Neste caso, o elemento de chapa componente do perfil, a mesa comprimida, sofre deslocamentos na direção normal ao seu plano (JAVARONI, 1999).

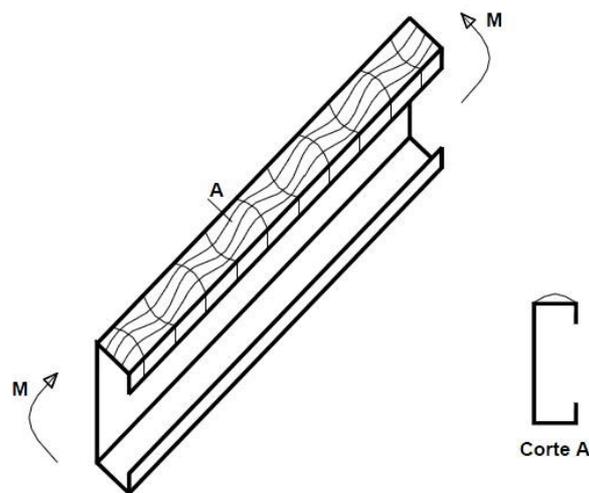


Figura 9 - Flambagem local da mesa (Fonte: JAVARONI,1999).

### 6.1.2 FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA (FLA)

A alma de uma viga é analisada como uma chapa retangular, em geral, apoiada nas bordas, sujeita às tensões normais devidas à flexão (JAVARONI, 1999).

## 6.2 INSTABILIDADE GLOBAL

A instabilidade global de um perfil de chapa dobrada pode ocorrer basicamente de três formas. A primeira, bastante comum em pilares esbeltos, ocorre em torno do eixo de menor inércia, a flambagem por flexão. A segunda forma dá-se pela rotação da seção transversal em torno de um eixo longitudinal, a flambagem por torção. Finalmente, a terceira forma, de maior complexidade, envolve uma combinação de flexão e flexo-torção, sendo caracterizada em vigas sem contenção lateral e, neste caso, denominada de flambagem lateral com torção (JAVARONI, 1999).

### 6.2.1 FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO (FLT)

Um elemento fletido, quando carregado no plano da alma pode, além de deslocar-se verticalmente, girar e sofrer deslocamentos horizontais, atingindo assim um estado limite último denominado como flambagem lateral com torção (FLT). Este ocorre sem que o elemento venha a desenvolver toda a sua resistência à flexão, com tensões inferiores à tensão característica do material (JAVARONI, 1999).

Os parâmetros estáticos e geométricos que influenciam a flambagem lateral com torção são: a rigidez à flexão e torção da seção transversal; a constante de empenamento; a posição do ponto de aplicação do carregamento em relação ao centro de cisalhamento; o comprimento lateralmente destravado da viga; o tipo de carregamento e as vinculações nos apoios (JAVARONI, 1999).

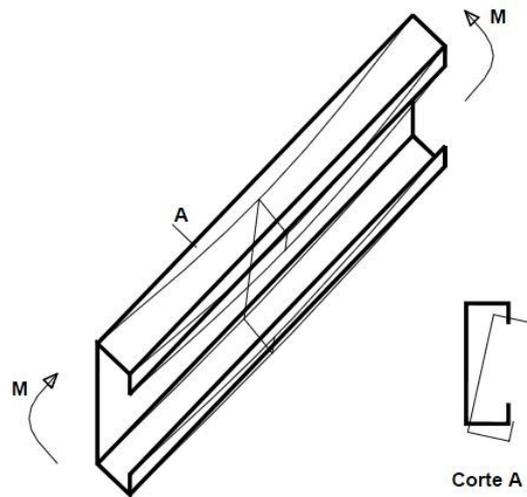


Figura 10 - Flambagem lateral com torção (Fonte: JAVARONI,1999).

### 6.3 INSTABILIDADE POR DISTORÇÃO

Para os elementos comprimidos a flambagem por distorção caracteriza-se por apresentar rotação de cada aba e enrijecedores em torno da junção alma e aba em direções opostas e translação ortogonal à alma. Quando submetidos à flexão, ocorre a flambagem da parte comprimida da alma juntamente com a aba, podendo ocorrer translação da seção na direção normal à alma (JAVARONI, 1999).

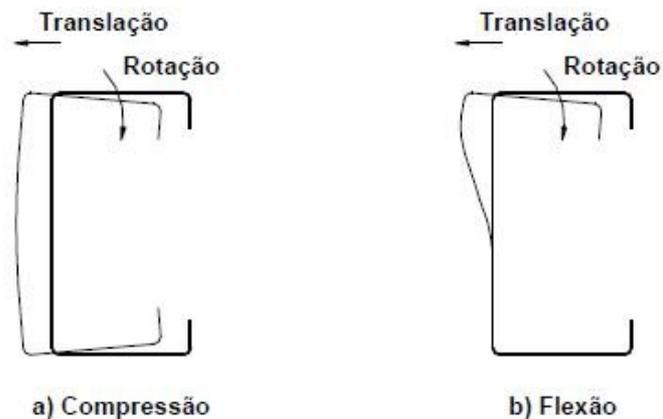


Figura 11 - Instabilidade por distorção (Fonte: JAVARONI, 1999).

O modo de instabilidade por distorção em elementos com enrijecedores de borda e com enrijecedores intermediários foi analisado por Desmond et al (1981a, 1981b). Nesses trabalhos o modo de instabilidade por distorção foi chamado de instabilidade do enrijecedor, onde a rigidez deste elemento não é suficiente para servir de 'apoio' à mesa do perfil.

### 6.3.1 FLAMBAGEM DISTORCIONAL

Um outro modo de instabilidade local que pode caracterizar a falha do perfil é aquele onde ocorre a distorção da seção transversal em seu próprio plano, envolvendo deslocamentos laterais e rotações das partes componentes do perfil (JAVARONI, 1999).

Uma característica que diferencia a flambagem local da distorcional é a deformada pós-crítica. Na flambagem por distorção a seção perde sua forma inicial, o que não ocorre na flambagem local (SILVA, 2008).

O modo de flambagem por distorção não é, usualmente, levado em consideração pelos projetistas como um estado limite no dimensionamento, apesar de ser previsto em várias especificações de projeto (JAVARONI, 1999).

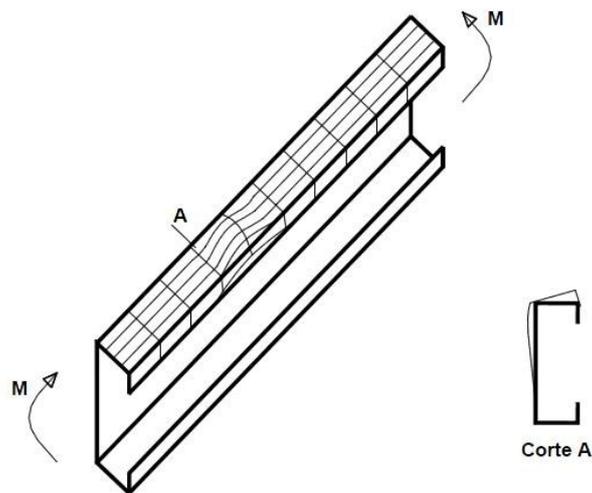


Figura 12 - Flambagem por distorção (Fonte: JAVARONI, 1999).

### 6.3.2 O MODELO DE HANCOCK

Em 1996, Hancock propôs uma curva de flambagem para a flexão, e que foi adotada pela norma AS/NZS 4600:1996. O próprio Hancock a modificou em 1997. Existem outras modificações apresentadas, como Lau & Hancock (1987,1990), apresentada em Rogers (1997), onde o ponto de inflexão da curva é diferente das outras duas curvas (CHODRAUI, 2007).

Este modelo simplificado dispensa a solução numérica que demandaria programas de computador.

Hancock idealizou um modelo de viga composto apenas pela mesa do perfil e do seu enrijecedor, submetido à compressão. A ligação da mesa com a alma é representada por dois apoios de molas, um para restringir à rotação e outro para restringir o deslocamento horizontal. Esse modelo procura considerar, de forma aproximada, a influência da alma sobre a mesa comprimida, por meio de coeficientes de mola  $k_\phi$  e  $k_x$ , respectivamente, à rotação e translação. É fácil notar que quanto mais esbelta for a alma (maior  $b_w/t$ ), menor serão os valores de  $k_\phi$  e  $k_x$  (SILVA, 2008).

A expressão analítica é obtida inicialmente para uma barra comprimida, e posteriormente alterada para barras fletidas. Esta alteração corresponde à uma modificação no coeficiente da mola rotacional (JAVARONI, 1999).

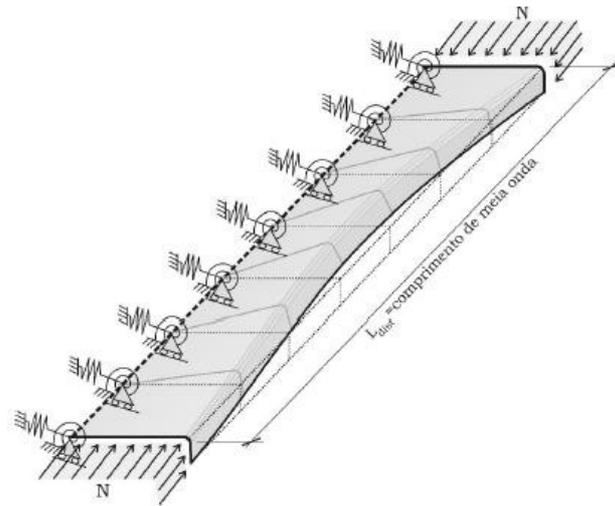


Figura 13 - Modelo simplificado proposto por Hancock e Lau (Fonte: JAVARONI,1999).

## 7. APLICAÇÃO DA ABNT NBR 14762:2010 AOS PERFIS FLETIDOS

A norma brasileira para dimensionamento de perfis estruturais de aço formados a frio ABNT NBR 14762:2010, prevê a determinação do momento fletor resistente de cálculo tomando o menor valor calculado para que não ocorra o início de escoamento da seção efetiva, a flambagem lateral com torção e a flambagem por distorção, quando aplicável, considerando o estado limite último e o estado limite de utilização.

### 7.1 MÉTODOS

Para determinação dos esforços resistentes, os princípios de cálculo baseiam-se em três métodos, como apresentados a seguir.

#### 7.1.1 MÉTODO DA LARGURA EFETIVA (MLE)

O método considera as seções que constituem o perfil como uma associação de chapas considerando o efeito da flambagem local em cada um dos elementos de forma isolada, resultando em um perfil com propriedades geométricas efetivas. A figura 14 mostra a largura de um elemento com borda vinculada (AA) e de um elemento com borda livre (AL).

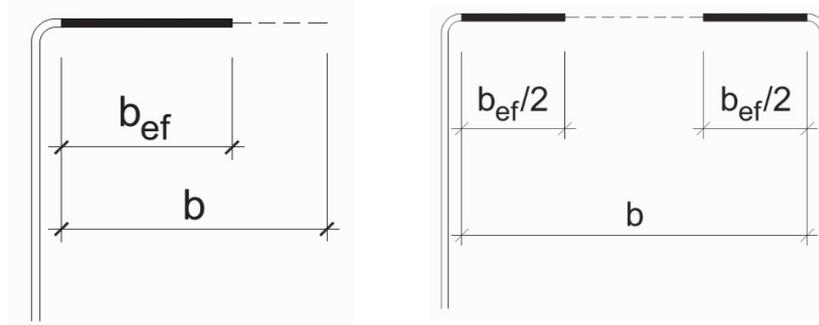


Figura 14 – Larguras efetivas dos elementos AL e AA (Fonte: ABNT NBR 14.762:2010)

A flambagem local é considerada por meio de propriedades geométricas efetivas (reduzidas) da seção transversal das barras, oriundas do cálculo das larguras efetivas dos elementos totalmente ou parcialmente comprimidos. Adicionalmente, deve ser considerada a verificação da flambagem distorcional para barras submetidas à flexão (ABNT, 2010).

A largura efetiva  $b_{ef}$  deve ser calculada conforme descrito a seguir:

#### 7.1.1.1 ELEMENTOS AA E AL

- Elementos AA e elementos AL comprimidos:

$$\text{para } \lambda_p \leq 0,673: \quad b_{ef} = b$$

$$\text{para } \lambda_p > 0,673: \quad b_{ef} = b \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p}$$

- Elementos AL com tensões de tração e compressão:

$$\text{para } \lambda_p \leq 0,673: \quad b_{ef} = b$$

$$\text{para } \lambda_p > 0,673: \quad b_{ef} = b_c \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p}$$

Onde:

$b$  é a largura do elemento;

$b_c$  é a largura da região comprimida do elemento, calculada com base na seção efetiva;

$\lambda_p$  é o índice de esbeltez reduzido do elemento, definido como:

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE/\sigma)^{0,5}}$$

Onde:

$t$  é a espessura do elemento;

$k$  é o coeficiente de flambagem local do elemento, calculado de acordo com as Tabelas 5 e 6 da norma ABNT NBR 14762:2010 para elementos AA e AL, respectivamente;

$E$  é o módulo de elasticidade do aço, definido igual a 200.000 MPa, segundo a norma ABNT NBR 14672:2010;

$\sigma$  é a tensão normal de compressão, definida como:

1. Estado-limite ultimo de escoamento da seção: Para cada elemento totalmente ou parcialmente comprimido,  $\sigma$  é a máxima tensão de compressão, calculada para a seção efetiva, que ocorre quando a seção atinge o início do escoamento.

2. Estado-limite último de instabilidade da barra: Quando submetida à flexão,  $\sigma = \chi_{FLT} f_y$ , sendo  $\chi_{FLT}$  o fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção, conforme 9.8.2.2 da norma ABNT NBR 14762:2010.

#### 7.1.1.2 ELEMENTOS UNIFORMEMENTE COMPRIMIDOS COM ENRIJECEDOR DE BORDA SIMPLES

$$\text{para } \lambda_p \leq 0,673: \quad b_{ef} = b$$

$$d_s = d_{ef}$$

$$\text{para } \lambda_p > 0,673: \quad b_{ef,1} = \left( \frac{I_s}{I_a} \right) \left( \frac{b_{ef}}{2} \right) \leq \left( \frac{b_{ef}}{2} \right)$$

$$b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$$

$$d_s = \left( \frac{I_s}{I_a} \right) d_{ef} \leq d_{ef}$$

Onde:

$$\lambda_{p0} = \frac{b/t}{0,623 \left( \frac{E}{\sigma} \right)^{0,5}} ;$$

$I_s$  é o momento de inércia da seção bruta do enrijecedor em relação ao eixo que passa pelo seu centroide e é paralelo ao elemento a ser enrijecido, dado por:

$$I_s = (t d^3 \operatorname{sen}^2 \theta) / 12 ;$$

$I_a$  é o momento de inércia de referência do enrijecedor de borda, dado por:

$$I_a = 399 t^4 (0,487 \lambda_{p0} - 0,328)^3 \leq t^4 (56 \lambda_{p0} + 5) ;$$

$\sigma$  é a tensão normal, como já definida em 7.1.1.1;

$b$  é a largura do elemento (figura 14);

$b_{ef}$  é a largura efetiva do elemento, calculada da mesma forma como 7.1.1.1, considerando  $\kappa$  como:

$$\text{para } D/b \leq 0,25: \quad k = 3,57 \left( \frac{I_s}{I_a} \right)^n + 0,43 \leq 4 \quad (\text{considerar } \frac{I_s}{I_a} \leq 1)$$

$$\text{para } 0,25 < D/b \leq 0,8: \quad k = \left( 4,82 - \frac{5D}{b} \right) \left( \frac{I_s}{I_a} \right)^n + 0,43 \leq 4$$

$$n = (0,582 - 0,122 \lambda_{p0}) \geq 1/3$$

$b_{ef,1}$  e  $b_{ef,2}$  são as parcelas da largura efetiva do elemento (figura 15);

$D$  é a dimensão nominal do enrijecedor de borda (figura 15);

$d$  é a largura do enrijecedor de borda (figura 15);

$d_{ef}$  é a largura efetiva do enrijecedor (figura 15) calculada conforme 7.1.1.1;

$d_s$  é a largura efetiva reduzida do enrijecedor (figura 15), adotada no cálculo das propriedades da seção efetiva do perfil;

$\theta$  é o ângulo formado pelo elemento e o enrijecedor de borda.

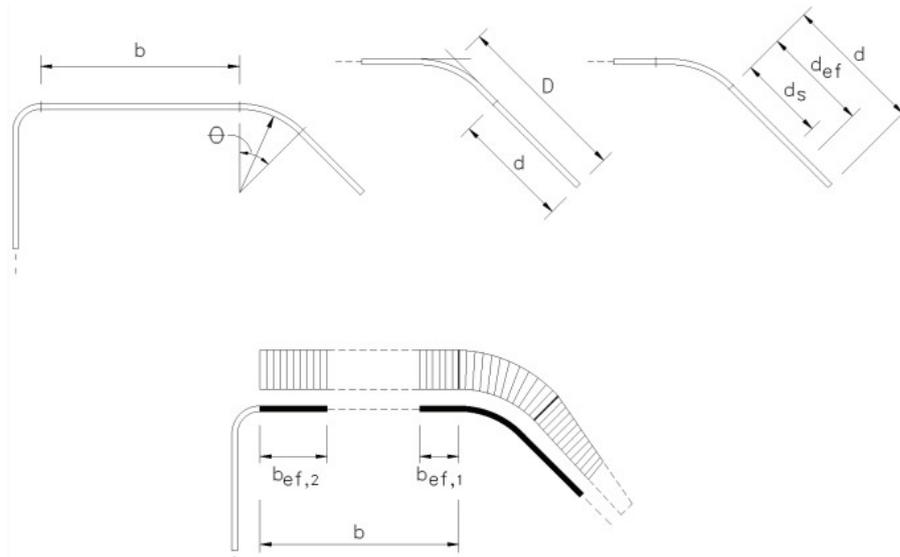


Figura 15 – Elemento uniformemente comprimido com enrijecedor de borda simples (Fonte: ABNT NBR 14.762:2010)

### 7.1.2 MÉTODO DA SEÇÃO EFETIVA (MSE)

A flambagem local é considerada por meio de propriedades geométricas efetivas (reduzidas) da seção transversal das barras, calculadas diretamente. Ainda deve ser considerada, quando aplicável, a verificação para flambagem distorcional (ABNT, 2010).

### 7.1.3 MÉTODO DA RESISTÊNCIA (MRD)

O método se baseia nas propriedades geométricas da seção bruta e em análise geral de estabilidade elástica que permita identificar, para o caso em análise, todos os modos de flambagem e seus respectivos esforços críticos (ABNT, 2010).

A adoção desse método pressupõe a análise baseada em recursos com base na teoria da estabilidade elástica. No caso dos outros métodos, as fórmulas permitem a obtenção de valores exatos dos momentos fletores de cálculo para cada tipo de instabilidade (ABNT, 2010).

Tal método foi proposto por (SCHAFER e PEKÖZ, 1998) como alternativa ao MLE na determinação da resistência de perfis formados a frio. Foi utilizado pela primeira vez por Hancock, (HANCOOK, KWON E BERNARD, 1994), para resolver o problema de flambagem distorcional de perfis de parede fina submetidos à compressão centrada ou flexão simples. Posteriormente Schafer (SCHAFER e PEKÖZ, 1998 e 2002), estenderam a aplicação deste método para barras fletidas ou comprimidas considerando a flambagem local, distorcional e global.

Esse método consiste basicamente em utilizar curvas de resistência ajustadas experimentalmente, para, a partir da força axial de flambagem elástica e considerando o perfil como uma unidade, calcular a força axial de colapso. Cabe salientar, neste caso, que os elementos que compõem o perfil trabalham de maneira conjunta, e não como elementos isolados.

## 7.2 ELEMENTOS SUBMETIDOS À FLEXÃO SIMPLES

O momento fletor resistente de cálculo ( $M_{Rd}$ ) deve ser adotado como o menor valor calculado de acordo com os itens 7.2.1, 7.2.2 e 7.2.3 a seguir.

### 7.2.1 INÍCIO DE ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma}$$

Onde:

$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço;

$\gamma$  é o coeficiente de ponderação, adotado igual a 1,1;

$W_{ef}$  é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento. Pode ser calculado com base:

a) no método da largura efetiva (MLE) conforme 7.1.1, considerando a tensão  $\sigma$  calculada para o estado limite ultimo de início de escoamento da seção efetiva;

b) no método da seção efetiva (MSE), conforme indicado a seguir:

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

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

$$\lambda_p = \left( \frac{W f_y}{M_l} \right)^{0,5}$$

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

$$M_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left( \frac{b_w}{t} \right)^2} W_c$$

$W$  é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento;

$W_c$  é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida.

Os valores do coeficiente de flambagem local para a seção completa,  $k_l$ , podem ser calculados pelas expressões indicadas na Figura 16.

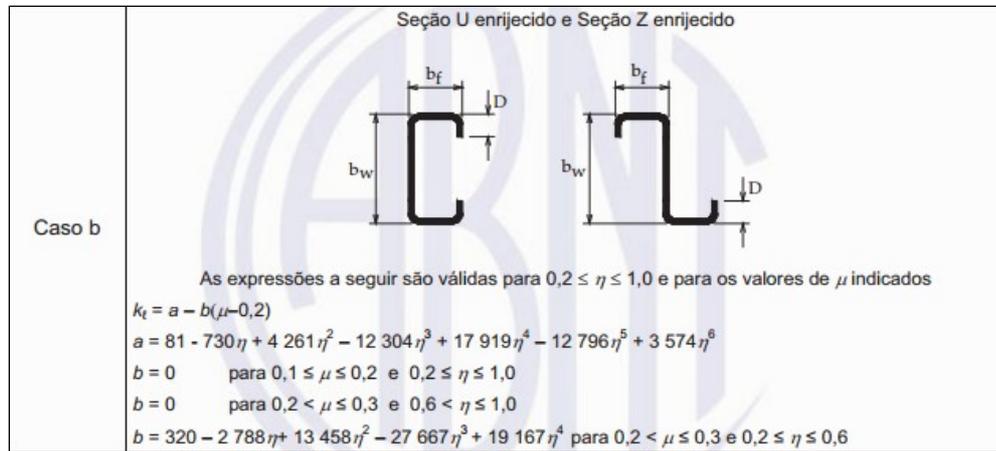


Figura 16 – Fórmulas para determinação do coeficiente de flambagem local para perfis do tipo U enrijecido e Z enrijecido. (Fonte: ABNT NBR 14.762:2010)

## 7.2.2 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:

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

Onde:

$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço;

$\gamma$  é o coeficiente de ponderação, adotado igual a 1,1;

$W_{c,ef}$  é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida, calculado com base:

a) no método da largura efetiva (MLE) conforme 5.1.1, adotando

$$\sigma = \chi_{FLT} f_y ;$$

b) no método da seção efetiva (MSE), conforme indicado a seguir:

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

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

Sendo:

$$\lambda_p = \left( \frac{\chi_{FLT} W f_y}{M_l} \right)^{0,5}$$

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

$$M_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left( \frac{b_w}{t} \right)^2} W_c$$

Os valores do coeficiente de flambagem local para a seção completa,  $k_l$ , podem ser calculados pelas expressões indicadas na Figura 16.

$\chi_{FLT}$  é o fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção, calculado por:

$$\text{para } \lambda_0 \leq 0,6 : \quad \chi_{FLT} = 1,0 ;$$

$$\text{para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336 \quad \chi_{FLT} = 1,11 \left( 1 - 0,278 \lambda_0^2 \right) ;$$

$$\text{para } \lambda_0 \geq 1,336 \quad \chi_{FLT} = \frac{1}{\lambda_0^2};$$

Sendo:

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5}$$

$W_c$  é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida;

$M_e$  é o momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, que pode ser calculado pelas expressões seguintes, deduzidas para carregamento aplicado na posição do centro de torção para barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica, sujeitas à flexão em torno do eixo de simetria (eixo x):

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5}$$

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

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

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

$M_A$  é o valor do 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;

$N_{ey}$  é o valor da força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal y, dado por:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E C_w}{L_y^2}$$

$N_{ez}$  é o valor da força axial de flambagem global elástica por torção, dada por:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{L_z^2} + GJ \right]$$

$G$  é o módulo de elasticidade transversal, adotado como 77 GPa, conforme ABNT NBR 14762:2012;

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

$L_y$  é o comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo y;

$L_z$  é o comprimento efetivo de flambagem global por torção;

### 7.2.3 FLAMBAGEM DISTORCIONAL

A tabela 3 indica as dimensões mínimas do enrijecedor de borda em relação a dimensão da alma ( $D/b_w$ ) de perfis Ue, de forma a dispensar as verificações por flambagem por distorção.

Tabela 3 - Limites para verificação da instabilidade por distorção (Fonte: ABNT NBR14762:2010).

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

Para as barras com seção transversal aberta sujeitas à flambagem distorcional, o momento fletor resistente de cálculo deve ser calculado pela seguinte expressão:

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} W f_y}{\gamma}$$

Onde:

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

$$\chi_{dist} = 1,0; \text{ para } \lambda_0 \leq 0,6 \quad 73$$

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

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{W f_y}{M_{dist}}\right)^{0,5} \quad \text{é o índice de esbeltez reduzido referente à}$$

flambagem distorcional;

$W$  é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento;

$M_{dist}$  é o momento fletor de flambagem distorcional elástica, o qual deve ser calculado através de softwares baseados na análise de estabilidade elástica através de método dos elementos finitos. Porém, para o presente trabalho será utilizado o método proposto pela ABNT NBR 14762:2001, versão anterior à utilizada, permitindo o uso de um método analítico simplificado, conforme descrito a seguir.

### 7.2.3.1 MOMENTO FLETOR DE FLAMBAGEM DISTORCIONAL ELÁSTICA

O anexo D da NBR 14762:2001 utiliza o método simplificado proposto por Hancock, para calcular a força crítica de flambagem por distorção dos perfis formados a frio. Esse modelo simplificado dispensa a solução através de softwares complexos.

Hancock idealizou um modelo de viga composto apenas pela mesa do perfil e do seu enrijecedor, submetido à compressão. A ligação da mesa com a alma é representada por dois apoios de molas, um para restringir à rotação e outro para restringir o deslocamento horizontal. Esse modelo procura considerar, de forma aproximada, a influência da alma sobre a mesa comprimida, por meio de coeficientes de mola, à rotação e translação.

A partir desse modelo matemático, com algumas simplificações, é possível determinar a tensão crítica de distorção do perfil e, conseqüentemente, a força normal e o momento fletor críticos.

Dessa forma, para barras com seção transversal aberta sujeitas a flambagem por distorção, o momento fletor de flambagem distorcional elástica ( $M_{dist}$ ) é calculado como indicado a seguir.

$$\text{para } \lambda_{dist} < 1,414 \quad M_{dist} = W_c f_y (1 - 0,25 \lambda_{dist}^2)$$

$$\text{para } \lambda_{dist} \geq 1,414 \quad M_{dist} = \frac{W_c f_y}{\lambda_{dist}^2}$$

Onde:

$W_c$  é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida;

$\lambda_{dist}$  é o índice de esbeltez reduzido referente à flambagem por distorção, dado por:

$$\lambda_{dist} = \left( \frac{f_y}{\sigma_{dist}} \right)^{0,5}$$

$\sigma_{dist}$  é a tensão convencional de flambagem elástica por distorção, calculada como descrito a seguir:

$$\sigma_{dist} = \left( \frac{0,5 E}{A_d} \right) \{ \alpha_1 + \alpha_2 - [(\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4 \alpha_3]^{0,5} \}$$

Onde:

$$\alpha_1 = \left( \frac{\eta}{\beta_1} \right) \left( \beta_2 + 0,039 I_t L_d^2 \right) + \frac{k_\phi}{\beta_1 \eta E}$$

$$\alpha_2 = \eta \left( I_y - \frac{2 y_0 \beta_3}{\beta_1} \right)$$

$$\alpha_3 = \eta \left( \alpha_1 I_y - \frac{\eta \beta_3^2}{\beta_1} \right)$$

$$\beta_1 = h_x^2 + \frac{I_x + I_y}{A_d}$$

$$\beta_2 = I_x b_f^2$$

$$\beta_3 = I_{xy} b_f$$

$$\beta_4 = \beta_2 = I_x b_f^2$$

$$\eta = \left( \frac{\pi}{L_d} \right)^2$$

$$L_d = 4,8 \left( \frac{0,5 I_x b_f^2 b_w}{t^3} \right)^{0,25}$$

$$k_\phi = \frac{E t^3}{2,73 (b_w + 0,006 L_d)} \left[ 1 - \frac{1,11 \sigma_{dist}}{E t^2} \left( \frac{b_w^4 L_d^2}{12,56 L_d^4 + 2,192 b_w^4 + 13,39 L_d^2 b_w^2} \right) \right]$$

Pode-se notar que o coeficiente da mola à rotação ( $k_\phi$ ) depende do valor da tensão no qual a alma está solicitada. Quanto maior for essa tensão, menor será a restrição que ela poderá oferecer para a mesa. Dessa forma, é necessário fazer uma iteração para a obtenção da tensão crítica de flambagem por distorção.

Admite-se inicialmente, que  $k_\phi = 0$  e obtém-se  $\sigma_{dist}$ . Com a primeira tensão crítica encontrada, calcula-se o  $k_\phi$  e, finalmente, calcula-se  $\sigma_{dist}$

definitivo admitindo, desta vez, a contribuição da rigidez a rotação que a alma exerce sobre a mesa.

É importante ressaltar que as propriedades geométricas do modelo estudado,  $A_d$ ,  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I_{xy}$ ,  $I_t$ ,  $h_x$  e  $h_y$ , devem ser calculadas para a seção transversal composta apenas pela mesa e pelo enrijecedor de borda da seção, como ilustra a Error: Reference source not found

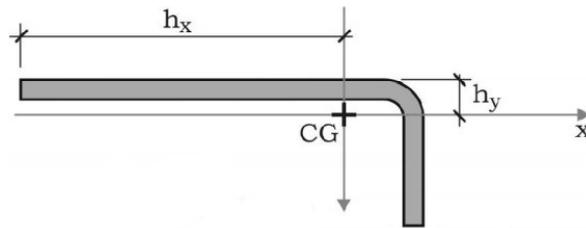


Figura 17 - Seção considerada para determinação da instabilidade por distorção

Outro fator que deve ser observado na análise de flambagem por distorção é o limite de validade das expressões normatizadas, ou seja,  $0,4 \leq b_f/b_w \leq 2,0$ . Essa limitação se deve à calibração da equação para o cálculo de  $k_\phi$ . Para perfis fora dessa faixa é necessário empregar métodos mais precisos.

## 8. METODOLOGIA

### 8.1 INTRODUÇÃO

O seguinte capítulo tem o objetivo de apresentar os métodos aplicados nos estudos realizados com os perfis tipo “U” enrijecido (Ue) submetidos à flexão. Os perfis foram biapoiados, com travamentos laterais nos apoios e em dois pontos intermediários, submetidos a esforços concentrados.

No Brasil há pouca informação quanto a programas experimentais com os perfis de aço formados a frio, ao contrário do que se vê em países da América do Norte e Europa. A necessidade em se dispor desses e o interesse dos fabricantes

quanto ao comportamento desses elementos levou à realização deste programa experimental.

Procurou-se então obter resultados experimentais referentes aos modos de falha por diferentes tipos de flambagem, característicos para os perfis, especificamente nos perfis tipo “U” enrijecido, largamente empregados. Os resultados do comportamento desses perfis sob a ação de forças transversais foram comparados com as verificações prescritas na NBR 14762 (ABNT, 2010) para tal situação.

As avaliações foram realizadas no Laboratório de Materiais e Estruturas dos Institutos Lactec, localizado no campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná.

## 8.2 PERFIS UTILIZADOS

Os perfis tipo “U” enrijecido avaliados foram conformados pelo processo contínuo de perfilação, como pode ser visto nas figuras 18 e 19. A ideia foi comparar algumas seções transversais, observando a influência da variação da altura da alma e de diferentes espessuras de chapa na estabilidade dos perfis ao esforço de flexão.

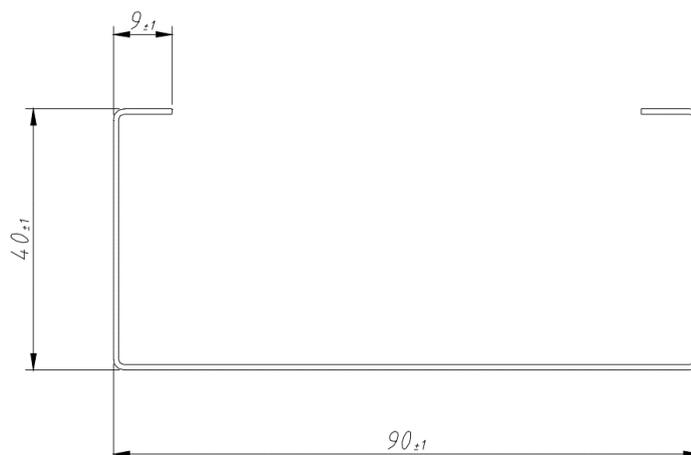


Figura 18 - Perfil Ue 90x40x9, com espessuras de chapa de 0,80mm e 0,95mm (Fonte: BARBIERI DO BRASIL).

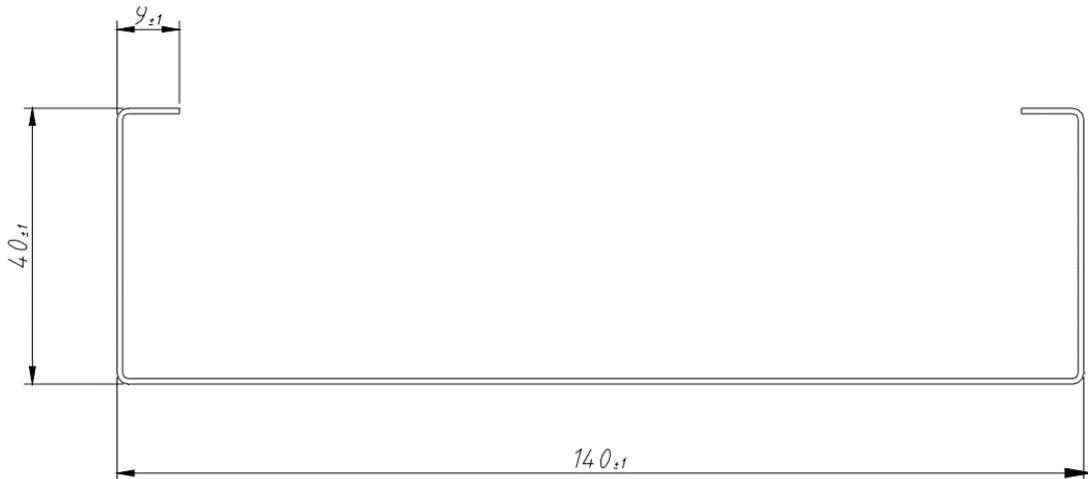


Figura 19 – Perfil Ue140x40x9, com espessuras de chapa de 0,80mm e 0,95mm (Fonte: BARBIERI DO BRASIL).

As peças utilizadas no presente trabalho foram obtidas com a Barbieri do Brasil, fabricante de perfis metálicos para LSF e Drywall.

Foram fornecidos perfis com comprimentos de 2,70m para o perfil Ue 90x40x9x0,95 e 3,0m para os perfis Ue 90x40x9x0,8, Ue 140x40x9x0,8 e Ue 140x40x9x0,95, representando alturas usuais. As propriedades geométricas e os respectivos comprimentos das peças utilizadas estão apresentados na tabela 4, a seguir. Tais informações se referem às dimensões nominais da seção transversal.

Tabela 4 – Propriedades geométricas dos perfis analisados

Perfil	A (cm <sup>2</sup> )	I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>t</sub> (cm <sup>4</sup> )	x <sub>g</sub> (cm)	r <sub>0</sub> (cm)	C <sub>w</sub> (cm <sup>6</sup> )
Ue 90x40x9x0,80	1,462	19,155	3,134	0,003	1,228	4,918	51,437
Ue 90x40x9x0,95	1,727	22,51	3,659	0,005	1,227	4,897	60,034
Ue 140x40x9x0,80	1,862	53,574	3,577	0,004	0,973	6,082	136,306
Ue 140x40x9x0,95	2,202	63,086	4,177	0,007	0,972	6,063	159,421

### 8.3 MÉTODOLOGIA DE ENSAIO

Os ensaios experimentais foram divididos em 12 conjuntos de perfis formados a frio. Os 12 conjuntos representam 4 séries de perfis com características de seção transversal diferente. Assim, analisou-se a variação de alguns elementos para verificação do comportamento em relação aos modos de instabilidade. Cada modelo de perfil foi submetido a ensaio em três corpos de prova, avaliando dessa forma a discrepância de resultados entre as amostras.

As amostras foram submetidas à condição de carregamento em dois dos pontos de travamento lateral, nos terços médios do vão, através de um perfil rígido do tipo “U”, conforme ilustrado na figura 20, a seguir.

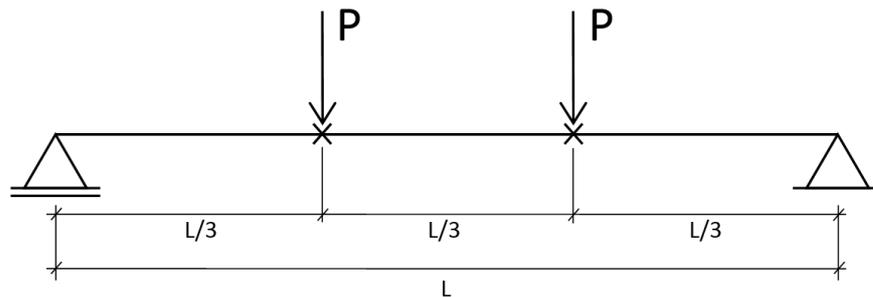


Figura 20 – Esquema de carregamento dos perfis, sendo  $L=2,7$  m para os perfis Ue90x40x9x0,95 e  $L=3,0$  m para os demais perfis.

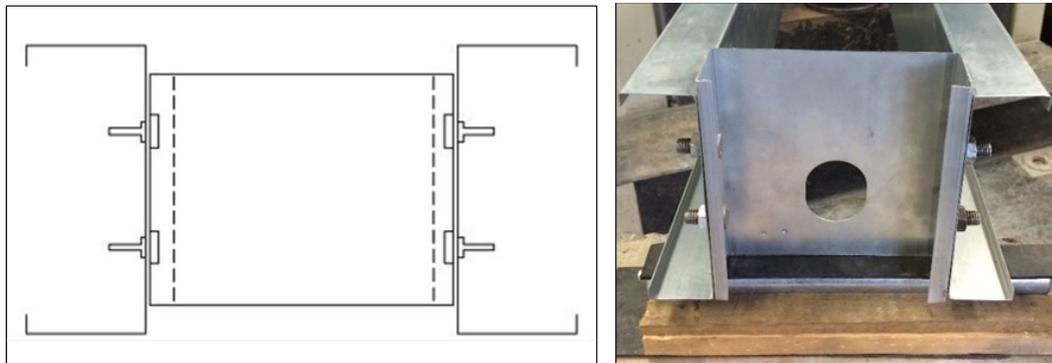
O vão foi definido levando-se em conta o comprimento usual de pé-direito utilizado e os carregamentos e travamentos laterais foram escolhidos prevendo-se os modos de falha de flambagem local e flambagem global para os perfis de aço formados a frio sujeitos à flexão.

Foram posicionados blocos de reação rígidos de concreto biapoiando as peças sobre roletes de aço com diâmetro de 25mm, de forma a caracterizar um apoio rotulado (figura 21). Em cada ponto de contato dos apoios das peças, foi posicionado um tarugo de madeira e uma fita de borracha Neoprene®, a fim de absorver as irregularidades presentes nos blocos de concreto e das próprias peças, aplicando as forças de maneira uniforme.



*Figura 21 – Detalhe do apoio rotulado*

Os travamentos laterais intermediários e nos apoios foram obtidos através da ligação dos perfis aos pares. Para tal travamento foram utilizados trechos do perfil Ue 140x40x9x0,95, parafusados na alma dos perfis ensaiados, como pode ser visto na figura 22.



*Figura 22 - Esquema de travamento dos perfis ensaiados*

Dessa forma, o programa experimental compreendeu um total de 24 perfis ensaiados.

A carga foi aplicada através de uma prensa universal de ensaios modelo DC, marca EMIC, com capacidade de carga de 30 tf, com última calibração realizada em 29/09/2014 e acionada através de comando automático.

Criou-se um procedimento de ensaio adotando a velocidade de carregamento através do deslocamento da coluna da prensa de 0,1 mm/s, com o

intuito de aplicar a força de forma lenta e gradual, livrando os perfis de quaisquer esforços dinâmicos. Adotou-se como critério de parada para o fim de ensaio o colapso de 30% da carga, ou seja, quando a prensa verificar uma queda brusca de 30% da força aplicada, o ensaio é abortado.

Todas as leituras de força aplicada e os deslocamentos verticais ao longo do vão foram registradas automaticamente por meio do sistema operacional da prensa, gerando um arquivo “txt” ao fim de cada ensaio, permitindo o tratamento dos dados.

#### 8.4 METODOLOGIA DE CÁLCULO

Para o cálculo dos esforços resistentes nas peças avaliadas, foi utilizado o método da seção efetiva (MSE), prescrito na ABNT NBR 14762:2010 conforme descrito no capítulo 7.

Como parâmetros de material, em todas as peças estudadas foi empregado aço estrutural com módulo de elasticidade longitudinal ( $E$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e módulo de elasticidade transversal conforme prescrito na ABNT NBR 14762:2010 e descrito nos procedimentos de cálculo conforme capítulo 7, além da resistência ao escoamento do aço ( $f_y$ ) igual a 250 MPa, conforme fornecido pelo fabricante das peças.

Para cálculo das propriedades geométricas das seções em estudo, foi utilizada a versão trial do software ShapeBuilder 7.0, disponível para download em <http://www.iesweb.com/downloads/index.htm>. O software permite facilmente a criação e personalização de seções transversais, fornecendo propriedades geométricas avançadas, de difícil obtenção manual.

Um exemplo de seção transversal analisado pelo ShapeBuilder pode ser visto na Figura 23. As medidas de seção são facilmente personalizadas pelo usuário e o painel à direita apresenta as propriedades geométricas da seção.

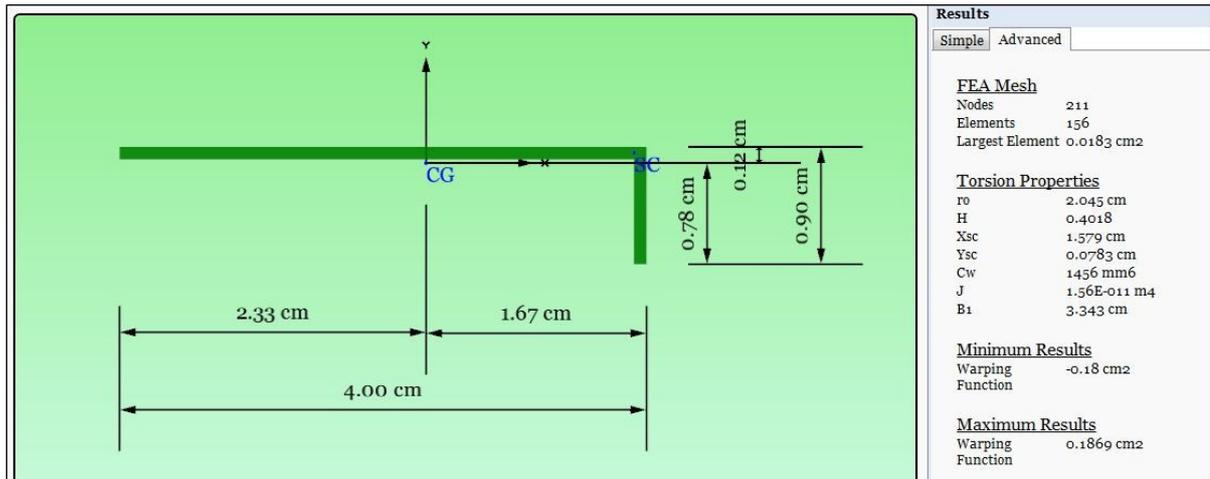


Figura 23 – Uso do ShapeBuilder para determinação de propriedades avançadas da seção transversal em estudo.

## 9. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 9.1 PERFIS ENSAIADOS

Os resultados experimentais obtidos estão apresentados na Tabela 5. Apresentam-se a identificação dos conjuntos, os tipos de perfis, o deslocamento máximo no meio do os valores individuais e médios de momentos fletores últimos experimentais.

Tabela 5 - Resultados obtidos nos perfis submetidos à flexão

Perfil	Corpo de Prova	M <sub>ENSAIO</sub> (KN.m)	Média (KN.m)	Desl. máximo (mm)	Tipo de instabilidade
Ue 90x40x9x0,80	1	0,78	0,80	33,07	FLM
	2	0,78		36,48	

	3	0,84		33,41	FLM
	1	1,21		30,37	FLM
Ue 90x40x9x0,95	2	1,20	1,19	29,79	FLM
	3	1,17		28,34	FLM
	1	1,35		26,8	FLM
Ue 140x40x9x0,80	2	1,44	1,38	26,14	FLM
	3	1,35		26,52	FLM
	1	2,00		30,27	FLM
Ue 140x40x9x0,95	2	1,80	1,90	28,09	FLM
	3	-		-	-

NOTA: o corpo de prova 3 do conjunto Ue 140x40x9x0,95 não foi ensaiado devido à verificação de um dano localizado, provavelmente ocasionada no transporte das peças, impossibilitando a realização do ensaio.

Em geral, como pode ser observado na Tabela 5, não existiram resultados discrepantes dentro das séries. A similaridade dos resultados obtidas nos conjuntos das séries indicaram satisfatória condução dos ensaios realizados e o comportamento constante do material sob as condições submetidas durante os ensaios. Por esta razão, os momentos últimos apresentados referem-se aos valores médios dos resultados observados para as três amostras dos conjuntos avaliados.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5, podemos observar que as resistências médias dos perfis houve um acréscimo de 48,8% com o aumento da espessura de chapa de 0,80 mm para 0,95 mm. Para os casos dos perfis Ue 140x40x9x0,8 e Ue 140x40x9x0,95, o mesmo aumento de espessura de chapa proporcionou um incremento de 37,7% de resistência quando submetidos à flexão.

O aumento de altura da alma, de 90 mm para 140 mm nos respectivos conjuntos avaliados com espessura de chapa de 0,8 mm, gerou um aumento da resistência à instabilidade de 72,5%. Para os conjuntos com espessuras de chapa de 0,95 mm, o aumento de altura da alma gerou um incremento de 59,7%.

Nestes casos, podemos notar que as simples modificações das propriedades geométricas das seções analisadas promoveu um aumento considerável na resistência final dos conjuntos quando submetidos à flexão simples.

Tratando-se dos resultados experimentais obtidos em relação aos estados limites últimos, verificou-se que todos os conjuntos tiveram deslocamentos consideráveis e o tipo de instabilidade gerado foi a flambagem local da mesa, possivelmente associado à distorção.

O posicionamento do modo de instabilidade/ruína ocorrido foi observado em duas localidades distintas. Os dois modos ocorreram nas regiões dos travamentos centrais e no meio do vão da viga. A figura 24 ilustra o modo de instabilidade ocorrido no meio do vão e a figura 25 ilustra a instabilidade verificada na região de aplicação do carregamento (travamentos intermediários).



*Figura 24- Instabilidade ocorrida no meio do vão*



*Figura 25- Instabilidade ocorrida no travamento intermediário*

As instabilidades ocorridas nos pontos de aplicação de carregamento, travados lateralmente, podem ser explicadas pelo fato de que, nos pontos lateralmente travados, a rotação é impedida e tensões adicionais são introduzidas pelas forças impostas por esses travamentos. Dessa forma, a flambagem por distorção da seção transversal ocorre devido ao aumento da tensão de compressão no enrijecedor.

Tal fato indica que os travamentos laterais, em número e localização, podem alterar o comportamento do perfil, inclusive alternando o modo de falha previsto, assim como foi constatado por Javaroni (1999).

Os principais resultados obtidos nos ensaios estão apresentados sobre forma de gráficos, relacionando a força aplicada contra deslocamentos medidos no meio do vão.

A Figura 26 apresenta o gráfico referente ao primeiro ensaio desenvolvido. Nele pode-se observar os deslocamentos verticais ocorridos no vão central do conjunto submetido a ensaio. As amostras ensaiadas tratam-se de perfil do tipo Ue 90x40x9x0,8.

A partir da Figura 26 nota-se que após a ocorrência da instabilidade, é verificada uma certa reserva de resistência do conjunto. Sabe-se que a ocorrência da flambagem local não ocasiona, em geral, o fim da capacidade resistente do perfil. Quando excedida a carga crítica da chapa ocorre uma redistribuição das tensões

atuantes, possivelmente devido aos enrijecedores de borda, produzindo efeito estabilizante na chapa. Essa reserva pós-crítica é identificada pelos patamares finais do gráfico.

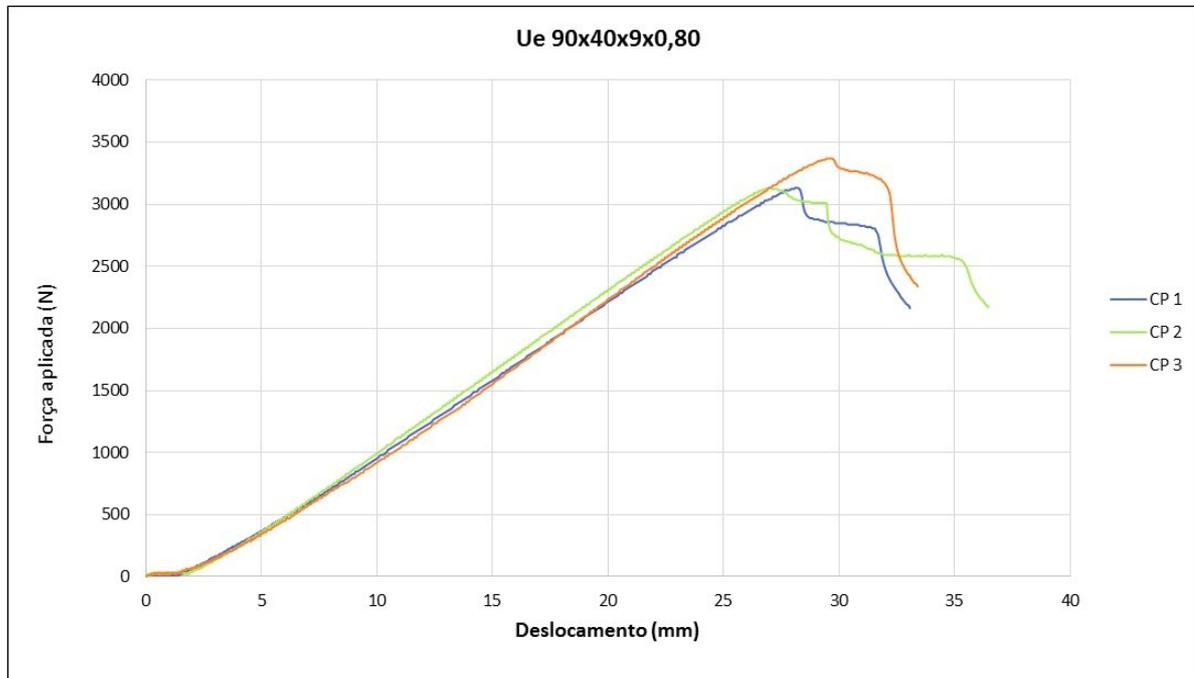


Figura 26 – Força x deformação do conjunto. Perfil: Ue 90x40x9x0,80

A Figura 27 apresenta o gráfico referente ao primeiro ensaio realizado nos perfis do tipo Ue 90x40x9x0,8. Diante da execução dos ensaios para essa série de perfis pode-se observar que o modo de instabilidade ocorrido não apresentou prévio aviso de ruína, praticamente sem nenhuma reserva de resistência, cessando o carregamento abruptamente, caracterizado pelo colapso do trecho linear das curvas representativas do ensaio.

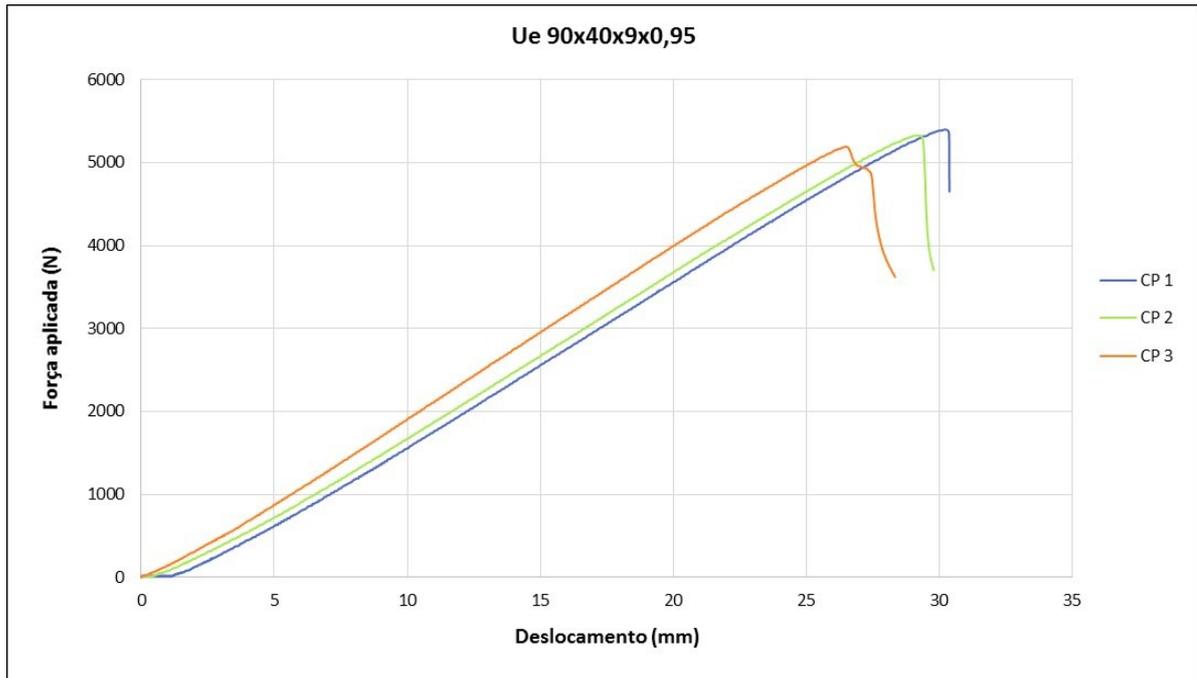


Figura 27 - Força x deformação do conjunto. Perfil: Ue 90x40x9x0,95

Da mesma forma, como representado na Figura 28 a seguir, os conjuntos de perfil Ue 140x40x9x0,8 não apresentaram um comportamento pós-crítico visível. Essa série se caracterizou pelos menores deslocamentos verticais do centro do vão, comparadas às demais.

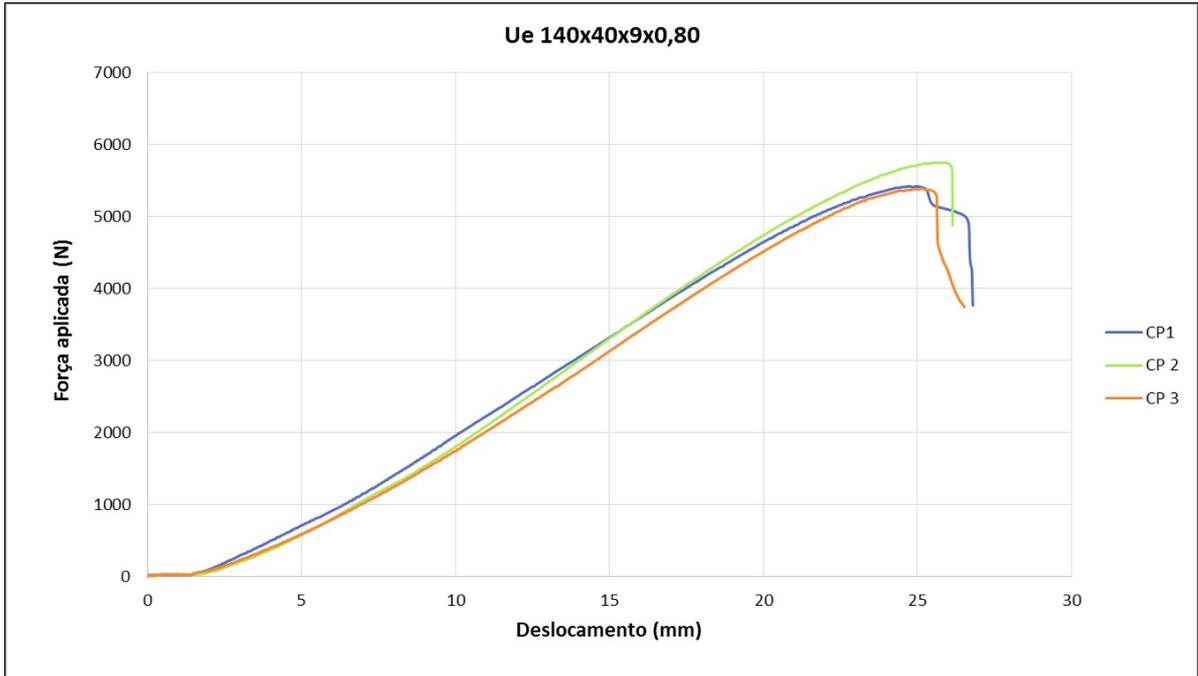


Figura 28 - Força x deformação do conjunto. Perfil: Ue 140x40x9x0,80

A descontinuidade observada no corpo de prova 1, do gráfico da Figura 29, pode ser explicada por uma acomodação do perfil em um dos apoios.

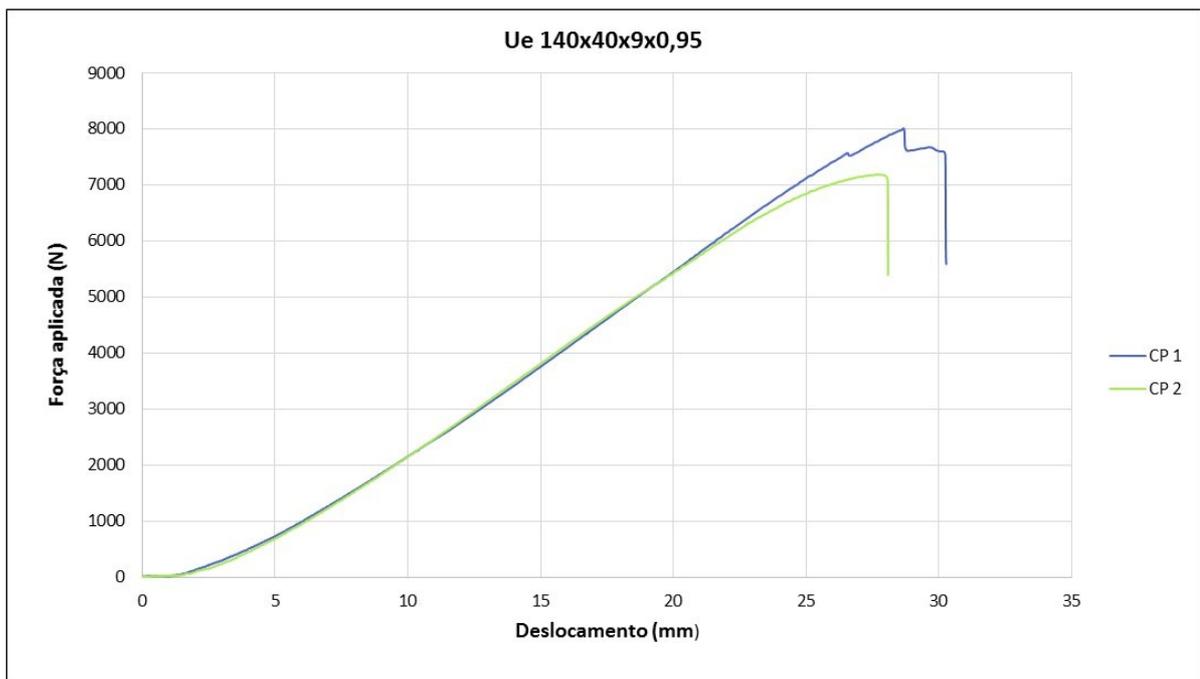


Figura 29 - Força x deformação do conjunto. Perfil: Ue 140x40x9x0,95

A princípio, a plastificação das peças não foi verificada em nenhum dos casos analisados. É caracterizada quando as fibras mais distantes da linha neutra atingem o valor de escoamento do aço  $f_y$ , atingindo o momento de plastificação, caracterizado por um patamar reto no gráfico, o que não foi verificado em nenhum dos casos.

Os resultados experimentais que foram obtidos nos ensaios dos diferentes perfis estão comparados com os valores teóricos obtidos através de alguns procedimentos analíticos propostos.

Para os tipos de perfis avaliados neste programa experimental, a norma brasileira dá como modo de instabilidade o distorcional, com exceção do perfil tipo Ue 140x40x9x0,8 que apresenta como instabilidade crítica a flambagem lateral por torção, não verificada. Os resultados do momento último obtido nos ensaios estão resumidos e comparados com aqueles obtidos em acordo com a ABNT NBR 14762:2010 na Tabela 6. O procedimento de cálculo completo aplicado aos perfis estudados pode ser verificado nos anexos.

*Tabela 6 – Valores últimos obtidos*

<b>Perfil</b>	<b>M<sub>NBR</sub></b> (kN.m)	<b>M<sub>EXPERIMENTAL</sub></b> (kN.m)	<b>M<sub>EXP</sub>/M<sub>NBR</sub></b>
Ue 90x40x9x0,80	0,73	0,80	1,10
Ue 90x40x9x0,95	0,86	1,19	1,38
Ue 140x40x9x0,80	1,18	1,38	1,17
Ue 140x40x9x0,95	1,54	1,90	1,23

Pode-se notar que os resultados obtidos de acordo com a norma brasileira têm boa correlação com os experimentais, ficando sempre a favor da segurança. Como já citado, o modo de instabilidade distorcional pode ser crítico, dependendo das características geométricas da seção transversal da barra. Em geral os perfis Ue 90x40x9x0,8 e perfis Ue 140x40x9x0,8 foram os que apresentaram as melhores correlações com as verificações propostas pela norma vigente. Para fins de projeto,

como já citado no item 7.2.3, a norma brasileira fornece as relações  $b_w/t$  e  $D/b_w$  a partir das quais pode-se dispensar a verificação da instabilidade por distorção para barras fletidas.

## 10. CONCLUSÃO

Observou-se que o modo de falha característico para todos os perfis ensaiados foi a flambagem local da mesa.

Os resultados experimentais obtidos nos ensaios dos perfis fletidos foram comparados aos valores teóricos calculados a partir das expressões do método das seções efetivas da ABNT NBR 14762:2010.

Em geral, as verificações propostas pela norma brasileira apresentaram boa correlação com os resultados obtidos nos ensaios, ficando sempre à favor da segurança. No geral, o modo de falha verificado nos conjuntos foi o mesmo do que os obtidos de acordo com as verificações proposta pela norma brasileira. O perfil Ue 90x40x9x0,8 apresentou a correlação mais próxima da norma, igual a 1,10. Já a série Eu 140x40x9x0, apresentou um coeficiente de 1,38, sendo o maior valor encontrado.

A metodologia utilizada nos ensaios mostrou-se satisfatória, pois em geral, não existiram resultados discrepantes dentro das séries. Notou-se também que a variação de algumas propriedades da seção dos perfis promoveu um aumento considerável na resistência final dos conjuntos. A variação na espessura das chapas de 0,80 mm para 0,95 mm promoveu um aumento de 48,8% para a série Ue 90x40x9 e de 37,7% para a série Ue 140x40x9. Já a alteração na altura da alma, de 90 mm para 140 mm, proporcionou um aumento de 72,5% nos perfis com espessura de chapa de 0,80 mm e de 59,7% nas peças com espessura de 0,95 mm.

O perfil tipo U enrijecido é empregado como bloqueador, enrijecedor de alma, montante, verga, vigas, e seu comportamento estrutural não é bem conhecido, devido a escassez de estudos a seu respeito. Sabendo da ampla utilização nas construções no sistema Light Steel Frame, as análises das seções transversais escolhidas foram satisfatórias. Além disso, a comercialização dos perfis formadas a frio é realizada através do seu peso, justificando a importância do conhecimento do comportamento dessas peças, de forma a otimizar o dimensionamento e os custos de projeto.

Como continuidade a esta linha de pesquisa, sugere-se alguns temas relacionados para o desenvolvimento de trabalhos futuros, tendo como objetivo o aprofundamento no estudo dos perfis de aço formados a frio, contribuindo para a eficiência do seu uso. Resumidamente, esses temas são:

1. Possível influência dos travamentos laterais (espaçamento) sobre o modo de falha do perfil;
2. Análise das seções tipo I, formadas pela união de dois perfis tipo U;
3. Análise das outras seções transversais de perfis, variando a altura da alma e as espessuras de chapa prescritas pela norma;
4. Análise de maiores comprimentos de perfis, simulando maiores vãos que as vigas possam precisar vencer, de acordo com o projeto;
5. Comparar a precisão dos métodos da largura efetiva e da seção efetiva propostos pela ABNT NBR 14762:2010.
6. Estudo do comportamento de cada elemento da seção transversal, afim de diferenciar os tipos de instabilidades geradas.

## REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma Brasileira NBR 6355 – Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização**. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma Brasileira NBR 14762 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma Brasileira NBR 15253 – Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis reticulados em edificações - Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2005.

BARBIERI DO BRASIL. **Catálogo Online**. Disponível em: [http://www.barbieridobrasil.com.br/index\\_w.html](http://www.barbieridobrasil.com.br/index_w.html). Acesso em Novembro de 2014.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Sistema construtivo utilizando perfis estruturais formados a frio de aços revestidos (Steel Framing) – Requisitos e Condições mínimos para financiamento pela Caixa**. Disponível em: [http://www.cbca-ibs.org.br/biblioteca\\_manuais\\_caixa.asp](http://www.cbca-ibs.org.br/biblioteca_manuais_caixa.asp). Acesso em Jul.2014.

CHODRAUI, G. M. B. **Flambagem por distorção da seção transversal em perfis de aço formados a frio submetidos à compressão centrada e à flexão**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2003.

COSTA, A. A. R.; CALDAS, R. B.; RODRIGUES, F. C. **Estudo da flambagem local de perfis u enrijecidos em situação de incêndio**. Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo, v. 8, n. 1, jan./abr. 2011.

DESMOND, T. P.; PEKÖZ, T.; WINTER, G. (1981a) **Edge stiffeners for thin-walled members**. Journal of the Structural Division, ASCE, v.107, n.2, p.219-263, June.

DESMOND, T. P.; PEKÖZ, T.; WINTER, G. (1981b) **Intermediate stiffeners for thin-walled members**. Journal of the Structural Division, ASCE, v.107, n.ST4, p.627-649, April.

FREITAS, A. M. S; CRASTO, R. C. M. Steel Framing: **Arquitetura (Série Manual de Construção em Aço)**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2006.

HANCOCK, G. J. **Design for distortional buckling of flexural members.** Thin-Walled Structures, v.27, n.1, p.3-12. 1997.

HANCOCK, G. J.; MURRAY, T. M.; ELLIFRITT, D. S. **Cold-formed steel structures to the AISI specification.** Marcel Dekker, Inc. New York, 2011.

JAVARONI, C. E. **Perfis de aço formados a frio: instabilidade por distorção na flexão.** Relatório Técnico. Faculdade de Engenharia, Unesp/Bauru, 2002.

JAVARONI, C. E. **Perfis de aço formados a frio submetidos à flexão: análise teórico-experimental.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1999.

JAVARONI, C. E. **Perfis de aço formados a frio: instabilidade por distorção.** Artigo técnico – Revista Construção Metálica, 2007.

JARDIM, G. T. C.; CAMPOS, A. S. **“Light Steel Framing”:** uma aposta do setor siderúrgico no desenvolvimento tecnológico da construção civil. São Paulo: CBCA, [entre 2004 e 2009]. Disponível em:

[http://www.cbca-ibs.com.br/nsite/site/acervo\\_item\\_listar\\_apostilas.asp](http://www.cbca-ibs.com.br/nsite/site/acervo_item_listar_apostilas.asp). Acesso em Outubro de 2014.

MASISA. **Painel Estrutural OSB Masisa: Recomendações Práticas.** Catálogo Ponta Grossa: Masisa, 2003.

NAHB, North American Home Builders Research Center. **Guia do constructor em Steel Framing.** Washington, DC, 1996.

PINHO, F.; Ottoboni; PENNA, F. **Viabilidade Econômica / Fernando Ottoboni Pinho, Fernando Penna.** Rio de Janeiro: IBS / CBCA, 2008. (Série Manual de Construção em Aço).

RODRIGUES, F. C. Steel Framing: **Engenharia (Série Manual de Construção em Aço).** Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2006.

REFORMOLAR. Disponível em: <http://www.reformolar.com.br/tag/steel-frame/page/17/>. Acesso em Dezembro de 2014.

SANTIAGO, A. K., ARAÚJO, E. C. **Sistema Light Steel Framing como fechamento externo industrializado** – Congresso latino-americano da construção metálica. São Paulo, 2008.

SILVA, E. L.; SILVA, V. P. **Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR6355.** Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2008.

SILVA, J. C. M.; GONÇALVES, R. M. **Análise teórica-experimental de perfis de aço formados a frio devido à instabilidade por distorção na flexão.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 8, n. 34, p. 75-104, 2006.

SINAT, Sistema Nacional de Avaliações Técnicas. **Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas (*Sistemas leves tipo "Light Steel Framing"*).** Brasília, 2012.

SOUZA, D. G. **Estudo da Flambagem Local da Mesa de Perfis I com Alma Senoidal via Análise não-linear pelo MEF.** Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

TRICHES, F. J. **Análise estrutural das colunas de sustentação de um silo metálico.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

VEGA MÁQUINAS LTDA. **Catálogo Online.** Disponível em: <http://vegamaquinas.com.br/>. Acesso em Outubro de 2014.

ZHONGYUON. **Catálogo Online.** Disponível em: <http://www.cnrollformingmachine.com.pt/> . Acesso em Outubro de 2014.

## ANEXOS

### CÁLCULOS

#### PERFIL Ue 90x40x9x0,8

##### 1. INÍCIO DO ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma}$$

De acordo com o método da seção efetiva, o cálculo de  $W_{ef}$  é obtido da seguinte forma:

$$\lambda_p = \left( \frac{W f_y}{M_l} \right)^{0,5}$$

Sendo:

$$M_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left( \frac{b_w}{t} \right)^2} W_c$$

O módulo de resistência elástico da seção bruta em relação a fibra extrema que atinge o escoamento, no caso da seção em estudo, é dado como:

$$W = W_c = \frac{I_x}{dist_e} = \frac{19,155}{4,5} = 4,257 \text{ cm}^3$$

$dist_e$  é a distância entre o centro de gravidade e a fibra extrema que atinge o escoamento, considerada como sendo  $b_w/2$ .

$$\therefore M_l = 22,86 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1-0,3^2) \left(\frac{9}{0,08}\right)^2} \times 4,257 = 139,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\therefore \lambda_p = \left(\frac{4,257 \cdot 25,0}{139}\right)^{0,5} = 0,875$$

Para  $\lambda_p > 0,673$ :

$$W_{ef} = W \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \frac{1}{\lambda_p} = 4,257 \left(1 - \frac{0,22}{0,875}\right) \frac{1}{0,875} = 3,642 \text{ cm}^3$$

Dessa forma:

$$M_{Rd} = \frac{3,642 \times 25,0}{1,1} = 82,77 \text{ kN} \cdot \text{cm} = 0,828 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## 2. FLAMBAGEM LATERAL POR TORÇÃO

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

De acordo com o método da seção efetiva, o cálculo de  $W_{c,ef}$  é obtido da seguinte forma:

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi_{FLT} W f_y}{M_l}\right)^{0,5}$$

Sendo:

$$\therefore M_l = 22,86 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1-0,3^2) \left(\frac{9}{0,08}\right)^2} \times 4,257 = 139,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$\chi_{FLT}$  é obtido de acordo com o valor de  $\lambda_0$ , como segue:

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5}$$

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_y^2} = \frac{\pi^2 20000 3,134}{100^2} = 61,86 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{L_z^2} + GJ \right] = \frac{1}{4,918^2} \left[ \frac{\pi^2 \times 20000 \times 51,437}{100^2} + 7700 \times 0,003 \right] = 42,93 \text{ kN}$$

Como o diagrama de momento fletor é constante no trecho destravado considerado,  $C_b = 1,0$ .

$$M_e = 1,0 \times 4,918 \times (61,86 \times 42,93)^{0,5} = 253,45 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\therefore \lambda_0 = \left( \frac{4,257 \times 25,0}{253,45} \right)^{0,5} = 0,648$$

para  $0,6 < \lambda_0 < 1,336$  :

$$\chi_{FLT} = 1,11 \left( 1 - 0,278 \lambda_0^2 \right) = 1,11 \left( 1 - 0,278 \times 0,648^2 \right) = 0,98$$

Assim:

$$\lambda_p = \left( \frac{0,98 \times 4,257 \times 25,0}{139} \right)^{0,5} = 0,866$$

para  $\lambda_p > 0,673$  :

$$W_{ef} = W_c \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} = 4,257 \left( 1 - \frac{0,22}{0,866} \right) \frac{1}{0,866} = 3,666 \text{ cm}^3$$

Finalmente:

$$M_{Rd} = \frac{0,98 \times 3,666 \times 25,0}{1,1} = 81,68 \text{ kN} \cdot \text{cm} = 0,817 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### 3. FLAMBAGEM DISTORCIONAL

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} W f_y}{\gamma}$$

O fator de redução do momento fletor resistente associado à flambagem distorcional,  $\chi_{dist}$ , é calculado de acordo com  $\lambda_{dist}$ , conforme segue:

$$\lambda_{dist} = \left( \frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5}$$

O momento fletor de flambagem distorcional elástica  $M_{dist}$ , é encontrado de forma analítica, baseado nas propriedades geométricas da seção composta pela mesa e pelo enrijecedor de borda do perfil, de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades geométricas da seção composta pela mesa e enrijecedor de borda do perfil Ue 90x40x9x0,8

Ad (cm <sup>2</sup> )	Ix (cm <sup>4</sup> )	Iy (cm <sup>4</sup> )	Ixy (cm <sup>4</sup> )	It (cm <sup>4</sup> )	hx (cm)	hy (cm)
--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------	------------	------------

0,392	0,138	0,662	0,053	0,0008	-2,367	-0,638
-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------

$$\sigma_{dist} = \left( \frac{0,5 E}{A_d} \right) \left\{ \alpha_1 + \alpha_2 - \left[ (\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4 \alpha_3 \right]^{0,5} \right\}$$

$$L_d = 4,8 \left( \frac{0,5 I_x b_f^2 b_w}{t^3} \right)^{0,25} = 4,8 \left( \frac{0,5 \times 0,138 \times 4^2 \times 9}{0,08^3} \right)^{0,25} = 56,625$$

$$\eta = \left( \frac{\pi}{L_d} \right)^2 = \left( \frac{\pi}{56,625} \right)^2 = 0,0031$$

$$\beta_1 = h_x^2 + \frac{I_x + I_y}{A_d} = (-2,367)^2 + \frac{0,138 + 0,662}{0,392} = 7,644$$

$$\beta_2 = I_x b_f^2 = 0,138 \times 4^2 = 2,204$$

$$\beta_3 = I_{xy} b_f = 0,053 \times 4 = 0,212$$

$$\beta_4 = \beta_2 = I_x b_f^2 = 2,204$$

Inicialmente, admite-se o coeficiente de rotação da mola  $k_\phi = 0$ , e

obtem-se a primeira iteração para a tensão crítica ( $\sigma_{dist}$ ).

$$\alpha_1 = \left( \frac{\eta}{\beta_1} \right) \left( \beta_2 + 0,039 I_t L_d^2 \right) + \frac{k_\phi}{\beta_1 \eta E} = \left( \frac{0,0031}{7,644} \right) \left( 2,204 + 0,039 \times 0,0008 \times 56,625^2 \right) = 0,0009$$

$$\alpha_2 = \eta \left( I_y - \frac{2 y_0 \beta_3}{\beta_1} \right) = 0,0031 \left( 0,662 - \frac{2 \times -0,0786 \times 0,212}{7,644} \right) = 0,0021$$

$$\alpha_3 = \eta \left( \alpha_1 I_y - \frac{\eta \beta_3^2}{\beta_1} \right) = 0,0031 \left( 0,0009 \times 0,662 - \frac{0,0031 \times 0,212^2}{7,644} \right) = 0,000002$$

$$\sigma_{dist} = \left( \frac{0,5 E}{A_d} \right) \left\{ \alpha_1 + \alpha_2 - \left[ (\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4 \alpha_3 \right]^{0,5} \right\} = \left( \frac{0,5 \times 20000}{0,392} \right) \left\{ 0,0009 + 0,0021 - \left[ (0,0009 + 0,0021)^2 - 4 \times 0,000002 \right]^{0,5} \right\}$$

$$k_\phi = \frac{E t^3}{2,73 (b_w + 0,006 L_d)} \left[ 1 - \frac{1,11 \times \sigma_{dist}}{E t^2} \left( \frac{b_w^4 L_d^2}{12,56 L_d^4 + 2,192 b_w^4 + 13,39 L_d^2 b_w^2} \right) \right] = \frac{20000 \times 0,08^3}{2,73 (9 + 0,006 \times 56)}$$

Assim, calcula-se  $\sigma_{dist}$  definitivo admitindo, desta vez, a contribuição da rigidez a rotação que a alma exerce sobre a mesa, como segue:

$$\alpha_1 = \left( \frac{\eta}{\beta_1} \right) \left( \beta_2 + 0,039 I_t L_d^2 \right) + \frac{k_\phi}{\beta_1 \eta E} = \left( \frac{0,0031}{7,644} \right) \left( 2,204 + 0,039 \times 0,0008 \times 56,625^2 \right) + \frac{0,2840}{7,644 \times 0,0031 \times 20000}$$

$$\alpha_3 = \eta \left( \alpha_1 I_y - \frac{\eta \beta_3^2}{\beta_1} \right) = 0,0031 \left( 0,0015 \times 0,662 - \frac{0,0031 \times 0,212^2}{7,644} \right) = 0,000003$$

$$\sigma_{dist} = \left( \frac{0,5 E}{A_d} \right) \left\{ \alpha_1 + \alpha_2 - \left[ (\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4 \alpha_3 \right]^{0,5} \right\} = \left( \frac{0,5 \times 20000}{0,392} \right) \left\{ 0,0015 + 0,0021 - \left[ (0,0015 + 0,0021)^2 - 4 \times 0,000003 \right]^{0,5} \right\}$$

$$\therefore \lambda_{dist} = \left( \frac{f_y}{\sigma_{dist}} \right)^{0,5} = \left( \frac{25,0}{72,13} \right)^{0,5} = 0,589$$

para  $\lambda_{dist} < 1,414$ :

$$M_{dist} = 4,257 \times 25,0 \left( 1 - 0,25 \times 0,589^2 \right) = 97,20 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Dessa forma, o índice de esbeltez reduzido referente à flambagem distorcional  $\lambda_{dist}$ , pode ser calculado como:

$$\therefore \lambda_{dist} = \left( \frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5} = \left( \frac{4,257 \times 25,0}{97,20} \right)^{0,5} = 1,046$$

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

$$\chi_{dist} = \left( 1 - \frac{0,22}{1,046} \right) \frac{1}{1,046} = 0,755$$

Finalmente:

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} W f_y}{\gamma} = \frac{0,755 \times 4,257 \times 25,0}{1,1} = 73,02 \text{ kN} \cdot \text{cm} = 0,770 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Assim, o momento fletor resistente crítico do perfil Ue90x40x9x0,8 é de **0,770 kN.m**, ditado pela flambagem distorcional.

## **PERFIL Ue 90x40x9x0,95**

### **1. INÍCIO DO ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA**

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma}$$

De acordo com o método da seção efetiva, o cálculo de  $W_{ef}$  é obtido da seguinte forma:

$$\lambda_p = \left( \frac{W f_y}{M_l} \right)^{0,5}$$

Sendo:

$$M_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left( \frac{b_w}{t} \right)^2} W_c$$

O módulo de resistência elástico da seção bruta em relação a fibra extrema que atinge o escoamento, no caso da seção em estudo, é dado como:

$$W = W_c = \frac{I_x}{dist_e} = \frac{22,510}{4,5} = 5,002 \text{ cm}^3$$

$dist_e$  é a distância entre o centro de gravidade e a fibra extrema que atinge o escoamento, considerada como sendo  $b_w/2$ .

$$\therefore M_l = 22,86 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1-0,3^2) \left( \frac{9}{0,095} \right)^2} \times 5,002 = 230,34 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\therefore \lambda_p = \left( \frac{4,257 \times 25,0}{230,34} \right)^{0,5} = 0,737$$

Para  $\lambda_p > 0,673$ :

$$W_{ef} = W \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} = 4,257 \left( 1 - \frac{0,22}{0,737} \right) \frac{1}{0,737} = 4,762 \text{ cm}^3$$

Dessa forma:

$$M_{Rd} = \frac{4,762 \times 25,0}{1,1} = 108,22 \text{ kN} \cdot \text{cm} = 1,082 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## 2. FLAMBAGEM LATERAL POR TORÇÃO

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

De acordo com o método da seção efetiva, o cálculo de  $W_{c,ef}$  é obtido da seguinte forma:

$$\lambda_p = \left( \frac{\chi_{FLT} W f_y}{M_l} \right)^{0,5}$$

Sendo:

$$\therefore M_l = 22,86 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1-0,3^2) \left( \frac{9}{0,095} \right)^2} \times 5,002 = 230,34 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$\chi_{FLT}$  é obtido de acordo com o valor de  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5}$$

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_y^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 3,659}{90^2} = 89,17 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{L_z^2} + GJ \right] = \frac{1}{4,918^2} \left[ \frac{\pi^2 \times 20000 \times 60,034}{90^2} + 7700 \times 0,005 \right] = 62,61 \text{ kN}$$

Como o diagrama de momento fletor é constante no trecho destravado considerado,  $C_b = 1,0$ .

$$M_e = 1,0 \times 4,918 (89,17 \times 62,61)^{0,5} = 365,90 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\therefore \lambda_0 = \left( \frac{5,002 \times 25,0}{365,90} \right)^{0,5} = 0,584$$

para  $\lambda_0 \leq 0,6$ :

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

Assim:

$$\lambda_p = \left( \frac{1,0 \times 5,002 \times 25,0}{230,34} \right)^{0,5} = 0,737$$

para  $\lambda_p > 0,673$  :

$$W_{ef} = W_c \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} = 4,257 \left( 1 - \frac{0,22}{0,737} \right) \frac{1}{0,737} = 4,762 \text{ cm}^3$$

Finalmente,

$$M_{Rd} = \frac{1,0 \times 4,762 \times 25,0}{1,1} = 108,22 \text{ kN} \cdot \text{cm} = 1,082 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### 3. FLAMBAGEM DISTORCIONAL

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} W f_y}{\gamma}$$

O fator de redução do momento fletor resistente associado à flambagem distorcional,  $\chi_{dist}$ , é calculado de acordo com  $\lambda_{dist}$ , conforme segue:

$$\lambda_{dist} = \left( \frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5}$$

O momento fletor de flambagem distorcional elástica  $M_{dist}$ , é encontrado de forma analítica, baseado nas propriedades geométricas da seção composta pela mesa e pelo enrijecedor de borda do perfil, de acordo com a Tabela 8.

*Tabela 8 – Propriedades geométricas da seção composta pela mesa e enrijecedor de borda do perfil Ue 90x40x9x0,95*

Ad (cm <sup>2</sup> )	I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>xy</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>t</sub> (cm <sup>4</sup> )	h <sub>x</sub> (cm)	h <sub>y</sub> (cm)
0,466	0,164	0,786	0,063	0,001	-2,367	-0,638

$$\sigma_{dist} = \left( \frac{0,5 E}{A_d} \right) \{ \alpha_1 + \alpha_2 - [(\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4 \alpha_3]^{0,5} \}$$

$$L_d = 4,8 \left( \frac{0,5 I_x b_f^2 b_w}{t^3} \right)^{0,25} = 4,8 \left( \frac{0,5 \times 0,164 \times 4^2 \times 9}{0,095^3} \right)^{0,25} = 51,97$$

$$\eta = \left( \frac{\pi}{L_d} \right)^2 = \left( \frac{\pi}{51,97} \right)^2 = 0,0037$$

$$\beta_1 = h_x^2 + \frac{I_x + I_y}{A_d} = (-2,367)^2 + \frac{0,164 + 0,786}{0,466} = 7,644$$

$$\beta_2 = I_x b_f^2 = 0,138 \times 4^2 = 2,6181$$

$$\beta_3 = I_{xy} b_f = 0,053 \times 4 = 0,251$$

$$\beta_4 = \beta_2 = I_x b_f^2 = 2,6181$$

Inicialmente, admite-se  $k_\phi = 0$  e obtêm-se a primeira iteração para a tensão crítica ( $\sigma_{dist}$ ).

$$\alpha_1 = \left( \frac{\eta}{\beta_1} \right) \left( \beta_2 + 0,039 I_t L_d^2 \right) + \frac{k_\phi}{\beta_1 \eta E} = \left( \frac{0,0037}{7,644} \right) \left( 2,6181 + 0,039 \times 0,0014 \times 51,97^2 \right) = 0,0013$$

$$\alpha_2 = \eta \left( I_y - \frac{2 y_0 \beta_3}{\beta_1} \right) = 0,0031 \left( 0,662 - \frac{2 \times -0,0783 \times 0,251}{7,644} \right) = 0,0029$$

$$\alpha_3 = \eta \left( \alpha_1 I_y - \frac{\eta \beta_3^2}{\beta_1} \right) = 0,0031 \left( 0,0009 \times 0,662 - \frac{0,0031 \times 0,212^2}{7,644} \right) = 0,000004$$

$$\sigma_{dist} = \left( \frac{0,5 E}{A_d} \right) \left\{ \alpha_1 + \alpha_2 - \left[ (\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4 \alpha_3 \right]^{0,5} \right\} = \left( \frac{0,5 \times 20000}{0,465} \right) \left\{ 0,0013 + 0,0029 - \left[ (0,0013 + 0,0029)^2 - 4 \times 0,000004 \right]^{0,5} \right\}$$

$$k_\phi = \frac{E t^3}{2,73 (b_w + 0,006 L_d)} \left[ 1 - \frac{1,11 \sigma_{dist}}{E t^2} \left( \frac{b_w^4 L_d^2}{12,56 L_d^4 + 2,192 b_w^4 + 13,39 L_d^2 b_w^2} \right) \right] = \frac{20000 \times 0,095^3}{2,73 (9 + 0,006 \times 51,97)}$$

Assim, calcula-se  $\sigma_{dist}$  definitivo admitindo, desta vez, a contribuição da rigidez a rotação que a alma exerce sobre a mesa, como segue:

$$\alpha_1 = \left( \frac{\eta}{\beta_1} \right) \left( \beta_2 + 0,039 I_t L_d^2 \right) + \frac{k_\phi}{\beta_1 \eta E} = \left( \frac{0,0037}{7,644} \right) \left( 2,6181 + 0,039 \times 0,001 \times 51,97^2 \right) + \frac{0,4865}{7,644 \times 0,0037 \times 2}$$

$$\alpha_3 = \eta \left( \alpha_1 I_y - \frac{\eta \beta_3^2}{\beta_1} \right) = 0,0037 \left( 0,0022 \times 0,786 - \frac{0,0037 \times 0,251^2}{7,644} \right) = 0,00001$$

$$\sigma_{dist} = \left( \frac{0,5 E}{A_d} \right) \left\{ \alpha_1 + \alpha_2 - \left[ (\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4 \alpha_3 \right]^{0,5} \right\} = \left( \frac{0,5 \times 20000}{0,465} \right) \left\{ 0,0013 + 0,0029 - \left[ (0,0013 + 0,0029)^2 - 4 \times 0,00001 \right]^{0,5} \right\}$$

$$\therefore \lambda_{dist} = \left( \frac{f_y}{\sigma_{dist}} \right)^{0,5} = \left( \frac{25,0}{86,75} \right)^{0,5} = 0,537$$

para  $\lambda_{dist} < 1,414$ :

$$M_{dist} = 5,002 \times 25,0 (1 - 0,25 \times 0,537^2) = 116,04 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Dessa forma, o índice de esbeltez reduzido referente à flambagem distorcional  $\lambda_{dist}$ , pode ser calculado como:

$$\therefore \lambda_{dist} = \left( \frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5} = \left( \frac{5,002 \times 25,0}{116,04} \right)^{0,5} = 1,038$$

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

$$\chi_{dist} = \left( 1 - \frac{0,22}{1,038} \right) \frac{1}{1,038} = 0,759$$

Finalmente:

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} W f_y}{\gamma} = \frac{0,759 \times 5,002 \times 25,0}{1,1} = 86,30 \text{ kN} \cdot \text{cm} = 0,863 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Assim, o momento fletor resistente crítico do perfil Ue90x40x9x0,8 é de **0,863 kN.m**, ditado pela flambagem distorcional.

### PERFIL Ue 140x40x9x0,8

#### 1. INÍCIO DO ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma}$$

De acordo com o método da seção efetiva, o cálculo de  $W_{ef}$  é obtido da seguinte forma:

$$\lambda_p = \left( \frac{W f_y}{M_l} \right)^{0,5}$$

Sendo:

$$M_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left( \frac{b_w}{t} \right)^2} W_c$$

O módulo de resistência elástico da seção bruta em relação a fibra extrema que atinge o escoamento, no caso da seção em estudo, é dado como:

$$W = W_c = \frac{I_x}{dist_e} = \frac{53,574}{7,0} = 7,653 \text{ cm}^3$$

$dist_e$  é a distância entre o centro de gravidade e a fibra extrema que atinge o escoamento, considerada como sendo  $b_w/2$ .

$$\therefore M_l = 30,28 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1-0,3^2) \left(\frac{14}{0,08}\right)^2} \times 7,653 = 136,80 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\therefore \lambda_p = \left(\frac{7,653 \times 25,0}{136,80}\right)^{0,5} = 1,183$$

Para  $\lambda_p > 0,673$ :

$$W_{ef} = W \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \frac{1}{\lambda_p} = 7,653 \left(1 - \frac{0,22}{1,183}\right) \frac{1}{1,183} = 5,268 \text{ cm}^3$$

Dessa forma:

$$M_{Rd} = \frac{5,268 \times 25,0}{1,1} = 119,72 \text{ kN} \cdot \text{cm} = 1,197 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## 2. FLAMBAGEM LATERAL POR TORÇÃO

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

De acordo com o método da seção efetiva, o cálculo de  $W_{c,ef}$  é obtido da seguinte forma:

$$\lambda_p = \left( \frac{\chi_{FLT} W f_y}{M_l} \right)^{0,5}$$

Sendo:

$$\therefore M_l = 30,28 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1-0,3^2) \left( \frac{14}{0,08} \right)^2} \times 7,653 = 136,80 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$\chi_{FLT}$  é obtido de acordo com o valor de  $\lambda_0$ , como segue:

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5}$$

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_y^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 3,577}{100^2} = 70,61 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{L_z^2} + GJ \right] = \frac{1}{6,082^2} \left[ \frac{\pi^2 \times 20000 \times 136,306}{100^2} + 7700 \times 0,004 \right] = 73,57 \text{ kN}$$

Como o diagrama de momento fletor é constante no trecho destravado considerado,  $C_b = 1,0$ .

$$M_e = 1,0 \times 4,918 \times (70,61 \times 73,57)^{0,5} = 438,35 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\therefore \lambda_0 = \left( \frac{7,653 \times 25,0}{438,35} \right)^{0,5} = 0,661$$

para  $0,6 < \lambda_0 < 1,336$  :

$$\chi_{FLT} = 1,11 \left( 1 - 0,278 \lambda_0^2 \right) = 1,11 \left( 1 - 0,278 \times 0,661^2 \right) = 0,975$$

Assim:

$$\lambda_p = \left( \frac{0,975 \times 7,653 \times 25,0}{136,80} \right)^{0,5} = 1,168$$

para  $\lambda_p > 0,673$  :

$$W_{ef} = W_c \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} = 4,257 \left( 1 - \frac{0,22}{1,168} \right) \frac{1}{1,168} = 5,319 \text{ cm}^3$$

Finalmente:

$$M_{Rd} = \frac{0,975 \times 5,319 \times 25,0}{1,1} = 117,89 \text{ kN} \cdot \text{cm} = 1,179 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### 3. FLAMBAGEM DISTORCIONAL

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} W f_y}{\gamma}$$

O fator de redução do momento fletor resistente associado à flambagem distorcional,  $\chi_{dist}$ , é calculado de acordo com  $\lambda_{dist}$ , conforme segue:

$$\lambda_{dist} = \left( \frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5}$$

O momento fletor de flambagem distorcional elástica  $M_{dist}$ , é encontrado de forma analítica, baseado nas propriedades geométricas da seção composta pela mesa e pelo enrijecedor de borda do perfil, de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades geométricas da seção composta pela mesa e enrijecedor de borda do perfil Ue 140x40x9x0,8

$A_d$ (cm <sup>2</sup> )	$I_x$ (cm <sup>4</sup> )	$I_y$ (cm <sup>4</sup> )	$I_{xy}$ (cm <sup>4</sup> )	$I_t$ (cm <sup>4</sup> )	$h_x$ (cm)	$h_y$ (cm)
0,392	0,138	0,662	0,053	0,001	-2,367	-0,638

$$\sigma_{dist} = \left( \frac{0,5 E}{A_d} \right) \left\{ \alpha_1 + \alpha_2 - \left[ (\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4 \alpha_3 \right]^{0,5} \right\}$$

$$L_d = 4,8 \left( \frac{0,5 I_x b_f^2 b_w}{t^3} \right)^{0,25} = 4,8 \left( \frac{0,5 \times 0,138 \times 4^2 \times 14}{0,08^3} \right)^{0,25} = 63,238$$

$$\eta = \left( \frac{\pi}{L_d} \right)^2 = \left( \frac{\pi}{63,238} \right)^2 = 0,0025$$

$$\beta_1 = h_x^2 + \frac{I_x + I_y}{A_d} = (-2,367)^2 + \frac{0,138 + 0,662}{0,392} = 7,644$$

$$\beta_2 = I_x b_f^2 = 0,138 \times 4^2 = 2,204$$

$$\beta_3 = I_{xy} b_f = 0,053 \times 4 = 0,212$$

$$\beta_4 = \beta_2 = I_x b_f^2 = 2,204$$

Inicialmente, admite-se  $k_\phi = 0$  e obtêm-se a primeira iteração para a

tensão crítica ( $\sigma_{dist}$ ).

$$\alpha_1 = \left( \frac{\eta}{\beta_1} \right) \left( \beta_2 + 0,039 I_t L_d^2 \right) + \frac{k_\phi}{\beta_1 \eta E} = \left( \frac{0,0025}{7,644} \right) \left( 2,204 + 0,039 \times 0,0008 \times 63,238^2 \right) = 0,0008$$

$$\alpha_2 = \eta \left( I_y - \frac{2 y_0 \beta_3}{\beta_1} \right) = 0,0025 \left( 0,662 - \frac{2 \times -0,0786 \times 0,212}{7,644} \right) = 0,0016$$

$$\alpha_3 = \eta \left( \alpha_1 I_y - \frac{\eta \beta_3^2}{\beta_1} \right) = 0,0025 \left( 0,0008 \times 0,662 - \frac{0,0025 \times 0,212^2}{7,644} \right) = 0,000001$$

$$\sigma_{dist} = \left( \frac{0,5 E}{A_d} \right) \left( \alpha_1 + \alpha_2 - \left[ (\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4 \alpha_3 \right]^{0,5} \right) = \left( \frac{0,5 \times 20000}{0,392} \right) \left( 0,0008 + 0,0016 - \left[ (0,0008 + 0,0016)^2 - 4 \times 0,000001 \right]^{0,5} \right)$$

$$k_\phi = \frac{E t^3}{2,73 (b_w + 0,006 L_d)} \left[ 1 - \frac{1,11 \sigma_{dist}}{E t^2} \left( \frac{b_w^4 L_d^2}{12,56 L_d^4 + 2,192 b_w^4 + 13,39 L_d^2 b_w^2} \right) \right] = \frac{20000 \times 0,08^3}{2,73 (14 + 0,006 \times 63,238)}$$

Assim, calcula-se  $\sigma_{dist}$  definitivo admitindo, desta vez, a contribuição da rigidez a rotação que a alma exerce sobre a mesa, como segue:

$$\alpha_1 = \left( \frac{\eta}{\beta_1} \right) \left( \beta_2 + 0,039 I_t L_d^2 \right) + \frac{k_\phi}{\beta_1 \eta E} = \left( \frac{0,0031}{7,644} \right) \left( 2,204 + 0,039 \times 0,0008 \times 63,238^2 \right) + \frac{0,1629}{7,644 \times 0,0025 \times 20000}$$

$$\alpha_3 = \eta \left( \alpha_1 I_y - \frac{\eta \beta_3^2}{\beta_1} \right) = 0,0025 \left( 0,0012 \times 0,662 - \frac{0,0025 \times 0,212^2}{7,644} \right) = 0,000002$$

$$\sigma_{dist} = \left( \frac{0,5 E}{A_d} \right) \left( \alpha_1 + \alpha_2 - \left[ (\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4 \alpha_3 \right]^{0,5} \right) = \left( \frac{0,5 \times 20000}{0,392} \right) \left( 0,0012 + 0,0016 - \left[ (0,0012 + 0,0016)^2 - 4 \times 0,000002 \right]^{0,5} \right)$$

$$\therefore \lambda_{dist} = \left( \frac{f_y}{\sigma_{dist}} \right)^{0,5} = \left( \frac{25,0}{55,96} \right)^{0,5} = 0,668$$

para  $\lambda_{dist} < 1,414$ :

$$M_{dist} = 7,653 \times 25,0 (1 - 0,25 \times 0,668^2) = 169,96 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Dessa forma, o índice de esbelteza reduzido referente à flambagem distorcional  $\lambda_{dist}$ , pode ser calculado como:

$$\therefore \lambda_{dist} = \left( \frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5} = \left( \frac{7,653 \times 25,0}{169,96} \right)^{0,5} = 1,061$$

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

$$\chi_{dist} = \left( 1 - \frac{0,22}{1,061} \right) \frac{1}{1,061} = 0,747$$

Finalmente:

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} W f_y}{\gamma} = \frac{0,747 \times 7,653 \times 25,0}{1,1} = 129,94 \text{ kN} \cdot \text{cm} = 1,299 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Assim, o momento fletor resistente crítico do perfil Ue140x40x9x0,8 é de **1,179 kN.m**, ditado pela flambagem lateral por torção.

## PERFIL Ue 140x40x9x0,95

### 1. INÍCIO DO ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma}$$

De acordo com o método da seção efetiva, o cálculo de  $W_{ef}$  é obtido da seguinte forma:

$$\lambda_p = \left( \frac{W f_y}{M_l} \right)^{0,5}$$

Sendo:

$$M_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left( \frac{b_w}{t} \right)^2} W_c$$

O módulo de resistência elástico da seção bruta em relação a fibra extrema que atinge o escoamento, no caso da seção em estudo, é dado como:

$$W = W_c = \frac{I_x}{dist_e} = \frac{63,068}{7,0} = 9,012 \text{ cm}^3$$

$dist_e$  é a distância entre o centro de gravidade e a fibra extrema que atinge o escoamento, considerada como sendo  $b_w/2$ .

$$\therefore M_l = 30,28 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1-0,3^2) \left( \frac{14}{0,095} \right)^2} \times 9,012 = 227,16 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\therefore \lambda_p = \left( \frac{9,012 \times 25,0}{227,16} \right)^{0,5} = 0,996$$

Para  $\lambda_p > 0,673$ :

$$W_{ef} = W \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} = 4,257 \left( 1 - \frac{0,22}{0,996} \right) \frac{1}{0,996} = 7,050 \text{ cm}^3$$

Dessa forma:

$$M_{Rd} = \frac{7,050 \times 25,0}{1,1} = 160,23 \text{ kN} \cdot \text{cm} = 1,602 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## 2. FLAMBAGEM LATERAL POR TORÇÃO

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

De acordo com o método da seção efetiva, o cálculo de  $W_{c,ef}$  é obtido da seguinte forma:

$$\lambda_p = \left( \frac{\chi_{FLT} W f_y}{M_l} \right)^{0,5}$$

Sendo:

$$\therefore M_l = 30,28 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1-0,3^2) \left( \frac{14}{0,095} \right)^2} \times 9,012 = 227,16 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$\chi_{FLT}$  é obtido de acordo com o valor de  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5}$$

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_y^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 4,177}{100^2} = 82,45 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{L_z^2} + GJ \right] = \frac{1}{4,918^2} \left[ \frac{\pi^2 \times 20000 \times 159,421}{100^2} + 7700 \times 0,007 \right] = 87,07 \text{ kN}$$

Como o diagrama de momento fletor é constante no trecho destravado considerado,  $C_b = 1,0$ .

$$M_e = 1,0 \times 6,063 \times (82,45 \times 87,07)^{0,5} = 513,72 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\therefore \lambda_0 = \left( \frac{9,012 \times 25,0}{513,72} \right)^{0,5} = 0,996$$

para  $0,6 < \lambda_0 < 1,336$

$$\chi_{FLT} = 1,11 \left( 1 - 0,278 \lambda_0^2 \right) = 1,11 \left( 1 - 0,278 \times 0,996^2 \right) = 0,975$$

Assim:

$$\lambda_p = \left( \frac{0,975 \times 5,002 \times 25,0}{227,16} \right)^{0,5} = 0,983$$

para  $\lambda_p > 0,673$  :

$$W_{ef} = W_c \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} = 4,257 \left( 1 - \frac{0,22}{0,983} \right) \frac{1}{0,983} = 7,115 \text{ cm}^3$$

Finalmente,

$$M_{Rd} = \frac{0,975 \times 7,115 \times 25,0}{1,1} = 157,61 \text{ kN} \cdot \text{cm} = 1,576 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### 3. FLAMBAGEM DISTORCIONAL

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} W f_y}{\gamma}$$

O fator de redução do momento fletor resistente associado à flambagem distorcional,  $\chi_{dist}$ , é calculado de acordo com  $\lambda_{dist}$ , conforme segue:

$$\lambda_{dist} = \left( \frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5}$$

O momento fletor de flambagem distorcional elástica  $M_{dist}$ , é encontrado de forma analítica, baseado nas propriedades geométricas da seção composta pela mesa e pelo enrijecedor de borda do perfil, de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades geométricas da seção composta pela mesa e enrijecedor de borda do perfil Ue 140x40x9x0,95

Ad (cm <sup>2</sup> )	Ix (cm <sup>4</sup> )	Iy (cm <sup>4</sup> )	Ixy (cm <sup>4</sup> )	It (cm <sup>4</sup> )	hx (cm)	hy (cm)
0,466	0,164	0,786	0,063	0,001	-2,367	-0,638

$$\sigma_{dist} = \left( \frac{0,5 E}{A_d} \right) \left\{ \alpha_1 + \alpha_2 - \left[ (\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4 \alpha_3 \right]^{0,5} \right\}$$

$$L_d = 4,8 \left( \frac{0,5 I_x b_f^2 b_w}{t^3} \right)^{0,25} = 4,8 \times \left( \frac{0,5 \times 0,1636 \times 4^2 \times 14}{0,095^3} \right)^{0,25} = 58,04$$

$$\eta = \left( \frac{\pi}{L_d} \right)^2 = \left( \frac{\pi}{58,04} \right)^2 = 0,0029$$

$$\beta_1 = h_x^2 + \frac{I_x + I_y}{A_d} = (-2,367)^2 + \frac{0,1636 + 0,7859}{0,4655} = 7,644$$

$$\beta_2 = I_x b_f^2 = 0,1636 \times 4^2 = 2,6181$$

$$\beta_3 = I_{xy} b_f = 0,0628 \times 4 = 0,2513$$

$$\beta_4 = \beta_2 = I_x b_f^2 = 2,6181$$

Inicialmente, admite-se  $k_\phi = 0$  e obtêm-se a primeira iteração para a tensão crítica ( $\sigma_{dist}$ ).

$$\alpha_1 = \left( \frac{\eta}{\beta_1} \right) \left( \beta_2 + 0,039 I_t L_d^2 \right) + \frac{k_\phi}{\beta_1 \eta E} = \left( \frac{0,0029}{7,644} \right) \left( 2,6181 + 0,039 \times 0,0014 \times 58,04^2 \right) = 0,0011$$

$$\alpha_2 = \eta \left( I_y - \frac{2 y_0 \beta_3}{\beta_1} \right) = 0,0029 \left( 0,7859 - \frac{2 \times -0,0783 \times 0,2513}{7,644} \right) = 0,0023$$

$$\alpha_3 = \eta \left( \alpha_1 I_y - \frac{\eta \beta_3^2}{\beta_1} \right) = 0,0029 \left( 0,0011 \times 0,662 - \frac{0,0029 \times 0,2513^2}{7,644} \right) = 0,000002$$

$$\sigma_{dist} = \left( \frac{0,5 E}{A_d} \right) \left\{ \alpha_1 + \alpha_2 - \left[ (\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4 \alpha_3 \right]^{0,5} \right\} = \left( \frac{0,5 \times 20000}{0,4655} \right) \left\{ 0,0011 + 0,0023 - \left[ (0,0011 + 0,0023)^2 - 4 \times 0,000002 \right]^{0,5} \right\}$$

$$k_\phi = \frac{E t^3}{2,73 (b_w + 0,006 L_d)} \left[ 1 - \frac{1,11 \sigma_{dist}}{E t^2} \left( \frac{b_w^4 L_d^2}{12,56 L_d^4 + 2,192 b_w^4 + 13,39 L_d^2 b_w^2} \right) \right] = \frac{20000 \times 0,095^3}{2,73 (14 + 0,006 \times 58,04)}$$

Assim, calcula-se  $\sigma_{dist}$  definitivo admitindo, desta vez, a contribuição da rigidez a rotação que a alma exerce sobre a mesa, como segue:

$$\alpha_1 = \left( \frac{\eta}{\beta_1} \right) \left( \beta_2 + 0,039 I_t L_d^2 \right) + \frac{k_\phi}{\beta_1 \eta E} = \left( \frac{0,0029}{7,644} \right) \left( 2,6181 + 0,039 \times 0,0014 \times 58,045^2 \right) + \frac{0,2776}{7,644 \times 0,0029}$$

$$\alpha_3 = \eta \left( \alpha_1 I_y - \frac{\eta \beta_3^2}{\beta_1} \right) = 0,0029 \left( 0,0017 \times 0,7859 - \frac{0,0029 \times 0,2513^2}{7,644} \right) = 0,000004$$

$$\sigma_{dist} = \left( \frac{0,5 E}{A_d} \right) \left\{ \alpha_1 + \alpha_2 - \left[ (\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4 \alpha_3 \right]^{0,5} \right\} = \left( \frac{0,5 \times 20000}{0,4655} \right) \left\{ 0,0017 + 0,0023 - \left[ (0,0017 + 0,0023)^2 - 4 \times 0,000004 \right]^{0,5} \right\}$$

$$\therefore \lambda_{dist} = \left( \frac{f_y}{\sigma_{dist}} \right)^{0,5} = \left( \frac{25,0}{67,26} \right)^{0,5} = 0,610$$

para  $\lambda_{dist} < 1,414$ :

$$M_{dist} = 9,012 \times 25,0 \left( 1 - 0,25 \times 0,610^2 \right) = 204,36 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Dessa forma, o índice de esbeltez reduzido referente à flambagem distorcional  $\lambda_{dist}$ , pode ser calculado como:

$$\therefore \lambda_{dist} = \left( \frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5} = \left( \frac{9,012 \times 25,0}{204,36} \right)^{0,5} = 1,050$$

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

$$\chi_{dist} = \left( 1 - \frac{0,22}{1,050} \right) \frac{1}{1,050} = 0,753$$

Finalmente:

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} W_{fy}}{\gamma} = \frac{0,753 \times 9,012 \times 25,0}{1,1} = 154,20 \text{ kN} \cdot \text{cm} = 1,542 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Assim, o momento fletor resistente crítico do perfil Ue140x40x9x0,95 é de **1,542 kN.m**, dado pela flambagem distorcional.