

Armando Flávio Faria de Oliveira

CÁLCULO DE UM GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO COMO
ALTERNATIVA AO GALPÃO EM PERFIS LAMINADOS DO MANUAL DO CBCA

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2015

Armando Flávio Faria de Oliveira

CÁLCULO DE UM GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO COMO
ALTERNATIVA AO GALPÃO EM PERFIS LAMINADOS DO MANUAL DO CBCA

Trabalho apresentado ao curso de
Especialização em Estruturas Metálicas
da Escola de Engenharia da UFMG como
requisito parcial para obtenção do título
de Especialista em Estruturas.

Orientador: Prof. Francisco C. Rodrigues

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2015

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 3
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

INDICE:

1.	<u>DADOS INICIAIS DE CÁLCULO</u>	4
2.	<u>NORMAS E DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA</u>	4
3.	<u>GEOMETRIA DA ESTRUTURA PRINCIPAL</u>	5
4.	<u>MATERIAIS E PROPRIEDADES</u>	6
	4.1. PERFIS ESTRUTURAIS	
	4.2. TELHAS	
	4.3. PARAFUSOS	
	4.4. ELETRODOS	
5.	<u>AÇÕES ATUANTES NA ESTRUTURA PRINCIPAL</u>	8
	5.1. CARGA PERMANENTE (CP)	
	5.2. SOBRECARGA (SC)	
	5.3. CARGA DE VENTO	
	5.4. CARGAS NOMINAIS DE CÁLCULO	
6.	<u>ANÁLISE ESTRUTURAL</u>	16
	6.1. COMBINAÇÕES DE AÇÕES CONFORME NBR-14762	
	6.2. COMBINAÇÕES DE AÇÕES AGRUPADAS	
	6.3. MODELO DE CÁLCULO	
	6.4. ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE CONFORME NBR-8800	
	6.5. CRITÉRIOS DE DESLOCAMENTOS DA NBR-14762	
	6.6. SOLICITAÇÕES DE CÁLCULO DAS BARRAS	
7.	<u>RESISTÊNCIA DE CÁLCULO DOS PERFIS</u>	41
	7.1. RESISTÊNCIA À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO (Nc,Rd) - PERFIL I	
	7.2. RESISTÊNCIA À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO (Nc,Rd)- PERFIL CAIXA	
	7.3. RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR NO EIXO X (Mx,Rd) - PERFIL I	
	7.4. RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR NO EIXO X (Mx,Rd) - PERFIL CAIXA	
	7.5. RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR NO EIXO Y (My,Rd) - PERFIL I	
8.	<u>DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA PRINCIPAL</u>	68
	8.1. VERIFICAÇÃO DAS COLUNAS	
	8.2. VERIFICAÇÃO DAS VIGAS (TESOURAS)	
	8.3. VERIFICAÇÃO DOS CONTRAVENTOS LATERAIS	
9.	<u>DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS AUXILIARES</u>	72
	9.1. RESISTÊNCIA DE CÁLCULO - PERFIL Ue	
	9.2. CÁLCULO DAS TERÇAS DE COBERTURA	
	9.3. CÁLCULO DAS TRAVESSAS DE FECHAMENTO	
10.	<u>COMENTÁRIOS FINAIS</u>	98
	<u>ANEXOS</u>	100

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 4
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

1. DADOS INICIAIS DE CÁLCULO

Galpão com duas meias águas, inclinação da cobertura 10°.

Dimensões principais (largura x comprimento x pé direito) de 15m x 54 m x 6 m.

Vão entre pórticos transversais de 6,0m.

Pórtico com vigas e colunas em perfis formados a frio.

Colunas com bases em apoios rígidos, com restrição de deslocamentos e rotação.

Tesouras em viga-treliça com 3 travessas longitudinais de contenção lateral

Cobertura e fechamentos (lateral e frontal) em telha trapezoidal.

O aço grau Q-35 está sendo usado em todos os perfis dobrados para equivalência com a resistência do perfil laminado utilizado originalmente no projeto do galpão.

Cálculo estrutural feito via software SAP-2000-r15.1, com os seguintes parâmetros:

- Análise de 2^a ordem, considerando os efeitos de imperfeições geométricas e de material;
- Contraventos laterais e de cobertura suportando somente cargas a tração.
- Barras subdividas (*mesh*) no mínimo de 4 elementos.

Os perfis estruturais utilizados foram definidos conforme anexo B.

Análise em temperatura elevada não faz parte deste trabalho.

Cálculo das fundações e bases de concreto não faz parte deste trabalho.

2. NORMAS E DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Normas de cálculo

ABNT NBR-14762: 2001, Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.

ABNT NBR-6123:1988, Forças devidas ao vento em edificações

ABNT NBR-8800:2008, Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios

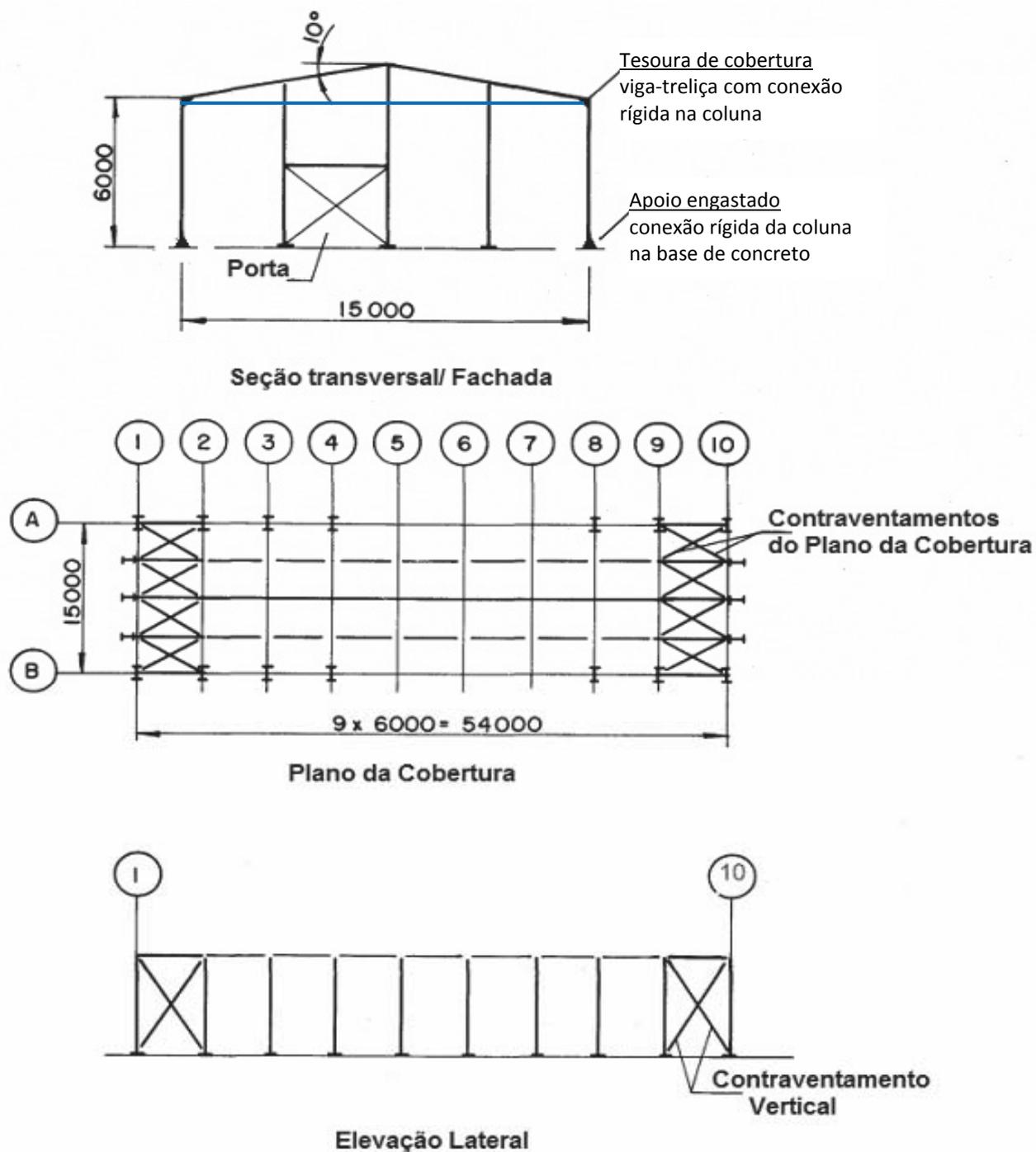
Documentos de referência

IBS/CBCA (2004). Galpões para usos gerais. Instituto Brasileiro de Siderurgia-Rio de Janeiro.

Brockenbrough R.L., Merritt F.S. (1999). Structural Steel Designer's Handbook - 3^a edition. McGraw-Hill. USA.

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 5
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

3. GEOMETRIA DA ESTRUTURA PRINCIPAL



Nesta concepção, a estabilidade estrutural é garantida pelos seguintes sub-sistemas:

- Quadros extremos contraventados (eixos 1, 2, 9 e 10) para contenção longitudinal do conjunto;
- Pórticos transversais em todos os eixos de 1 a 10 para contenção individual de cada vão.

Dimensões principais:

Altura.....	h = 6,00 m
Largura.....	b = 15,00 m
Comprimento.....	a = 54,00 m
Inclinação do telhado.....	$\theta = 10^\circ$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 6
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

4. MATERIAIS E PROPRIEDADES

4.1. PERFIS ESTRUTURAIS

Os perfis inicialmente propostos para o trabalho são:

- Pilares: Ie 200 x 100 x 25 x 3,0
Usado nas colunas dos pórticos transversais.
- Vigas: Cx 300 x 85 x 25 x 2,0
Usado nas vigas transversais dos pórticos, formando a estrutura da cobertura.

Propriedades geométricas conforme catálogo TECNOFER

		Ue 200x100x25x3		Ue 300x85x25x2		Ie 200x200x25x3		CX 300x170x25x2
A	cm ²	12,91		10,14		25,82		20,27
I _x = I ₃	cm ⁴	841,08		1339,09		1682,16		2678,17
W _x =W ₃	cm ³	84,11		89,27		168,22		178,54
r _x = r ₃	cm	8,07		11,49		8,07		11,49
I _y = I ₂	cm ⁴	175,17		93,89		633,06		991,68
W _y =W ₂	cm ³	26,18		14,91		63,31		116,67
r _y = r ₂	cm	3,68		3,04		4,95		6,99
J	cm ⁴	0,387		0,135		0,774		0,27
C _w	cm ⁶	14970,33		17055,02		59881,34		68220,07
r _o	cm	11,84		13,16				

Adicionalmente, utilizam-se os seguintes perfis na estrutura principal:

- Travessas Ue 200x100x25x3
Usado as vigas longitudinais de ligação entre os pórticos (na cobertura).
- Terças Ue 200x100x20x2
Utilizado nas terças de cobertura, nas vigas de apoio do fechamento lateral e nos montantes dos quadros contraventados.
- Diagonais L 90x90x3
Utilizado no cálculo das diagonais da cobertura e do fechamento laterais, sendo reduzido para L-60 x 60 x 2 conforme item 8.3.

Propriedades geométricas

		L 90x90x3
A	cm ²	5,25
I _x = I ₃	cm ⁴	69,33
W _x =W ₃	cm ³	10,89
r _x = r ₃	cm	
I _y = I ₂	cm ⁴	16,76
W _y =W ₂	cm ³	5,24

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 7
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

Material: Chapa fina a quente de aço-carbono, norma ABNT NBR 5004, grau Q-35

$f_y = 340$ MPa

$f_u = 450$ MPa

4.2. TELHAS

Cobertura em telha trapezoidal espessura 0.55mm, altura da onda de 40mm.

Espaçamento máximo entre apoios de 2000mm, da seguinte forma:

- Cobertura com 3 terças de cada lado do telhado espaçadas de 1900mm, aproximadamente;
- Fechamento lateral com 3 montantes de apoio espaçados de 1500mm.

Fixação com parafusos de alta resistência ASTM A-325 sem torqueamento.

4.3. PARAFUSOS

Parafusos comuns: ASTM A-307 ou ISO-898-1, classe 4.6

Parafusos de alta resistência: ASTM A-325 ou ISO-4016, classe 8.8

4.4. ELETRODOS

Utilizar eletrodo E-70xx em todas as uniões soldadas e na junção dos perfis compostos.

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 8
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov FCR			

5. AÇÕES ATUANTES NA ESTRUTURA PRINCIPAL

5.1. CARGA PERMANENTE (CP)

Peso da estrutura principal

O peso dos componentes modelados no cálculo são calculados automaticamente pelo programa, sendo multiplicado pelo fator de 1,1 para levar em conta as tolerâncias e ligações.

Peso da cobertura (conforme manual, item 2.6.1).....	$w_{,co} =$	$\frac{250}{100}$	N/m^2
Telhas.....		100	N/m^2
Contraventamentos.....		50	N/m^2
Terças e tirantes.....		100	N/m^2

Peso do fechamento lateral (conf. manual, item 2.6.1).....	$w_{,fe} =$	$\frac{300}{100}$	N/m^2
Telhas.....		100	N/m^2
Vigas e colunas.....		200	N/m^2

CARGA PERMANENTE (CP)									
Eixo	Direção da carga	COBERTURA		PILAR		VIGA FRONTAL			
		Lp [m]	$W_{,co}$ [N/m]	Lp [m]	$W_{,fe}$ [N/m]	Lp [m]	$W_{,fe}$ [N/m]		
1, 10	z-	3	750	4,88	1463	4,32	1296		
2 a 9	z-	6	1500	6,00	1800				

Lp = largura de participação do componente estrutural.

5.2. SOBRECARGA (SC)

Sobrecarga na cobertura.....	$SC_{,co} =$	250	N/m^2
Valor mínimo conforme NBR-8800, anexo b, item 5.1			

SOBRECARGA (SC)					
Eixo	Direção da carga	COBERTURA			
		Lp [m]	$W_{,co}$ [N/m]		
1, 10	z-	3	750		
2 a 9	z-	6	1500		

5.3. CARGA DE VENTO

5.3.1. PRESSÃO DINÂMICA DO VENTO CONFORME NBR-6123

Velocidade básica do vento.....	$V_o =$	40	m/s
Figura 1, isopleta da cidade de São Paulo			

Fator topográfico.....	$S_1 =$	$1,0$	
Item 5.2.a, terreno plano ou fracamente acidentado			

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 9
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

Fator de rugosidade do terreno, dimensões e altura (item 5.3, tabela 2)

$$z \leq 5 \text{ m} \dots\dots\dots S_2(z5) = 0,82$$

$$5 < z \leq 10 \text{ m} \dots\dots\dots S_2(z10) = 0,88$$

Categoria III (terreno com edificações baixas e esparsas, cota média do topo dos obstáculos considerada igual a 3,0m)

Classe C (superfície frontal acima de 50 m)

Fator topográfico..... $S_3 = 0,95$

tabela 3, instalação industrial com baixo fator de ocupação

z [m]	V_0 [m/s]	S_1	S_2	S_3	V_k [m/s]	q [N/m ²]
$z \leq 5$	40	1	0,82	0,95	31	595
$5 < z \leq 10$	40	1	0,88	0,95	33	685

z = altura acima do terreno

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad \text{Velocidade característica do vento}$$

$$q = 0,613 V_k^2 \quad \text{Pressão dinâmica do vento}$$

5.3.2. COEFICIENTES DE PRESSÃO

cp_e = coeficiente de pressão externa

cp_i = coeficiente de pressão interna

cp_s = coeficiente de sucção na cobertura

a) Coeficiente de pressão externa das paredes de acordo com a tabela 4 da NBR-6123:

Edificação de planta retangular

$$\frac{h}{b} = \frac{6,00}{15} = 0,4 \quad \Rightarrow \quad \frac{h}{b} < \frac{1}{2}$$

$$\frac{a}{b} = \frac{54}{15} = 3,6 \quad \Rightarrow \quad 2 < \frac{a}{b} \leq 4$$

Cp_e conforme 2ª linha da tabela 4.

$$a' = \begin{cases} \geq & b / 3 = & 5 & \text{m} \\ \geq & a / 4 = & 13,5 & \text{m} \\ < & 2h = & 12 & \text{m} \end{cases}$$

$$a' = 12 \text{ m}$$

$$b' = \begin{cases} \geq & b / 2 = & 7,50 & \text{m} \\ < & 2h = & 12 & \text{m} \end{cases}$$

$$b' = 7,5 \text{ m}$$

$$y' = \begin{cases} \leq & h = & 6,00 & \text{m} \\ < & 0,2b = & 3,00 & \text{m} \end{cases}$$

$$y' = 3,0 \text{ m}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 10
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

b) Coefficiente de pressão externa da cobertura de acordo com a tabela 5 da NBR-6123:

$$\frac{h}{b} = \frac{6}{15} = 0,4 \Rightarrow \frac{h}{b} < \frac{1}{2}$$

$$\theta = 10^\circ$$

$$E=G= \begin{cases} \geq & b/3 = & 5 & \text{m} \\ \geq & a/4 = & 13,5 & \text{m} \\ < & 2h = & 12 & \text{m} \end{cases}$$

$$E=G= 12 \text{ m}$$

$$y'' = \begin{cases} \leq & h = & 6,00 & \text{m} \\ < & 0,15b = & 2,25 & \text{m} \end{cases}$$

$$y'' = 2,25 \text{ m}$$

c) Coefficiente de pressão interna conforme item 6.2 da NBR-6123:

6.2.1. Índice de permeabilidade < 30%

As aberturas previstas (portas frontais, tomada de ar lateral e lanternin) não superam 30% da área total da face; a pressão interna não altera a permeabilidade.

6.2.2. Fechamento e cobertura em telha trapezoidal são considerados elementos permeáveis.

6.2.5. Valores para o coeficiente de pressão interna c_{pi} :

Considera-se o galpão com as 4 faces igualmente permeáveis devido ao fechamento em telha trapezoidal e à existência de aberturas nas 4 faces (portas frontais e ventilação na lateral), sendo adotados os coeficientes indicados em 6.2.5.b.

$c_{pi} = 0$ ou $-0,3$ (usar o pior caso)

d) Coefficiente de atrito conforme item 6.4 da NBR-6123:

Para o vento a 90° (V_y , lateral):

$$\left. \begin{aligned} \frac{l_2}{h} &= \frac{15}{6} = 2,5 < 4 \\ \frac{l_2}{l_1} &= \frac{15}{54} = 0,28 < 4 \end{aligned} \right\} \text{Não considerar a força de atrito}$$

Para o vento a 0° (V_x , frontal):

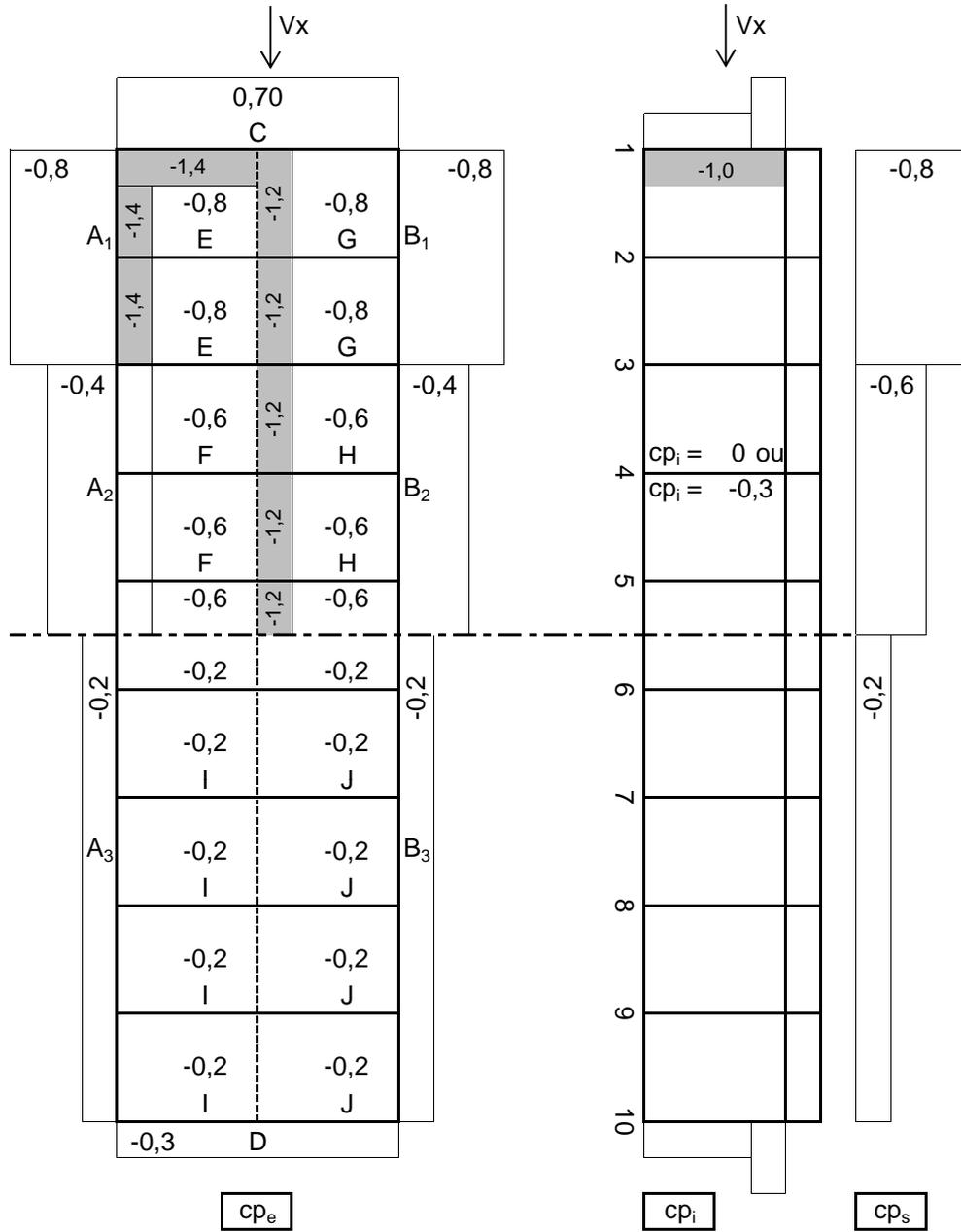
$$\left. \begin{aligned} \frac{l_2}{h} &= \frac{54}{6} = 9 > 4 \\ \frac{l_2}{l_1} &= \frac{54}{15} = 3,6 < 4 \end{aligned} \right\} \text{Considerar força de atrito na direção e sentido do vento } 0^\circ$$

$$\frac{h}{l_1} = \frac{6}{15} = 0,4 < 1 \Rightarrow \begin{aligned} F'_{co} &= c_f \cdot q \cdot l_1 \cdot (l_2 - 4h) && \text{na cobertura} \\ F'_{fe} &= c_f \cdot q \cdot 2h \cdot (l_2 - 4h) && \text{no fechamento lateral} \end{aligned}$$

Coefficiente de força de atrito..... $c_f = 0,04$

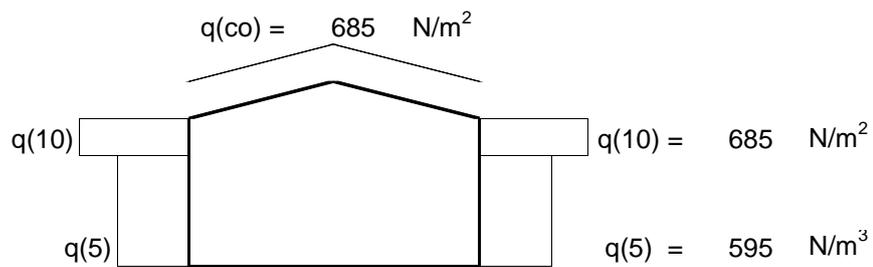
Item 6.4.3.c, superfícies com nervuras retangulares transversais à direção do vento é a opção mais próxima das telhas trapezoidais.

COEFICIENTES DE PRESSÃO PARA VENTO A 0° (Vx, FRONTAL):



VISTA EM PLANTA

VISTA LONGITUDINAL



VISTA TRANSVERSAL

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		13	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR				

5.3.3. CARGA RESULTANTE DEVIDO AO VENTO 0° (VX):

VENTO A 0° (VX+, FRONTAL)									
Pórtico	Direção da carga	Lp [m]	cp _e	cp _i	cp		F _{,5} [N/m]	F _{,10} [N/m]	F _{,co} [N/m]
1	x	1,875	0,70	-0,30	1,00		1116	1285	
	y	3	-0,80	0	-0,80		-1428	-1645	
	z10°	3	-0,80	0	-0,80				-1645
2	y	6	-0,80	0	-0,80		-2857	-3290	
	z10°	6	-0,80	0	-0,80				-3290
3	y	6	-0,60	0	-0,60		-2143	-2468	
	z10°	6	-0,70	0	-0,70				-2879
4, 5	y	6	-0,40	0	-0,40		-1428	-1645	
	z10°	6	-0,60	0	-0,60				-2468
6, 7, 8, 9	y	6	-0,20	0	-0,20		-714	-823	
	z10°	6	-0,20	0	-0,20				-823
10	x	1,875	-0,30	0	-0,30		-335	-386	
	y	3	-0,20	0	-0,20		-357	-411	
	z10°	3	-0,20	0	-0,20				-411
1 viga	x	2,32	0,70	-0,30	1,00			1590	
	x	2	0,70	-0,30	1,00		1190		
10 viga	x	2,32	-0,30	0,00	-0,30			-477	
	x	2	-0,30	0,00	-0,30		-357		

Nota: VX positivo (ou negativo) representa pressão (ou sucção) no fechamento e cobertura

Força de atrito na cobertura:

$$F'_{co} = c_f \cdot q \cdot l_1 \cdot (l_2 - 4h)$$

$$F'_{co} = 0,04 \times 685 \times 15 \times (54 - 4 \cdot 6)$$

$$F'_{co} = 12339 \text{ N}$$

$$f'_{co} = \frac{12339}{15,231 \times 10} = 81 \text{ N/m}$$

Força de atrito no fechamento lateral:

$$F'_{fe} = c_f \cdot q \cdot 2h \cdot (l_2 - 4h)$$

$$F'_{fe} = 0,04 \times 595 \times 2 \cdot 6 \times (54 - 4 \cdot 6)$$

$$F'_{fe} = 8570,7 \text{ N}$$

$$f'_{co} = \frac{8570,7}{6 \times 2 \times 10} = 71,4 \text{ N/m}$$

Considera-se a carga de atrito uniformemente distribuída na cobertura e no fechamento:

$$f'_{co} = 80 \text{ N/m}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 14
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

5.3.4. CARGA RESULTANTE DEVIDO AO VENTO 90° (VY):

VENTO A 90° (VY+, LATERAL) - FACE DE BARLAVENTO								
Pórtico	Direção da carga	Lp [m]	cp _e	cp _i	cp	F _{,5} [N/m]	F _{,10} [N/m]	F _{,co} [N/m]
1, 10	x	1,875	-0,90	0	-0,90	-1004	-1157	
	y	3	0,70	0	0,70	1250	1440	
	z10°	3	-1,20	0	-1,20			-2468
2 a 9	y	6	0,70	0	0,70	2500	2879	
	z10°	6	-1,20	0	-1,20			-4935
viga frontal	x	2,32	-0,90	0	-0,90		-1431	
	x	2	-0,90	0	-0,90	-1071		

Nota: VX positivo (ou negativo) representa pressão (ou sucção) no fechamento e cobertura

VENTO A 90° (VY+, LATERAL) - FACE DE SOTAVENTO								
Pórtico	Direção da carga	Lp [m]	cp _e	cp _i	cp	F _{,5} [N/m]	F _{,10} [N/m]	F _{,co} [N/m]
1, 10	x	1,875	-0,50	0	-0,50	-558	-643	
	y	3	-0,50	0	-0,50	-893	-1028	
	z10°	3	-0,40	0	-0,40			-823
2 a 9	y	6	-0,50	0	-0,50	-1786	-2056	
	z10°	6	-0,40	0	-0,40			-1645
viga frontal	x	2,32	-0,50		-0,50		-795	
	x	2	-0,50		-0,50	-595		

Nota: VY positivo (ou negativo) representa pressão (ou sucção) no fechamento e cobertura

$cp = (cp_e - cp_i)$ coeficiente de pressão e forma

$F_{,i} = cp \cdot Lp \cdot q_{,i}$ Carga linear de vento na estrutura principal

5.4. CARGAS NOMINAIS DE CÁLCULO

5.4.1. RESUMO DAS CARGAS NA COBERTURA

Eixo	CP _{,co} [N/m]	SC _{,co} [N/m]	Vento 0°		Vento 90°	
			VX,x [N/m]	VX,z [N/m]	VY,zb [N/m]	VY,zs [N/m]
1	750	750	80	-1645	-2468	-823
2	1500	1500	80	-3290	-4935	-1645
3	1500	1500	80	-2879	-4935	-1645
4,5	1500	1500	80	-2468	-4935	-1645
6,7,8,9	1500	1500	80	-823	-4935	-1645
10	750	750	80	-411	-2468	-823
Σ 13500		Σ 13500				

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 15
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

5.4.2. RESUMO DAS CARGAS NAS COLUNAS

Eixo	CP _{fe} [N/m]	Vento 0°			Vento 90°			
		z [m]	VX,x [N/m]	VX,y [N/m]	VY,yb [N/m]	VY,ys [N/m]	VY,xb [N/m]	VY,xs [N/m]
1	1463	0-5	1196	-1428	1250	-558	-1004	-558
		5-10	1365	-1645	1440	-643	-1157	-643
2	1800	0-5	80	-2857	2500	-1786		
		5-10	80	-3290	2879	-2056		
3	1800	0-5	80	-2143	2500	-1786		
		5-10	80	-2468	2879	-2056		
4,5	1800	0-5	80	-1428	2500	-1786		
		5-10	80	-1645	2879	-2056		
6,7,8,9	1800	0-5	80	-714	2500	-1786		
		5-10	80	-823	2879	-2056		
10	1463	0-5	-335	-357	1250	-558	-1004	-558
		5-10	-386	-411	1440	-643	-1157	-643
Σ		17325						

5.4.3. RESUMO DAS CARGAS NAS VIGAS FRONTAIS

Eixo	CP _{fe} [N/m]	Vento 0°		Vento 90°	
		VX,x [N/m]		VY,xb [N/m]	VY,xs [N/m]
1	1296	2781		-2503	-1390
10	1296	-834		-2503	-1390

5.4.4. FORÇA NOCIONAL NO TOPO DAS COLUNAS

fn: força nocional no topo da coluna

$$fn = 0,003 \left[(CP_{co} + SC_{co}) \cdot \frac{b}{\cos(\theta)} + CP_{fe} \cdot (2h) + CP_{vf} \cdot (4b) \right]$$

$$fn = 0,003 \times [(13500 + 13500) \times 15,231 + 17325 \times 2 \times 6,0 + 1296 \times 4 \times 15,0]$$

$$fn = 2090,7 \text{ N} \quad (\text{força nocional total})$$

Considera-se a força nocional como uma carga concentrada no topo de cada coluna, atuando nas direções x ou y com o valor:

$$fn_x = fn_y = 100 \text{ N}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 16
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

6. ANÁLISE ESTRUTURAL

6.1. COMBINAÇÕES DE AÇÕES CONFORME NBR-14762

6.1.1. COEFICIENTES DE COMBINAÇÃO DE CARGA

Tipo de carga			carga permanente (peso estrutura e fechamentos)	Carga variável Sobrecarga na cobertura	Carga variável Vento		Força nodal (direção X ou Y)	
Coeficiente de ponderação (γ_g ou γ_q)			1,25	1	1,5	1,4	1,4	1,5
Coeficiente de combinação	ELU	ψ_0	1	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
	ELS raro	ψ_1	1	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3
	ELS permanente	ψ_2	1	0,4	0	0	0	0,4
código da carga			CP	SC	Vx	Vy	fnx / fny	

6.1.2. COMBINAÇÕES PARA ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

caso ELU	CP	SC	Vx	Vy	fnx	fny
CP [SC fnx]	1,25	1,5			1,5	
CP [SC fny]	0	0	0			1,5
CP [SC] {VX+}	1,25	1,5	0,84			
CP [SC] {VX-}	1,25	1,5	-0,84			
CP [SC] {VY+}	1,25	1,5		0,84		
CP [SC] {VY-}	1,25	1,5		-0,84		
CP [VX+] {SC}	1,25	1,05	1,4			
CP [VX+]	1		1,4			
CP [VX-] {SC}	1,25	1,05	-1,4			
CP [VX-]	1		-1,4			
CP [VY+] {SC}	1,25	1,05		1,4		
CP [VY+]	1			1,4		
CP [VY-] {SC}	1,25	1,05		-1,4		
CP [VY-]	1			-1,4		

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 17
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

6.2. COMBINAÇÕES DE AÇÕES AGRUPADAS

6.2.1. COEFICIENTE DE COMBINAÇÃO DE CARGAS AGRUPADAS

Considerando que as cargas atuantes são bem distintas - vento horizontal, pesos e sobrecarga verticais - e que a sobrecarga é bem inferior às demais cargas, será feito o agrupamento das cargas para redução das combinações de cálculo, da seguinte forma:

- Ações permanentes agrupadas com fator de majoração 1,4 (NBR-14762, tabela 2, nota c);
- Ações variáveis agrupadas com fator de majoração 1,4 (NBR-14762, tabela 2, nota d);

Observando as simetrias geométrica e de carregamento no galpão, utiliza-se somente a carga de vento no sentido positivo para o cálculo da estrutura. Nesta condição, os pórticos transversais e quadros laterais devem ser simétricos, o que é usual neste tipo de estrutura.

Desta forma, temos as combinações de carga:

CARGAS AGRUPADAS - COEFICIENTES CONF. NBR-14762							
Tipo de carga e origem (item 4.7.5.3.c)			carga permanente (peso estrutura e fechamentos)	Carga variável Sobrecarga na cobertura	Carga variável Vento		Força nodal (direção X ou Y)
Coeficiente de ponderação (γ_g OU γ_q)			1,4	1	1,4	1,4	1,4
Coeficiente de combinação	ELU	ψ_0	1	0,7	0,6	0,6	0,6
	ELS raro	ψ_1	1	0,6	0,3	0,3	0,3
	ELS permanente	ψ_2	1	0,4	0	0	0,4
código da carga			CP	SC	Vx	Vy	fnx / fny

6.2.2. COMBINAÇÕES DE CARGAS AGRUPADAS PARA ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

caso ELU - Cargas agrupadas	CP	SC	Vx	Vy	fnx	fny
a. CP [SC fnx]	1,4	1,4			1,4	
b. CP [SC fny]	1,4	1,4				1,4
c. CP [VX+ SC]	1,4	1,4	1,4			
d. CP [VY+ SC]	1,4	1,4		1,4		
e. CP [VX+]	1		1,4			
f. CP [VY+]	1			1,4		

6.2.3. COMBINAÇÕES DE CARGAS AGRUPADAS PARA ESTADOS LIMITES DE SERVIÇO

caso ELS - combinação frequente	CP	SC	Vx	Vy	fnx	fny
sa. CP [SC fnx]	1	0,6			1	
sb. CP [SC fny]	1	0,6				1
sc. CP [VX+ SC]	1	0,4	0,3			
sd. CP [VY+ SC]	1	0,4		0,3		

Admite-se combinação frequente de serviço, correspondente aos "estados-limites reversíveis, isto é, que não causam danos permanentes à estrutura ou outros componentes da construção, incluindo os relacionados ao conforto dos usuários e ao funcionamento de equipamentos."

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 18
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

6.3. MODELO DE CÁLCULO

6.3.1. SISTEMA ESTRUTURAL

A concepção estrutural proposta no manual de galpões - coluna articulada na base, pórtico transversal e tesoura em viga - foi adequada e suficiente para o projeto em perfil laminado. Entretanto, esta solução leva a deslocamentos relativamente elevados quando os perfis são substituídos pelos perfis formados a frio indicados para o trabalho. Em especial, a cobertura aumentou em muito o seu deslocamento vertical devido ao peso do telhado.

No anexo D, são apresentados alguns resultados da análise com a estrutura original e os perfis formados a frio indicados.

Entende-se que esta diferença é devido à baixa inércia dos perfis formados a frio em relação à inércia dos perfis laminados. Tendo em vista que as dimensões propostas para os perfis formados a frio - alturas de 200 a 300mm e espessuras de 2 a 3 mm - já estão dentro de valores usuais para este tipo de construção, opta-se por modificar a concepção estrutural para adequá-la ao uso dos perfis formados a frio, em detrimento de somente aumentar as seções dos perfis.

Nesse enfoque, são feitas as seguintes modificações para conter os deslocamentos do galpão:

- Colunas com base engastada - para reduzir os deslocamentos transversais (eixo y);
- Tesoura em viga-treliça - para conter o deslocamento vertical (eixo z) do telhado.

Nesta nova concepção, a estrutura atende à deformações prescritas na NBR-14762.

6.3.2. MATERIAL, SEÇÕES ESTRUTURAIS E PROPRIEDADES

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: ABNT-5004-Q-35

Material Type: ColdFormed

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 7.697E-05

Mass per Unit Volume: 7.849E-09

Units: N, mm, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 200000

Poisson's Ratio, U: 0,3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1,200E-05

Shear Modulus, G: 76923,08

Other Properties for Cold Formed Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 340

Minimum Tensile Stress, Fu: 450

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

General Section

Section Name Cx 300x85x25x2

Section Notes

Properties

Property Modifiers

Material + ABNT-5004-Q35

Property Data N, mm, C

Section Name Cx 300x85x25x2

Properties

Cross-section (axial) area	2027,	Section modulus about 3 axis	178540,
Torsional constant	0,	Section modulus about 2 axis	116670,
Moment of Inertia about 3 axis	26781700	Plastic modulus about 3 axis	0,
Moment of Inertia about 2 axis	9916800,	Plastic modulus about 2 axis	0,
Shear area in 2 direction	1168,	Radius of Gyration about 3 axis	114,9
Shear area in 3 direction	616,	Radius of Gyration about 2 axis	69,9

Cold Formed C Section

Section Name Ue 200x100x25x3

Section Notes

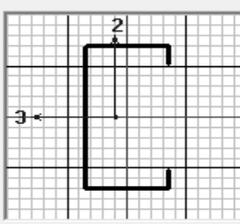
Properties

Property Modifiers

Material + ABNT-5004-Q35

Dimensions

Outside Height (A')	200,
Outside Width (B')	100,
Thickness (t)	3,
Radius (R)	3,
Lip Depth (C')	25,



Property Data N, mm, C

Section Name Ue 200x100x25x3

Properties

Cross-section (axial) area	1290,823	Section modulus about 3 axis	83987,69
Torsional constant	3872,469	Section modulus about 2 axis	26200,562
Moment of Inertia about 3 axis	8398769,	Plastic modulus about 3 axis	83987,69
Moment of Inertia about 2 axis	1753022,4	Plastic modulus about 2 axis	26200,562
Shear area in 2 direction	564,	Radius of Gyration about 3 axis	80,663
Shear area in 3 direction	528,	Radius of Gyration about 2 axis	36,8519

General Section

Section Name |e 200x100x25x3

Section Notes

Properties Property Modifiers Material + ABNT-5004-Q35

Property Data N, mm, C

Section Name |e 200x100x25x3

Properties

Cross-section (axial) area	2582,	Section modulus about 3 axis	168220,
Torsional constant	0,	Section modulus about 2 axis	63310,
Moment of Inertia about 3 axis	16821600	Plastic modulus about 3 axis	0,
Moment of Inertia about 2 axis	6330600,	Plastic modulus about 2 axis	0,
Shear area in 2 direction	1128,	Radius of Gyration about 3 axis	80,7
Shear area in 3 direction	1056,	Radius of Gyration about 2 axis	49,5

Cold Formed C Section

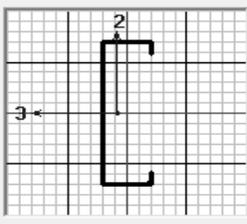
Section Name |Ue 300x85x25x2

Section Notes

Properties Property Modifiers Material + ABNT-5004-Q35

Dimensions

Outside Height (A')	300,
Outside Width (B')	85,
Thickness (t)	2,
Radius (R)	2,
Lip Depth (C')	25,



Property Data N, mm, C

Section Name |Ue 300x85x25x2

Properties

Cross-section (axial) area	1013,6991	Section modulus about 3 axis	89072,6
Torsional constant	1351,5988	Section modulus about 2 axis	14919,798
Moment of Inertia about 3 axis	13360890	Plastic modulus about 3 axis	89072,6
Moment of Inertia about 2 axis	939493,5	Plastic modulus about 2 axis	14919,798
Shear area in 2 direction	584,	Radius of Gyration about 3 axis	114,8056
Shear area in 3 direction	308,	Radius of Gyration about 2 axis	30,4433

General Section

Section Name: L-90x3

Section Notes:

Properties:

Property Modifiers:

Material: + ABNT-5004-Q35

Property Data

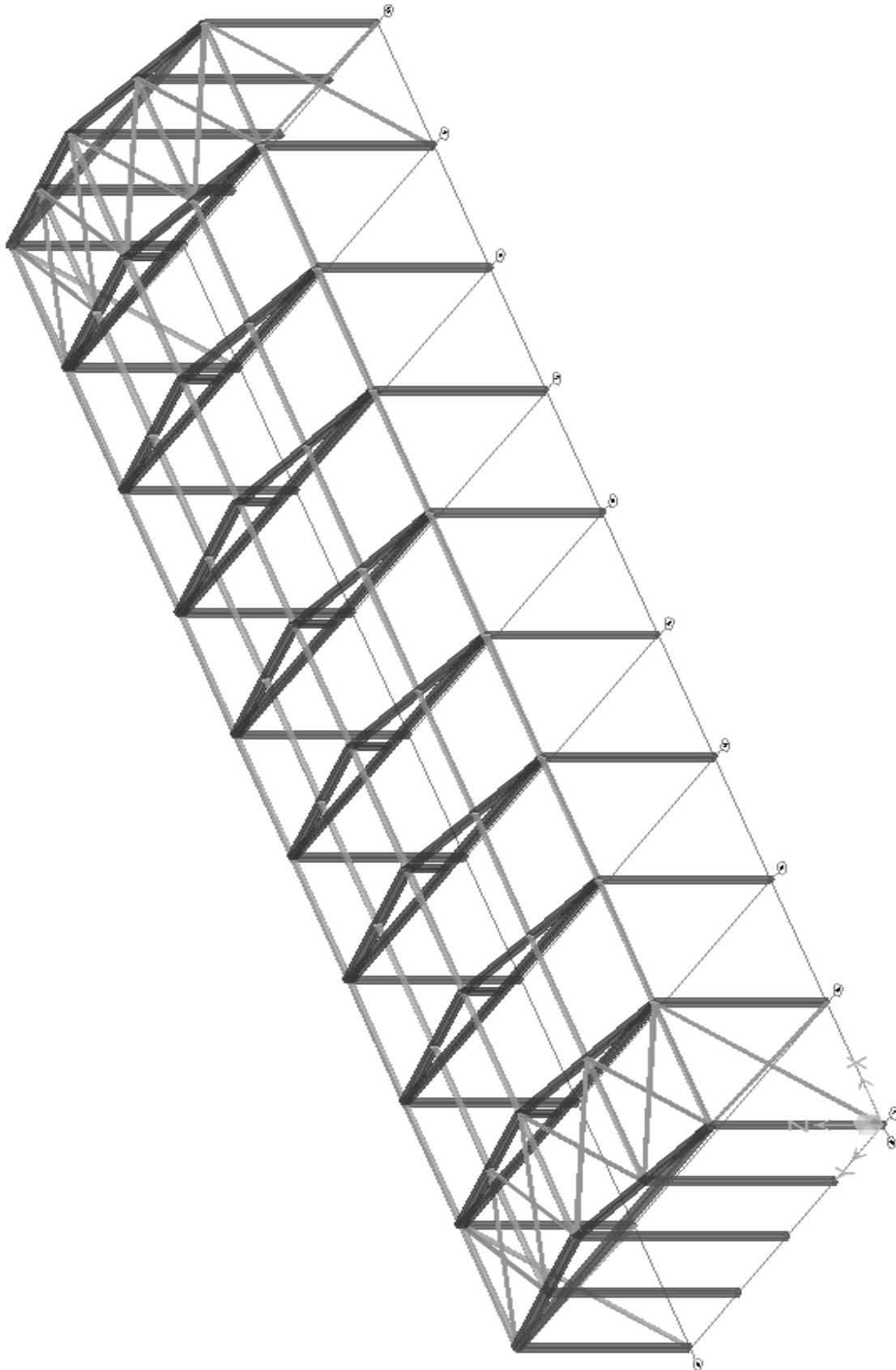
Section Name: L-90x3

Properties:

Cross-section (axial) area	525.	Section modulus about 3 axis	10900.
Torsional constant	0.	Section modulus about 2 axis	5240.
Moment of Inertia about 3 axis	693300.	Plastic modulus about 3 axis	0.
Moment of Inertia about 2 axis	167600.	Plastic modulus about 2 axis	0.
Shear area in 2 direction	250.	Radius of Gyration about 3 axis	36,3
Shear area in 3 direction	250.	Radius of Gyration about 2 axis	17,9

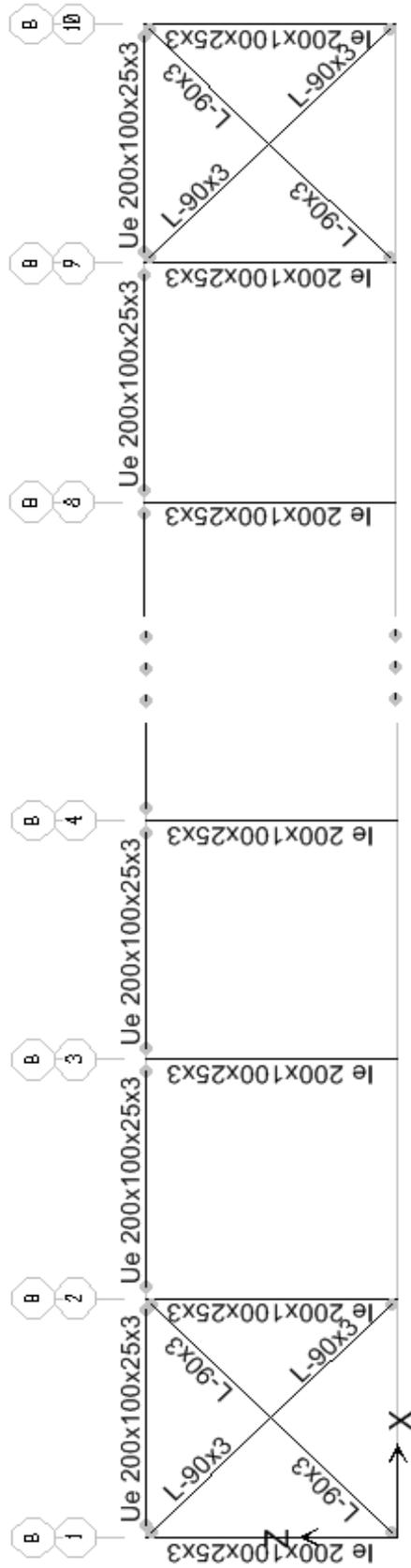
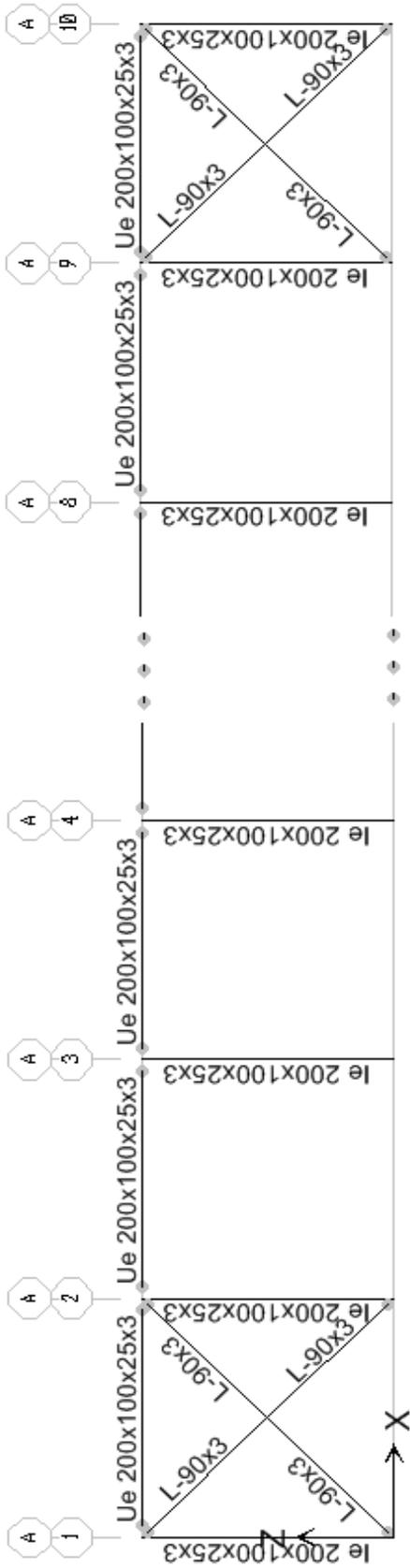
EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev	0	22	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

6.3.3. GEOMETRIA E PERFIS ESTRUTURAIS



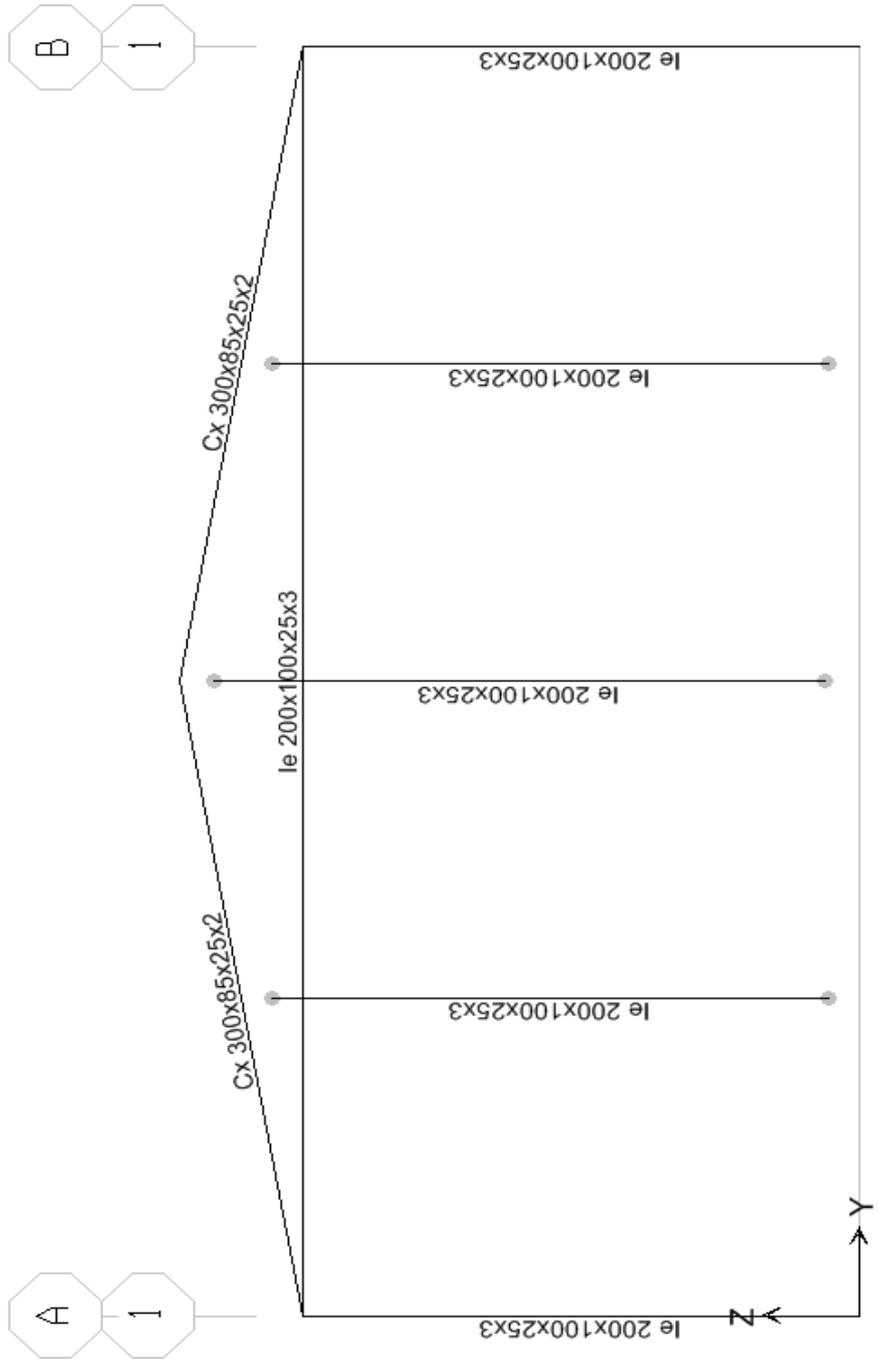
MODELO DE CÁLCULO - VISTA GERAL

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO				Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0		23	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR		



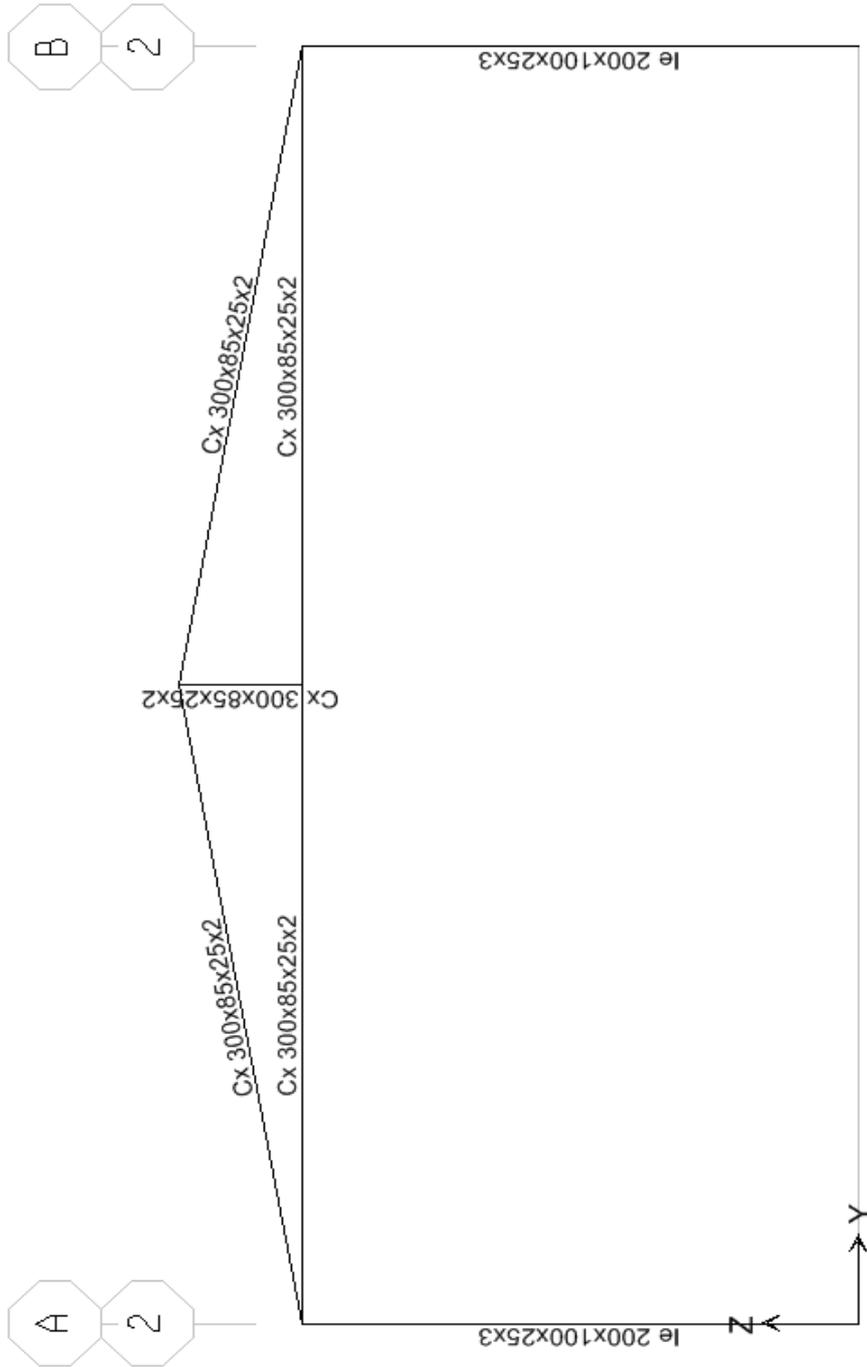
MODELO DE CÁLCULO - ELEVAÇÃO LATERAL - PERFIS ESTRUTURAIS

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			24
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			



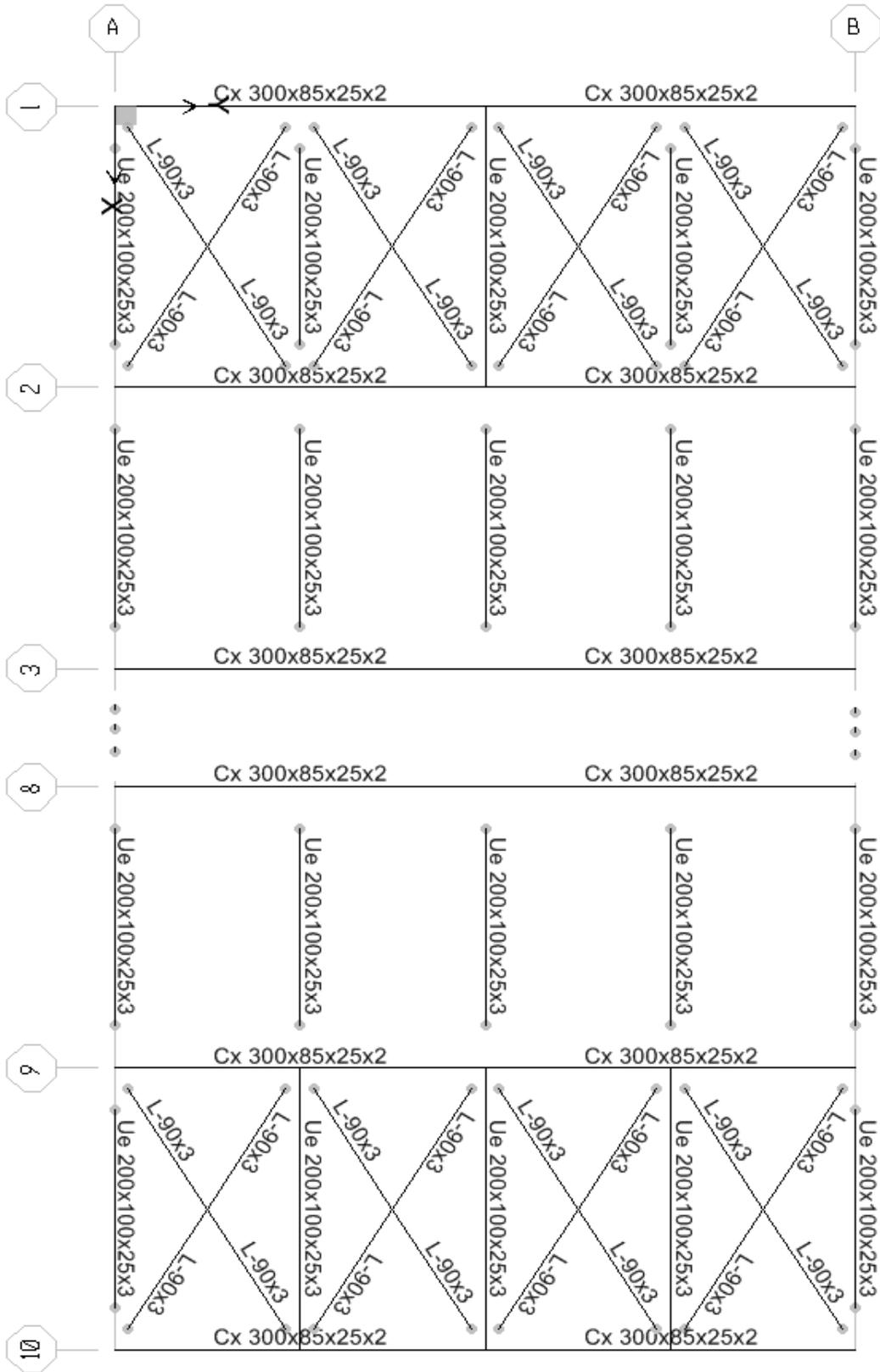
MODELO DE CÁLCULO - ELEVACÃO FRONTAL - PERFIS ESTRUTURAIS

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	25
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	



MODELO DE CÁLCULO - ELEVÇÃO EIXOS 2 A 9 - PERFIS ESTRUTURAS

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO					Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0		26	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

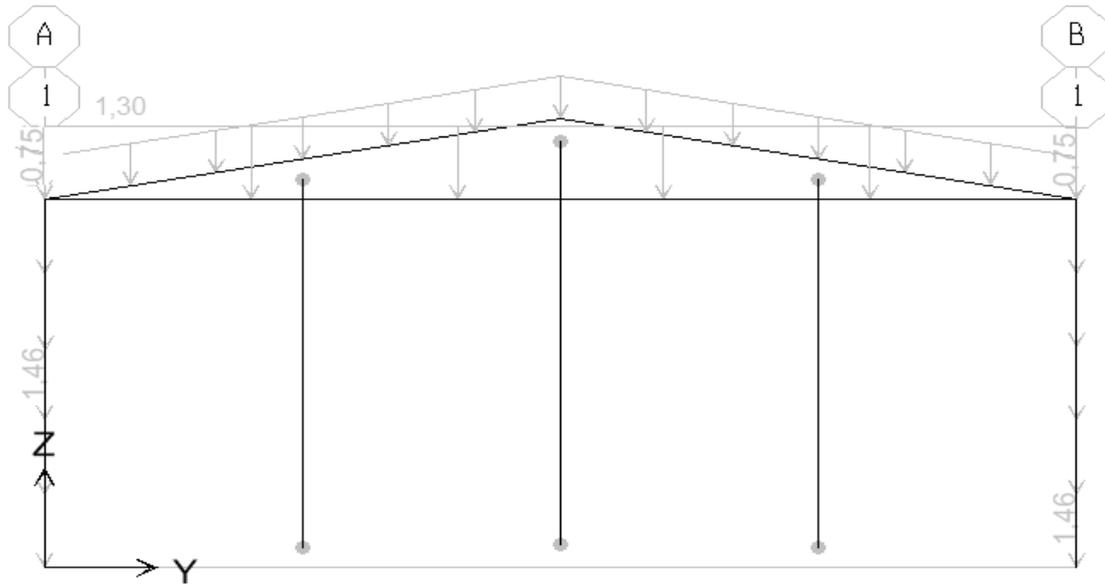


MODELO DE CÁLCULO DE COBERTURA - PERFIS ESTRUTURAIS

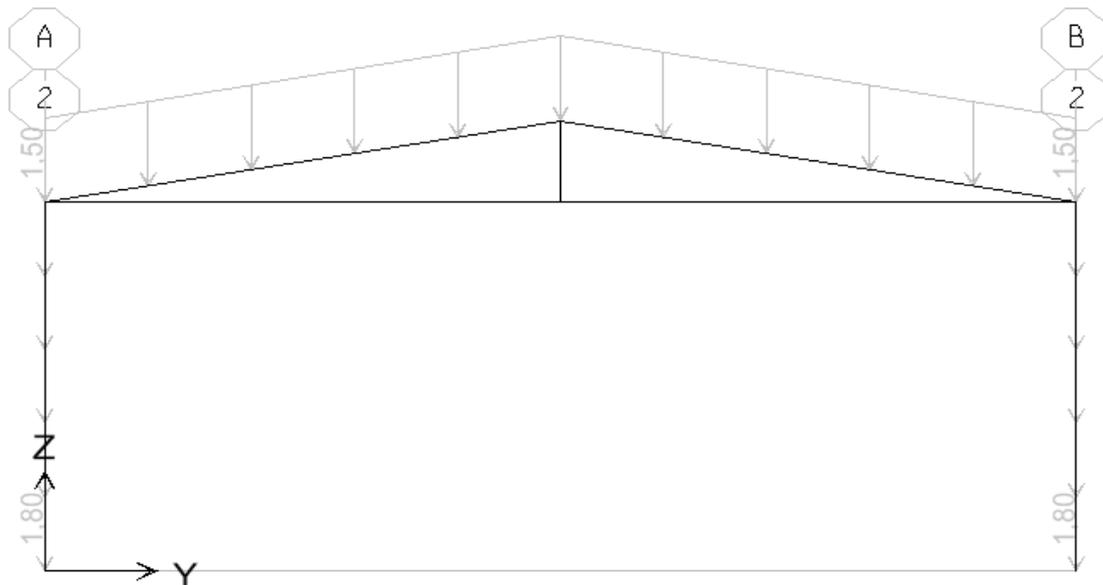
EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			27
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

6.3.4. CARREGAMENTO DO MODELO

As cargas foram aplicadas no modelo SAP conforme tabelado no item 5.4, sendo aqui destacados os pórticos dos eixos 1 e 2, que são os de maior carregamento.

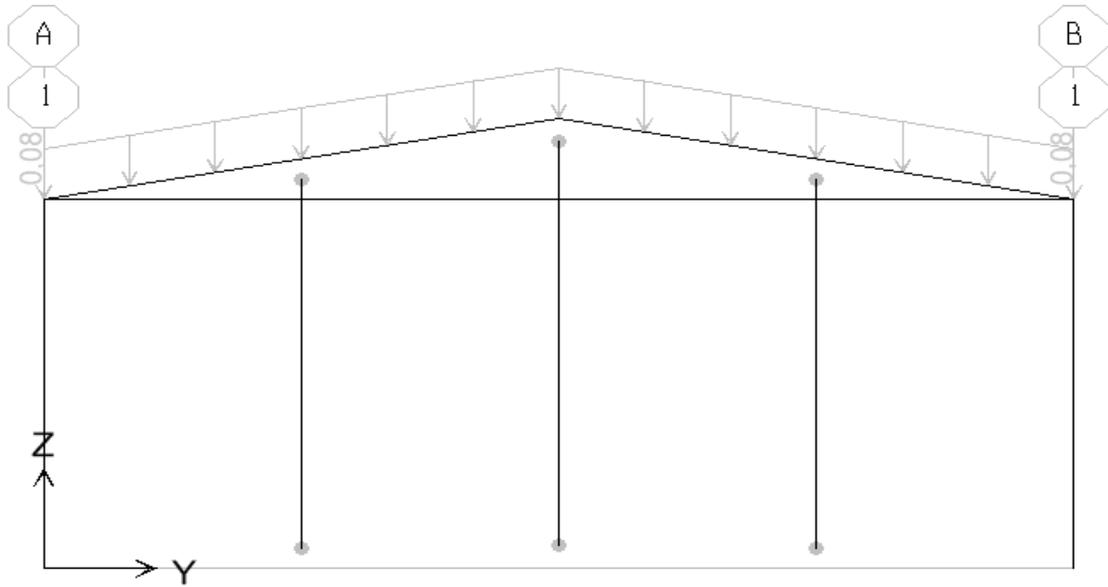


EIXO 1 - CARGA PERMANENTE (CP) - N/mm

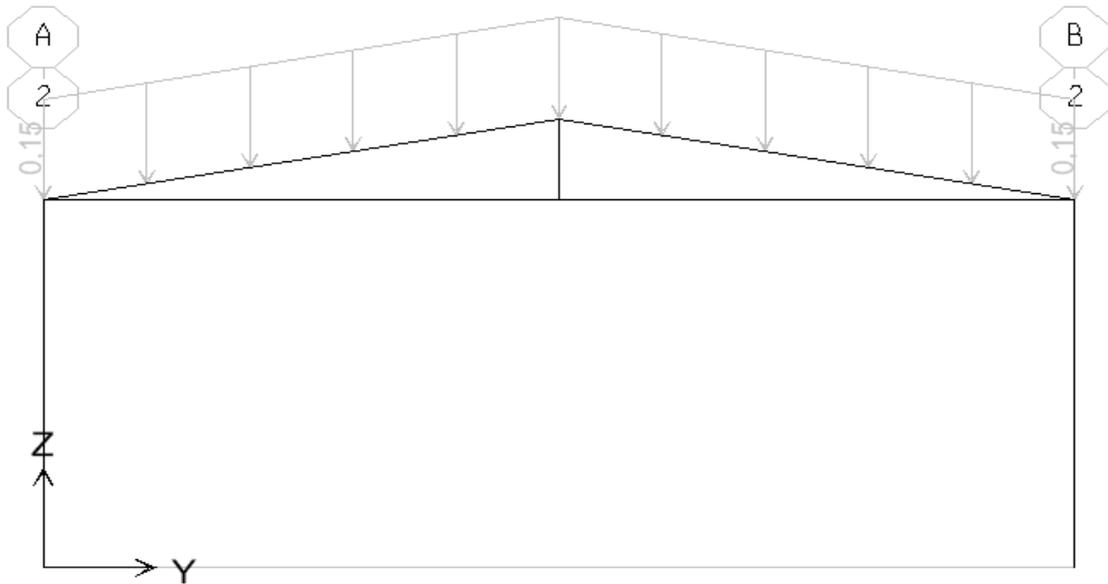


EIXO 2 - CARGA PERMANENTE (CP) - N/mm

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	28
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

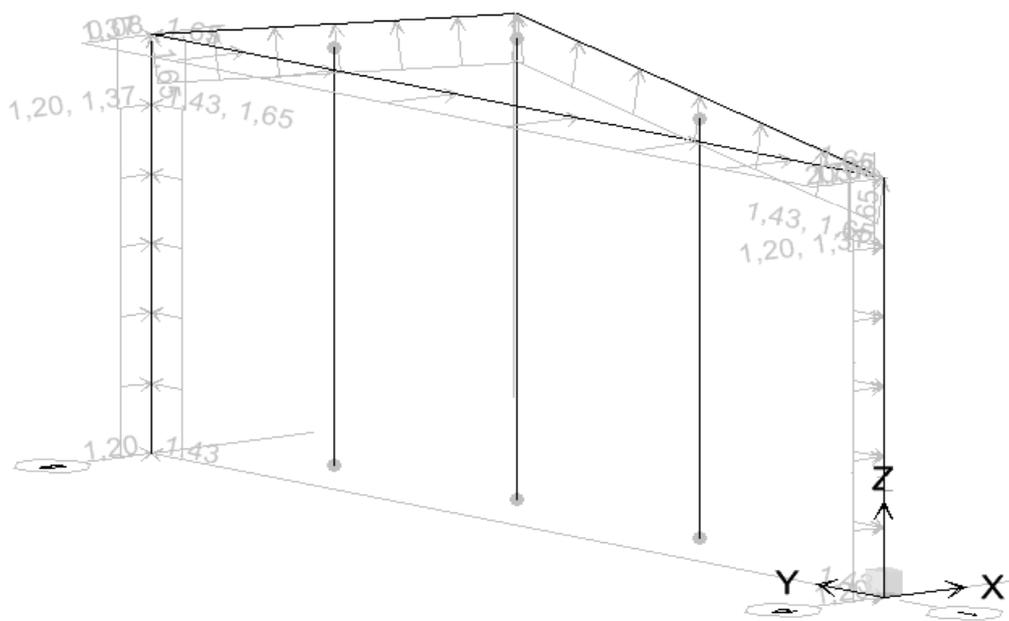
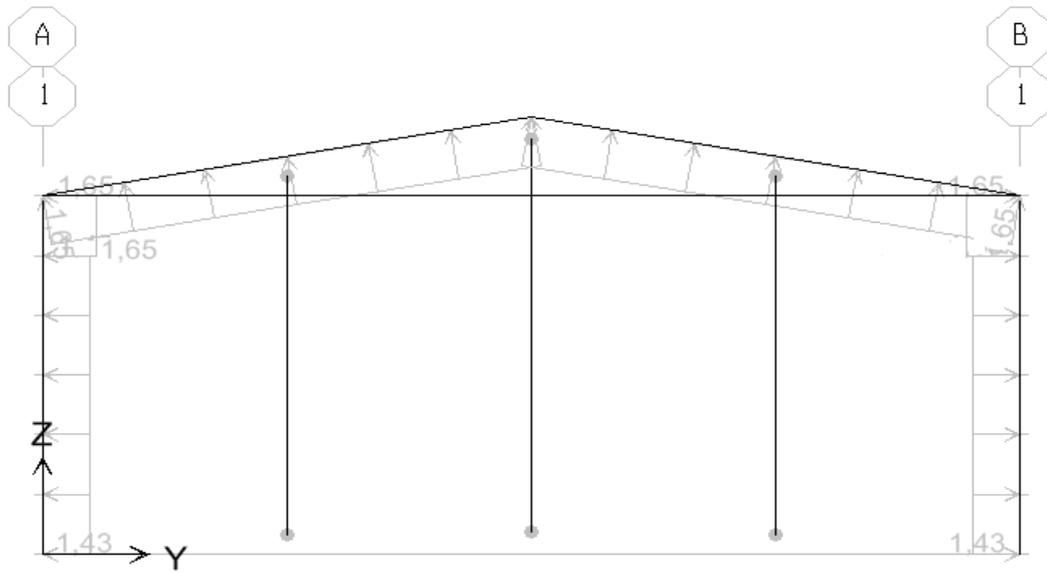


EIXO 1 - SOBRECARGA NA COBERTURA (SC) - N/mm



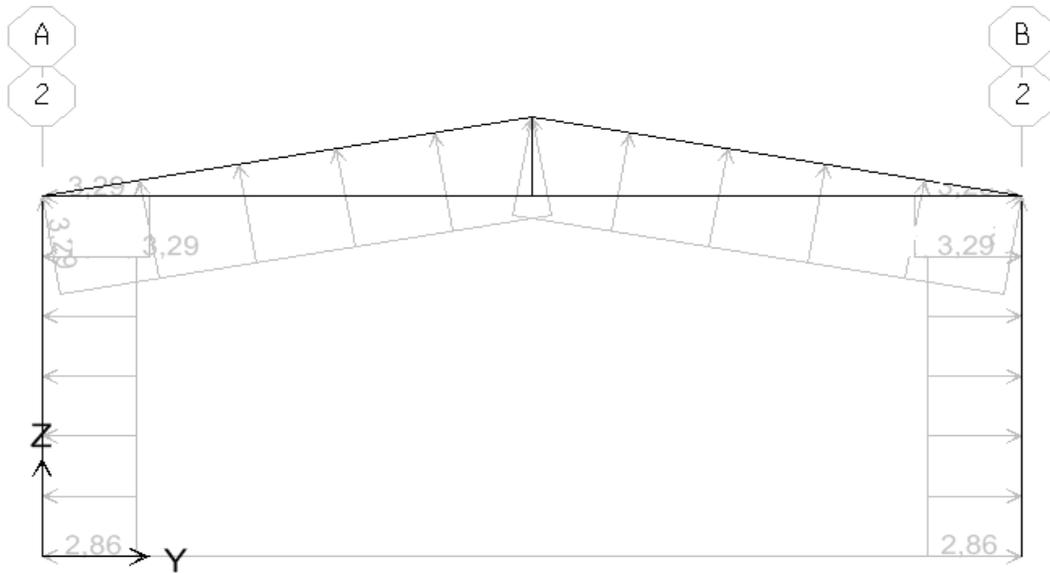
EIXO 2 - SOBRECARGA NA COBERTURA (SC) - N/mm

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			29
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

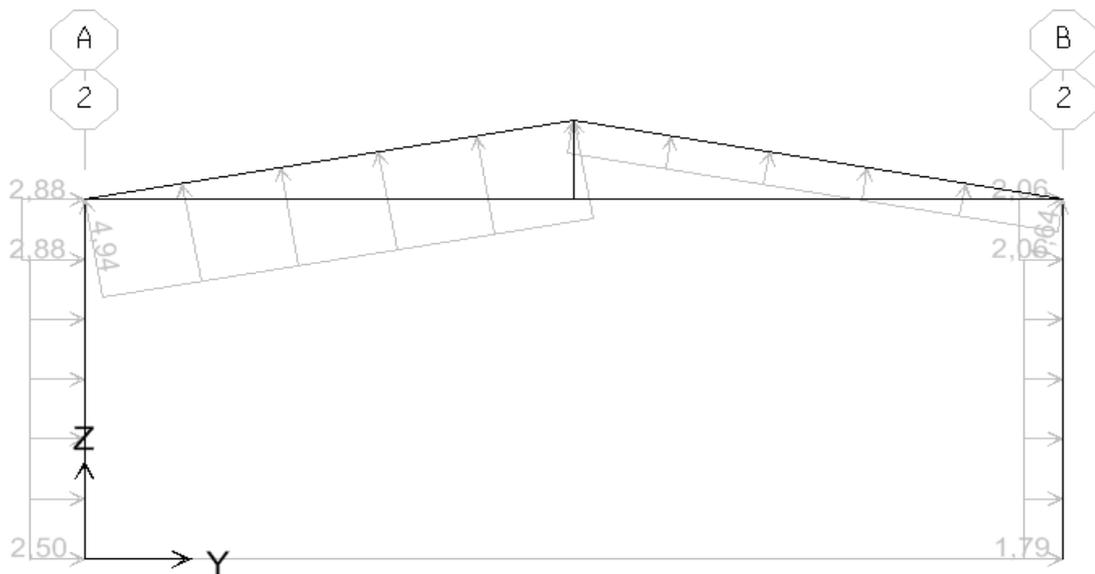


EIXO 1 - VENTO A 0° (VX) - N/mm

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			30
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

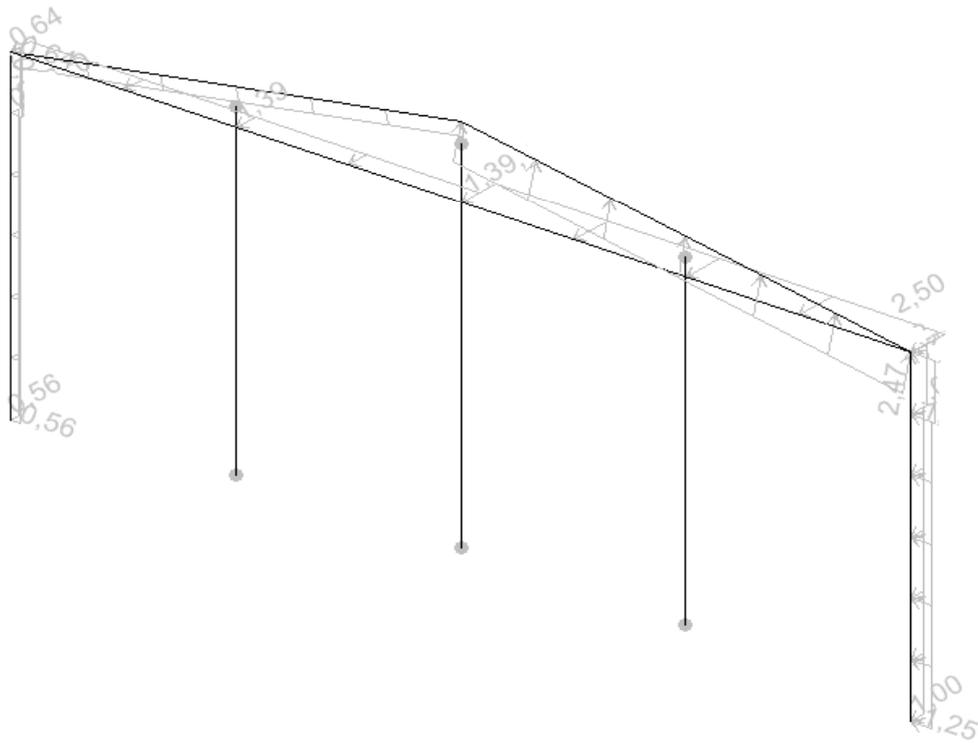
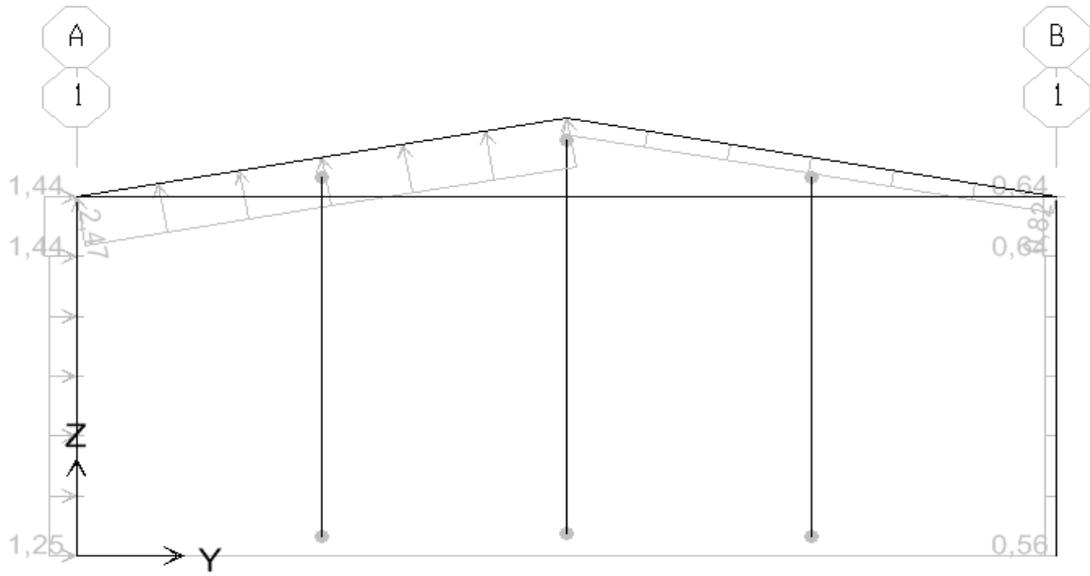


EIXO 2 - VENTO A 0° (VX) - N/mm



EIXO 2 - VENTO A 90° (VY) - N/mm

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 31
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			



EIXO 1 - VENTO A 90° (VY) - N/mm

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 32
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

6.4. ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE CONFORME NBR-8800

Análise comparativa entre os deslocamentos com análise linear e com análise de 2ª Ordem, para todos os carregamentos ELU.

No SAP foi feita combinação "envelope" dos carregamentos ELU, sendo comparados os máximos deslocamentos nos topos das colunas.

TABLE: Joint Displacements							
Joint	OutputCase	StepType	U1 mm	U2 mm	U3 mm	B1x	B1y
1A	deslocabilidade-ANL	Max	5,39	20,94	-0,03	1,06	1,02
	deslocabilidade-AL	Max	5,11	20,43	-0,03		
1B	deslocabilidade-ANL	Max	5,48	20,93	-0,03	1,01	1,03
	deslocabilidade-AL	Max	5,44	20,32	-0,03		
2A	deslocabilidade-ANL	Max	4,75	21,32	0,23	1,08	1,01
	deslocabilidade-AL	Max	4,38	21,02	0,19		
2B	deslocabilidade-ANL	Max	4,88	21,18	0,02	1,03	1,03
	deslocabilidade-AL	Max	4,72	20,53	-0,02		
3A	deslocabilidade-ANL	Max	4,77	30,90	0,26	1,10	0,98
	deslocabilidade-AL	Max	4,34	31,44	0,26		
3B	deslocabilidade-ANL	Max	4,92	30,92	0,10	1,05	1,01
	deslocabilidade-AL	Max	4,69	30,63	0,10		
4A	deslocabilidade-ANL	Max	4,77	31,12	0,26	1,11	0,99
	deslocabilidade-AL	Max	4,30	31,44	0,26		
4B	deslocabilidade-ANL	Max	4,94	31,14	0,05	1,05	1,02
	deslocabilidade-AL	Max	4,70	30,63	0,05		
5A	deslocabilidade-ANL	Max	4,77	31,13	0,26	1,12	0,99
	deslocabilidade-AL	Max	4,24	31,44	0,26		
5B	deslocabilidade-ANL	Max	4,95	31,15	0,05	1,05	1,02
	deslocabilidade-AL	Max	4,70	30,63	0,05		
6A	deslocabilidade-ANL	Max	4,75	31,13	0,26	1,14	0,99
	deslocabilidade-AL	Max	4,17	31,44	0,26		
6B	deslocabilidade-ANL	Max	4,95	31,15	0,03	1,05	1,02
	deslocabilidade-AL	Max	4,69	30,63	0,03		
7A	deslocabilidade-ANL	Max	4,73	31,12	0,26	1,16	0,99
	deslocabilidade-AL	Max	4,09	31,44	0,26		
7B	deslocabilidade-ANL	Max	4,94	31,14	0,03	1,06	1,02
	deslocabilidade-AL	Max	4,67	30,63	0,03		
8A	deslocabilidade-ANL	Max	4,69	30,88	0,26	1,16	0,98
	deslocabilidade-AL	Max	4,04	31,44	0,26		
8B	deslocabilidade-ANL	Max	4,92	30,85	0,03	1,06	1,01
	deslocabilidade-AL	Max	4,64	30,63	0,03		
9A	deslocabilidade-ANL	Max	4,64	20,57	0,22	1,17	1,11
	deslocabilidade-AL	Max	3,98	18,57	0,19		
9B	deslocabilidade-ANL	Max	4,89	18,98	0,01	1,06	1,11
	deslocabilidade-AL	Max	4,60	17,10	-0,01		
10A	deslocabilidade-ANL	Max	4,18	19,52	-0,06	1,17	1,15
	deslocabilidade-AL	Max	3,56	16,94	-0,08		
10B	deslocabilidade-ANL	Max	4,42	19,70	-0,17	1,06	1,10
	deslocabilidade-AL	Max	4,17	17,83	-0,27		

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 33
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov FCR			

$$\text{Max (2ª ordem / 1ª ordem)} = 1,17$$

Temos $B1x \leq 1,5$ e $B1y \leq 1,5$ no topo de todas as colunas e, portanto, a estrutura é de média deslocabilidade e deve ser calculada através de análise de segunda ordem.

6.5. CRITÉRIOS DE DESLOCAMENTOS DA NBR-14762

6.5.1. DESLOCAMENTO HORIZONTAL MÁXIMO

Conforme NBR-14762, tabela A.1, item "galpões em geral e edifícios de um pavimento":

$$DH_{adm} = \frac{H}{300} = \frac{6000}{300} = 20 \text{ mm}$$

Joint	OutputCase	StepType	U1 mm	U2 mm	U3 mm	DH _{,max} mm	
1A	deslocamento	Max	1,19	4,35	-0,10	4,5	OK
1B	deslocamento	Max	1,28	4,36	-0,10	4,5	OK
2A	deslocamento	Max	1,10	3,70	-0,21	3,9	OK
2B	deslocamento	Max	1,18	4,99	-0,25	5,1	OK
3A	deslocamento	Max	1,12	5,89	-0,20	6,0	OK
3B	deslocamento	Max	1,22	7,17	-0,23	7,3	OK
4A	deslocamento	Max	1,14	5,89	-0,20	6,0	OK
4B	deslocamento	Max	1,25	7,17	-0,24	7,3	OK
5A	deslocamento	Max	1,16	5,89	-0,20	6,0	OK
5B	deslocamento	Max	1,27	7,17	-0,24	7,3	OK
6A	deslocamento	Max	1,17	5,89	-0,20	6,0	OK
6B	deslocamento	Max	1,30	7,17	-0,25	7,3	OK
7A	deslocamento	Max	1,18	5,89	-0,20	6,0	OK
7B	deslocamento	Max	1,32	7,17	-0,25	7,3	OK
8A	deslocamento	Max	1,19	5,89	-0,20	6,0	OK
8B	deslocamento	Max	1,34	7,17	-0,25	7,3	OK
9A	deslocamento	Max	1,20	1,18	-0,21	1,7	OK
9B	deslocamento	Max	1,36	2,48	-0,25	2,8	OK
10A	deslocamento	Max	1,09	1,01	-0,14	1,5	OK
10B	deslocamento	Max	1,24	1,99	-0,27	2,3	OK

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 34
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov FCR			

6.5.2. DESLOCAMENTO VERTICAL

Conforme NBR-14672, tabela A.1, item "galpões em geral e edifícios de um pavimento":

$$DV_{adm} = \frac{L}{250} = \frac{15000}{250} = 60 \text{ mm}$$

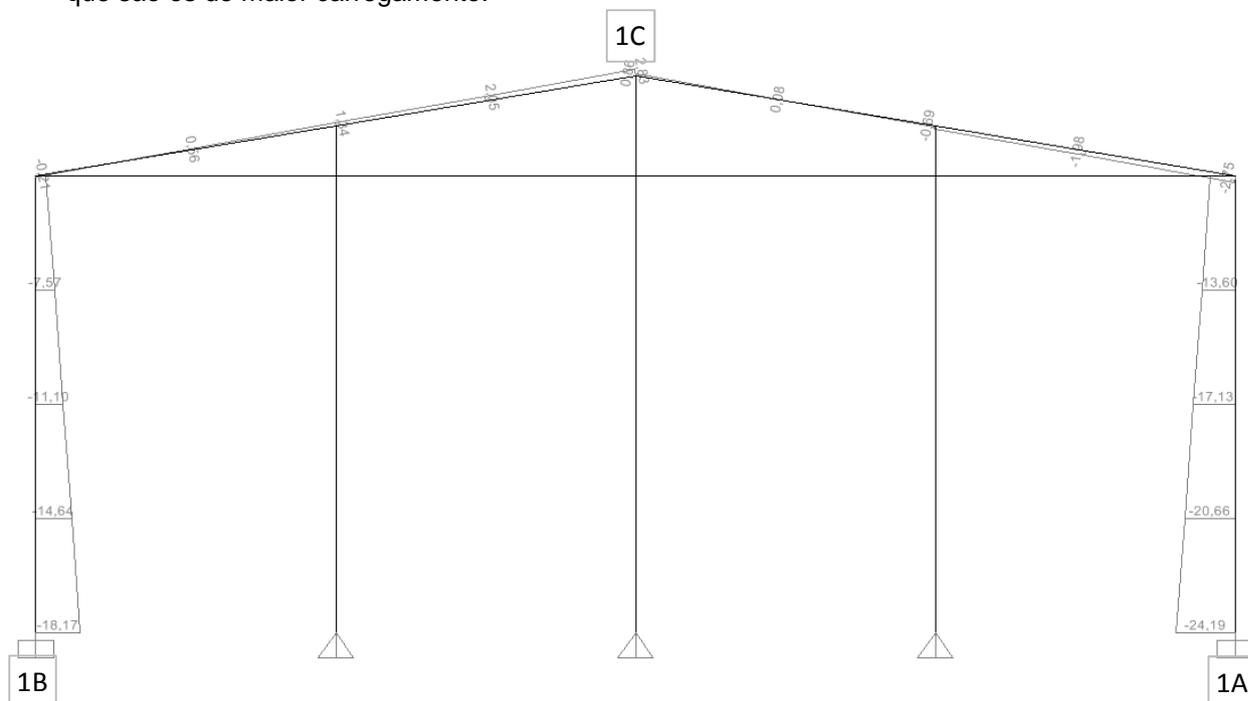
Ponto C correspondente ao topo da tesoura (cumeeira)

TABLE: Joint Displacements						
Joint	OutputCase	StepType	U1 mm	U2 mm	U3 mm	DV _{,max} mm
1C	deslocamento	Max	2,85	4,36	-0,13	-0,17
		Min	0,73	0,02	-0,17	
2C	deslocamento	Max	2,77	4,34	-7,98	-13,69
		Min	0,71	-0,06	-13,69	
3C	deslocamento	Max	2,69	6,53	-7,80	-13,77
		Min	0,70	0,00	-13,77	
4C	deslocamento	Max	2,61	6,53	-7,80	-13,77
		Min	0,69	0,00	-13,77	
5C	deslocamento	Max	2,53	6,53	-7,80	-13,77
		Min	0,68	0,00	-13,77	
6C	deslocamento	Max	2,44	6,53	-7,80	-13,77
		Min	0,67	0,00	-13,77	
7C	deslocamento	Max	2,35	6,53	-7,80	-13,77
		Min	0,66	0,00	-13,77	
8C	deslocamento	Max	2,26	6,53	-7,80	-13,77
		Min	0,63	0,00	-13,77	
9C	deslocamento	Max	2,17	1,83	-8,03	-13,65
		Min	0,52	-3,08	-13,65	
10C	deslocamento	Max	2,07	1,70	-6,72	-8,24
		Min	0,42	-3,22	-8,24	

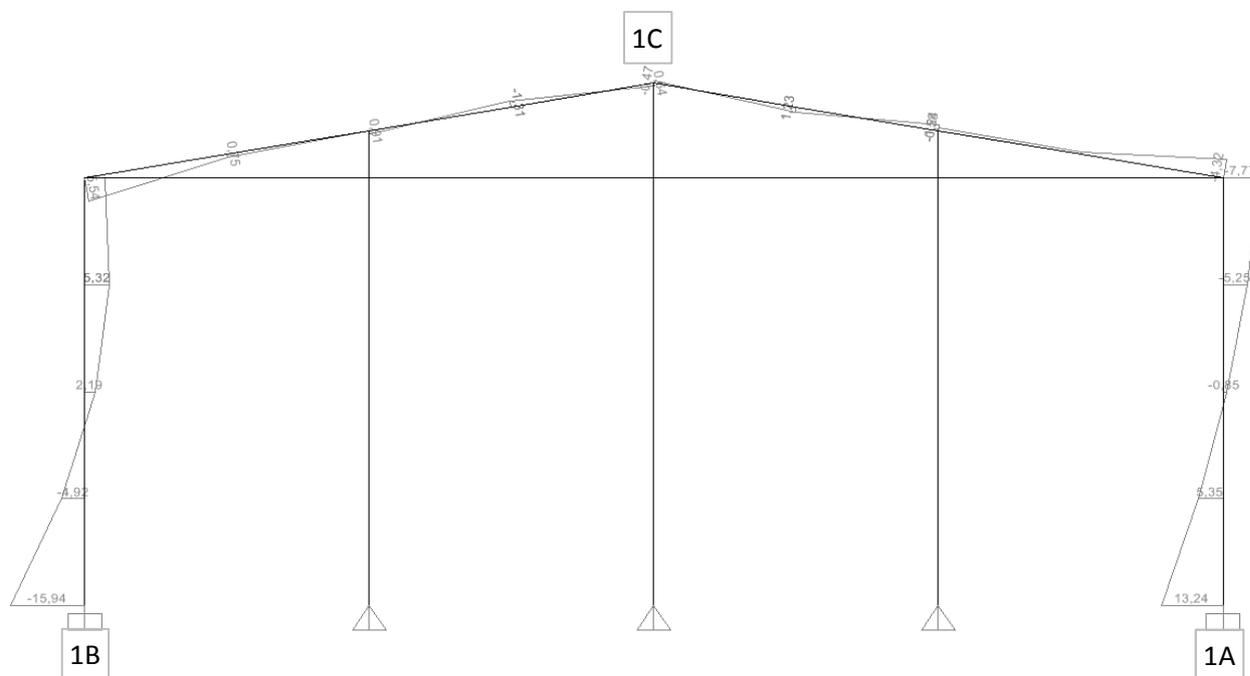
EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			35
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

6.6. SOLICITAÇÕES DE CÁLCULO DAS BARRAS

São mostrados os maiores esforços de cálculo dos pórticos, referentes aos pórticos dos eixos 1 e 2, que são os de maior carregamento.

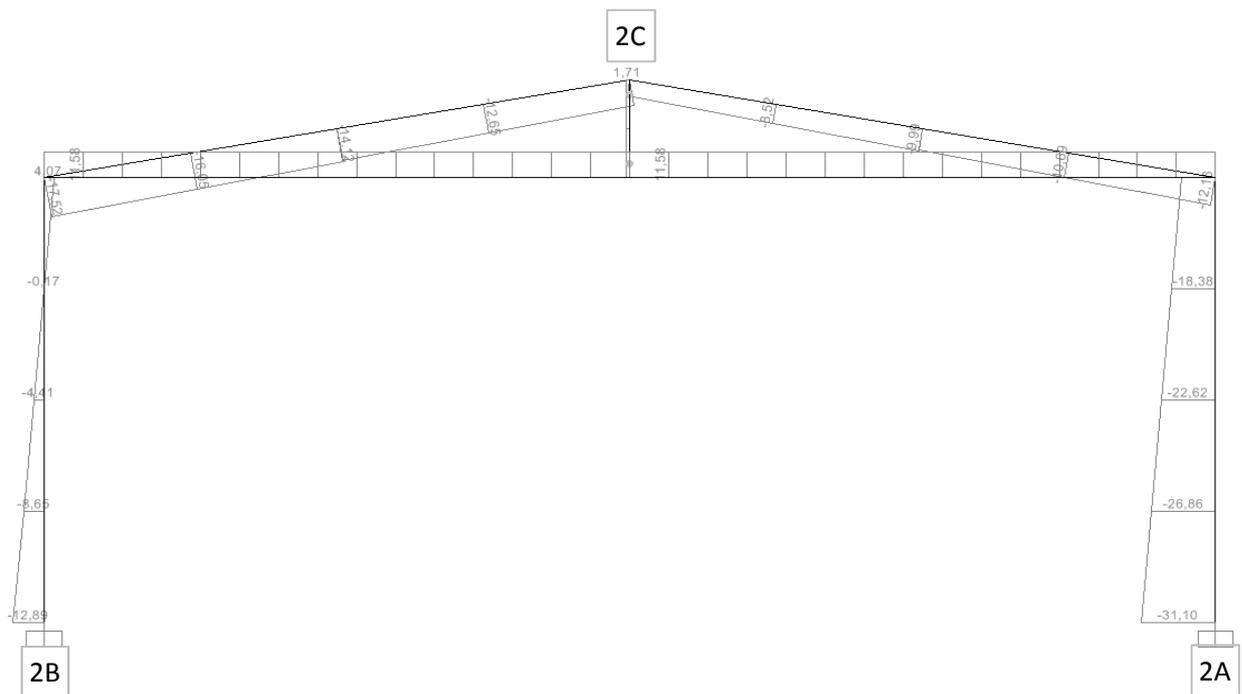


EIXO 1 - COMBINAÇÃO CP [VY+ SC]
ESFORÇO NORMAL (Nc,sd) - kN

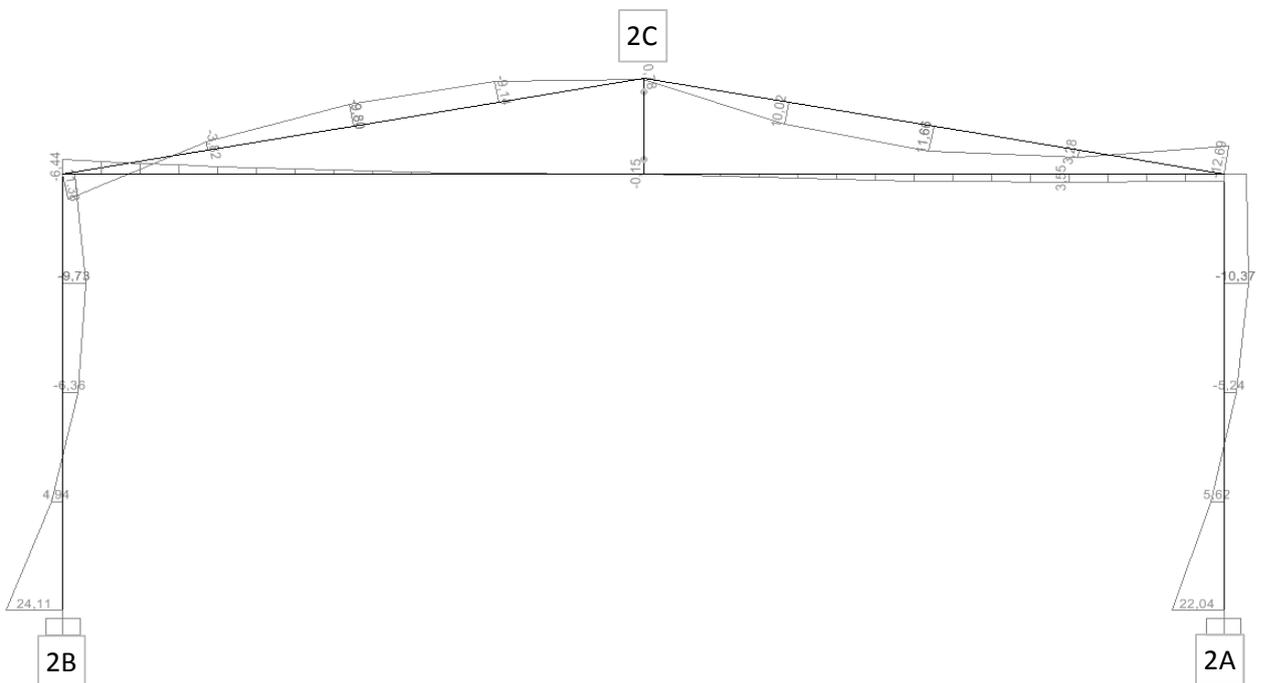


EIXO 1 - COMBINAÇÃO CP [VY+ SC]
MOMENTO FLETOR (Mx,sd) - kN.m

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			36
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

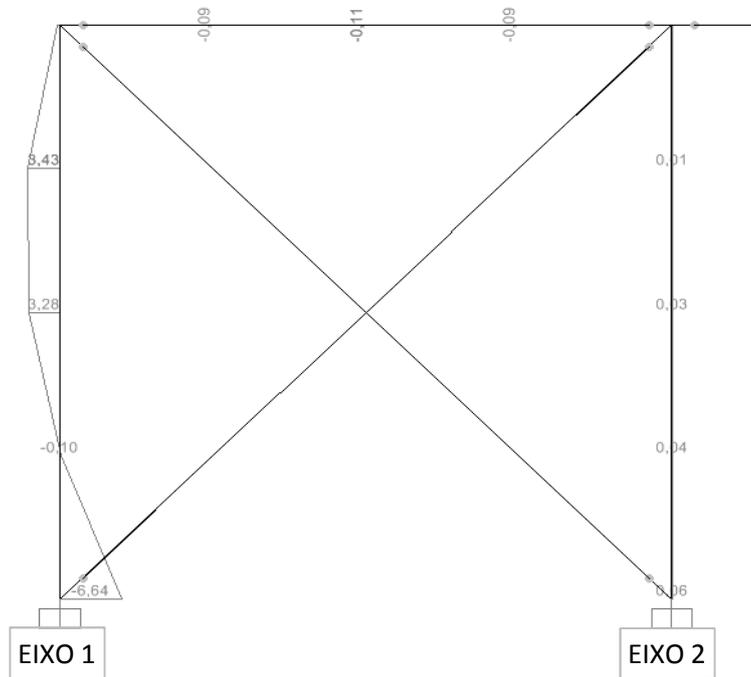


EIXO 2 - COMBINAÇÃO CP [VY+ SC]
ESFORÇO NORMAL (Nc,sd) - kN



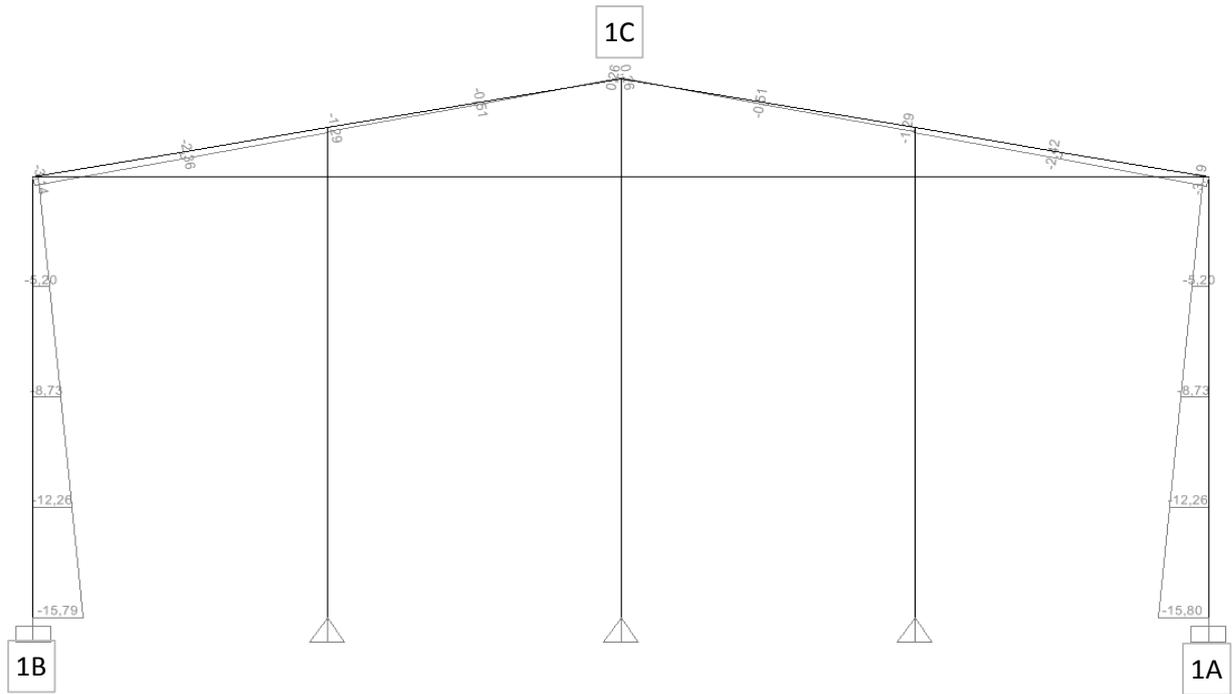
EIXO 2 - COMBINAÇÃO CP [VY+ SC]
MOMENTO FLETOR (Mx,sd) - kN.m

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	37
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

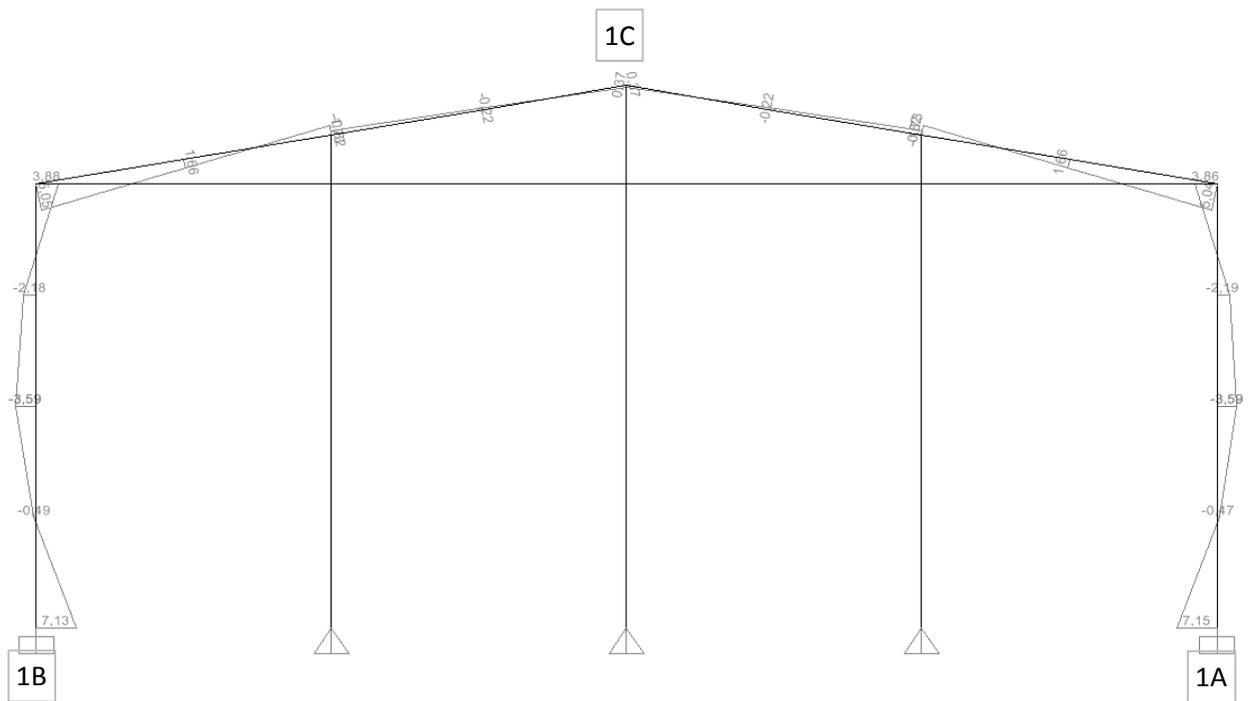


EIXOS 1 E 2 - COMBINAÇÃO CP [VY+ SC]
MOMENTO FLETOR (My,sd) - kN.m

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev	0	38	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

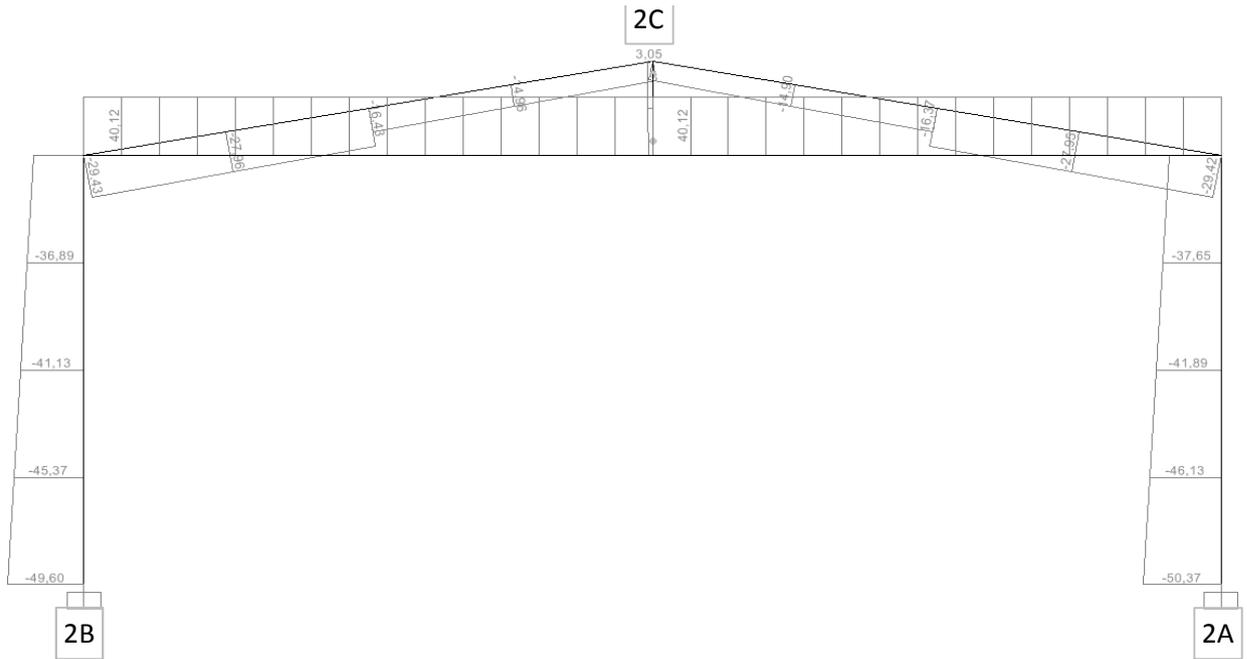


EIXO 1 - COMBINAÇÃO CP [VX+ SC]
ESFORÇO NORMAL (Nc,sd) - kN

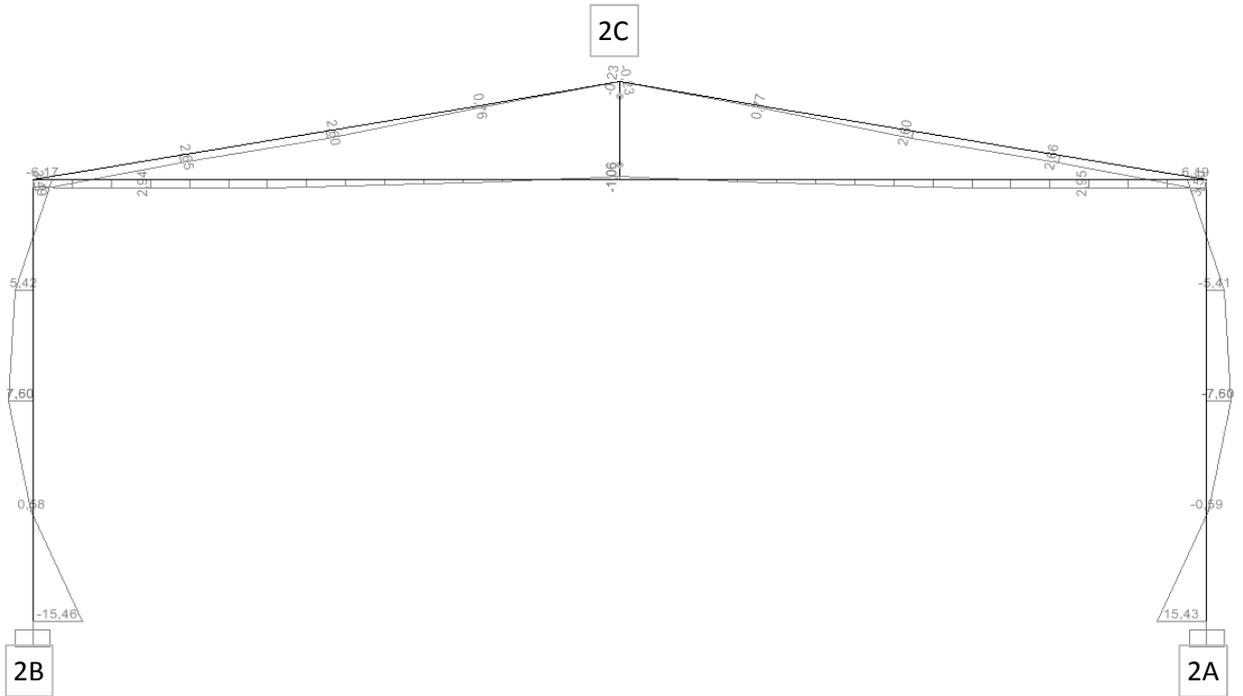


EIXO 1 - COMBINAÇÃO CP [VX+ SC]
MOMENTO FLETOR (Mx,sd) - kN.m

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			39
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

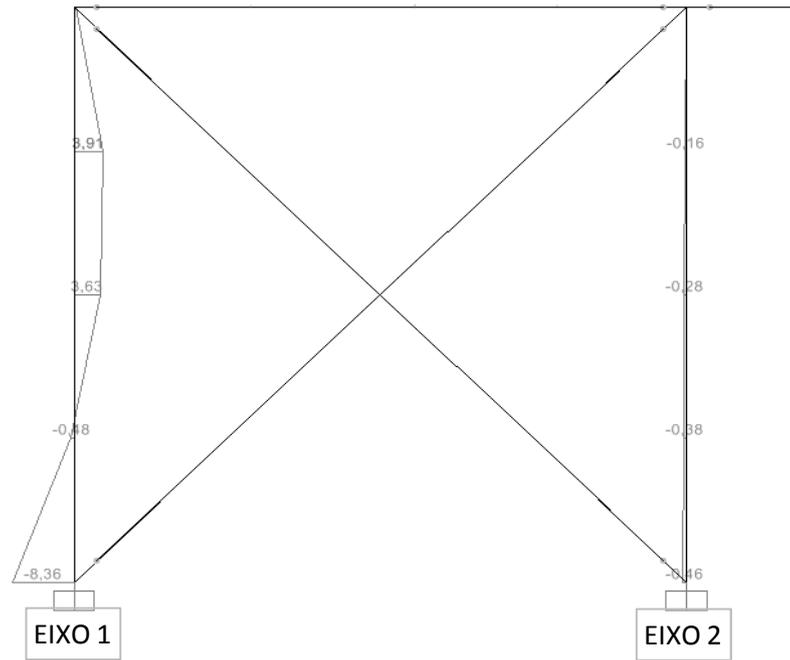


EIXO 2 - COMBINAÇÃO CP [VX+ SC]
ESFORÇO NORMAL (Nc,sd) - kN

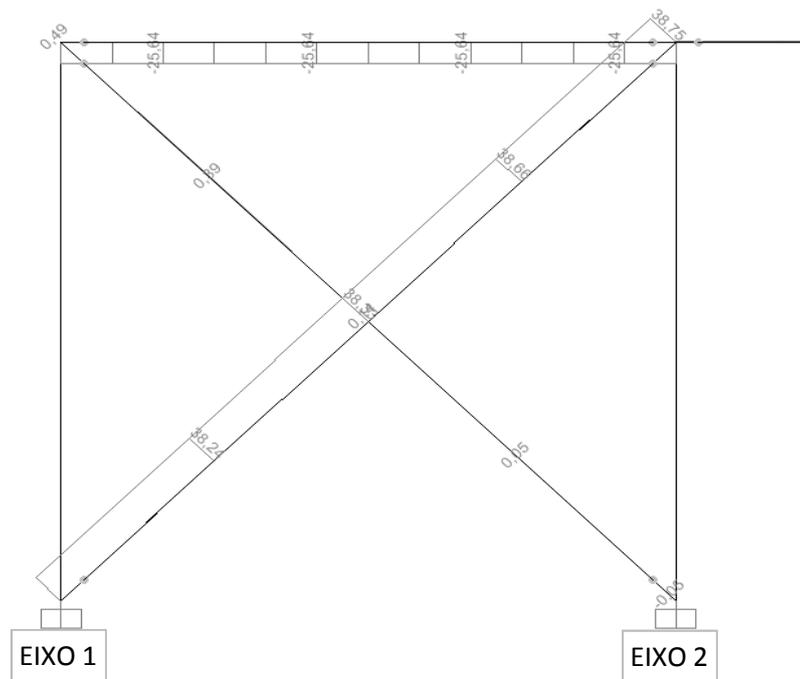


EIXO 2 - COMBINAÇÃO CP [VX+ SC]
MOMENTO FLETOR (Mx,sd) - kN.m

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			40
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			



EIXOS 1 E 2 - COMBINAÇÃO CP [VX+ SC]
MOMENTO FLETOR ($M_{y,sd}$) - kN.m



EIXOS 1 E 2 - COMBINAÇÃO CP [VX+ SC]
ESFORÇO NORMAL ($N_{c,sd}$) - kN

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 41
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

7. RESISTÊNCIA DE CÁLCULO DOS PERFIS

7.1. RESISTÊNCIA À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO ($N_{c,Rd}$) - PERFIL I

Cálculo da resistência à força axial de compressão conforme NBR-14762, item 9.7

A. Dados do perfil estrutural

Perfil: Ie 200 x 100 x 25 x 3,0

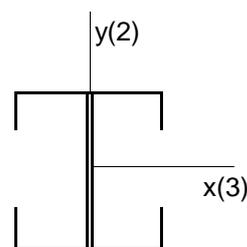
$$k_x \cdot L_x = 6000 \text{ mm}$$

$$k_y \cdot L_y = 6000 \text{ mm}$$

$$k_z \cdot L_z = 6000 \text{ mm}$$

Propriedades geométricas

	Ue 200x100x25x3	Ie 200x200x25x3
A mm ²	1291	2582
I _x = I ₃ mm ⁴	8410800	16821600
W _x = W ₃ mm ³	84110	168220
r _x = r ₃ mm	80,7	80,7
I _y = I ₂ mm ⁴	1751700	6330600
W _y = W ₂ mm ³	26180	63310
r _y = r ₂ mm	36,8	49,5
J mm ⁴	3870	7740
C _w mm ⁶	14970330000	59881340000
r _o mm	118,4	94,7



Material: Chapa fina a quente de aço-carbono, norma ABNT NBR 5004, grau Q-35

Tensão de escoamento..... fy = 340 MPa

Tensão de ruptura..... fu = 450 MPa

Módulo de elasticidade..... E = 200000 MPa

Módulo de elasticidade transversal..... G = 77000 MPa

B. Relação largura-espessura (NBR-14762, tabela 4):

$$\text{Elemento 1 (AA): } \frac{b_w}{t} = \frac{188,00}{3,00} = 62,7 \leq 250 \Rightarrow \text{ok}$$

$$\text{Elemento 2 (AA): } \frac{b_f}{t} = \frac{88,00}{3,00} = 29,3 \leq 60 \Rightarrow \text{ok}$$

$$\text{Elemento 3 (AL): } \frac{D}{t} = \frac{19,00}{3,00} = 6,3 \leq 30 \Rightarrow \text{ok}$$

C. Limitação de esbeltez (NBR-14762, item 9.7.4):

$$\lambda_x = 74,349 \leq 200 \Rightarrow \text{ok}$$

$$\lambda_y = 121,21 \leq 200 \Rightarrow \text{ok}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 42
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

D. Tensão de flambagem global por flexão ou torção em perfil duplamente simétrico:

$$\left. \begin{array}{l} N_{ex} = 922,3 \text{ kN} \\ N_{ey} = 347,1 \text{ kN} \\ N_{ez} = 432,8 \text{ kN} \end{array} \right\} N_e = 347,1 \text{ kN}$$

$$\lambda_o = 1,6 > 1,5$$

$$\chi = 0,35$$

$$\sigma = \chi \cdot f_y = 117,9 \text{ MPa}$$

E. Determinação da área efetiva:

E.1. Flambagem local pelo método da largura efetiva (MLE):

a) Elemento 1 - Alma

$$t = 3,00 \text{ mm}$$

$$b_w = 188,00 \text{ mm}$$

$$k = 4,0 \quad (\text{tabela 4.2, caso "a"})$$

$$\lambda_p = 0,80 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{Alma flamba local}$$

$$b_{ef} = 170,27 \text{ mm}$$

b) Elemento 2 - Aba com enrijecedor simples a 90°

$$t = 3,00 \text{ mm}$$

$$D = 25,00 \text{ mm}$$

$$b_f = 88,00 \text{ mm}$$

$$d = 19,00 \text{ mm}$$

$$\lambda_{po} = 1,14 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{Aba sem enrijecedor flamba local}$$

$$I_s = 1714,75 \text{ mm}^4$$

$$I_a \leq \begin{cases} 386,75 \text{ mm}^4 \\ 5590,48 \text{ mm}^4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad I_a = 386,75 \text{ mm}^4$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{1714,75}{386,75} = 4,43 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_s}{I_a} = 1,00$$

$$n = \begin{cases} 0,4425 \\ \geq 0,33 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad n = 0,443 \text{ mm}^4$$

$$\frac{D}{b} = \begin{cases} 0,284 \\ \leq 0,80 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} D/b = 0,284 \\ 0,25 < D/b \leq 0,80 \end{array}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO							Folha 43
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL					Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	Aprov	

$$k = \begin{cases} 3,830 \\ \leq 4 \end{cases} \Rightarrow k = 3,830$$

$$\lambda_p = 0,38 \leq 0,673 \Rightarrow \text{aba com enrijecedor não flamba local}$$

$$b_{ef} = 88,0 \text{ mm}$$

c) Elemento 3 - enrijecedor a 90°

$$t = 3,00 \text{ mm}$$

$$d = 19,00 \text{ mm}$$

$$k = 0,43 \quad (\text{tabela 4.3, caso "a"})$$

$$\lambda_p = 0,25 \leq 0,673 \Rightarrow \text{enrijecedor não flamba local}$$

$$d_{ef} = 19,00 \text{ mm}$$

$$d_s = 19,00 \text{ mm}$$

d) Área efetiva (MLE)

$$A_g = 2582,0 \text{ mm}^2$$

$$A_{inef-1} = 53,2 \text{ mm}^2 \quad (x2)$$

$$A_{inef-2} = 0 \text{ mm}^2 \quad (x2)$$

$$A_{inef-3} = 0 \text{ mm}^2 \quad (x2)$$

$$A_{ef-LE} = 2475,6 \text{ mm}^2$$

E.2. Flambagem local pelo método da seção efetiva (MSE):

Conforme NBR-14762, tabelas 9 e 10, caso "b":

$$\left. \begin{aligned} \eta = \frac{b_f}{b_w} = 0,50 \\ \eta' = \frac{D}{b_w} = 0,13 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\Rightarrow 0,1 \leq \eta \leq 1,0 \\ &\Rightarrow 0,1 \leq \eta' \leq 0,3 \\ &\Rightarrow K_t = 5,45 \end{aligned}$$

$$N_t = 572,32 \text{ kN}$$

$$\lambda_p = 0,73 > 0,673 \Rightarrow \text{seção flamba local}$$

$$A_{ef-SE} = 2582,0 \text{ mm}^2$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 44
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	Aprov

F. Flambagem distorcional

F.1. Conforme NBR-14762, tabela 11:

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= \frac{b_{ef}}{b_w} = 0,50 \\ n_2 &= \frac{b_w}{t} = 66,7 \end{aligned} \right\} \Rightarrow n_3 = \frac{D}{b_w} \geq 0,09$$

$$n_3 = \frac{D}{b_w} = 0,13 \geq 0,09 \Rightarrow \text{perfil dispensa a verificação da flambagem distorcional}$$

F.2. Flambagem distorcional com programa CUSFM

Conforme mostrado no anexo E, item E.2.1, temos:

$$\chi_{dist} = 1,48 > 1 \Rightarrow \text{Não ocorre flambagem distorcional no regime elástico.}$$

G. Cálculo da resistência à força axial de compressão:

$$N_{C,Rd} \leq \left\{ \begin{aligned} N_{C,Rd-FT} &= \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = \frac{0,35 \times 2475,6 \times 340}{1,2} = 243,23 \text{ kN} \\ N_{C,Rd-dist} &= \frac{\chi_{dist} \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma} = \frac{1,48 \times 2582,0 \times 340}{1,2} = 1082,7 \text{ kN} \end{aligned} \right.$$

$$N_{C,Rd} = 243,23 \text{ kN}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 45
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

7.2. RESISTÊNCIA À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO ($N_{c,Rd}$)- PERFIL CAIXA

Cálculo da resistência à força axial de compressão conforme NBR-14762, item 9.7

A. Dados do perfil estrutural

Perfil: Cx 300 x 85 x 25 x 2,0

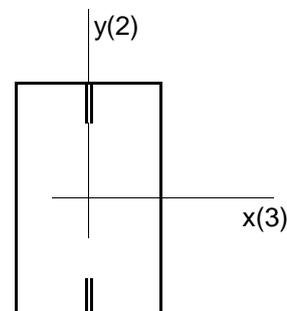
$$k_x \cdot L_x = 1,00 \times 7615,7 = 7615,7 \text{ mm}$$

$$k_y \cdot L_y = 7615,7 / 2 = 3807,8 \text{ mm}$$

$$k_z \cdot L_z = 7615,7 / 2 = 3807,8 \text{ mm}$$

Propriedades geométricas

	Ue 300x85x25x2	CX 300x170x25x2
A mm ²	1014	2027
I _x = I ₃ mm ⁴	13390900	26781700
W _x =W ₃ mm ³	89270	178540
r _x = r ₃ mm	114,9	114,9
I _y = I ₂ mm ⁴	938900	9916800
W _y =W ₂ mm ³	14910	116670
r _y = r ₂ mm	30,4	69,9
J mm ⁴	1350	2700
C _w mm ⁶	17055020000	68220070000
r _o mm	131,6	134,5



Material: Chapa fina a quente de aço-carbono, norma ABNT NBR 5004, grau Q-35

Tensão de escoamento..... fy = 340 MPa

Tensão de ruptura..... fu = 450 MPa

Módulo de elasticidade..... E = 200000 MPa

Módulo de elasticidade transversal..... G = 77000 MPa

B. Relação largura-espessura (NBR-14762, tabela 4):

$$\text{Elemento 1 (AA): } \frac{b_w}{t} = \frac{292,00}{2,00} = 146 \leq 250 \Rightarrow \text{ok}$$

$$\text{Elemento 2 (AA): } \frac{b_f}{t} = \frac{77,00}{2,00} = 38,5 \leq 60 \Rightarrow \text{ok}$$

$$\text{Elemento 3 (AL): } \frac{D}{t} = \frac{21,00}{2,00} = 10,5 \leq 30 \Rightarrow \text{ok}$$

C. Limitação de esbeltez (NBR-14762, item 9.7.4):

$$\lambda_x = 66,281 \leq 200 \Rightarrow \text{ok}$$

$$\lambda_y = 54,476 \leq 200 \Rightarrow \text{ok}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 46
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

D. Tensão de flambagem global por flexão ou torção em perfil duplamente simétrico:

$$\left. \begin{array}{l} N_{ex} = 911,5 \text{ kN} \\ N_{ey} = 1350,0 \text{ kN} \\ N_{ez} = 524,9 \text{ kN} \end{array} \right\} N_e = 524,9 \text{ kN}$$

$$\lambda_o = 1,1 < 1,5$$

$$\chi = 0,58$$

$$\sigma = \chi \cdot f_y = 196,26 \text{ MPa}$$

E. Determinação da área efetiva:

E.1. Flambagem local pelo método da largura efetiva (MLE):

a) Elemento 1 - Alma

$$t = 2,00 \text{ mm}$$

$$b_w = 292,00 \text{ mm}$$

$$k = 4,0 \quad (\text{tabela 4.2, caso "a"})$$

$$\lambda_p = 2,41 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{Alma flamba local}$$

$$b_{ef} = 110,22 \text{ mm}$$

b) Elemento 2 - Aba com enrijecedor simples a 90°

$$t = 2,00 \text{ mm}$$

$$D = 25,00 \text{ mm}$$

$$b_f = 77,00 \text{ mm}$$

$$d = 21,00 \text{ mm}$$

$$\lambda_{po} = 1,94 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{Aba sem enrijecedor flamba local}$$

$$I_s = 1543,50 \text{ mm}^4$$

$$I_a \leq \left\{ \begin{array}{l} 1483,2 \text{ mm}^4 \\ 1814,53 \text{ mm}^4 \end{array} \right. \quad \Rightarrow \quad I_a = 1483,25 \text{ mm}^4$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{1543,50}{1483,25} = 1,0 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_s}{I_a} = 1,00$$

$$n = \left\{ \begin{array}{l} 0,3458 \\ \geq 0,33 \end{array} \right. \quad \Rightarrow \quad n = 0,346 \text{ mm}^4$$

$$\frac{D}{b} = \left\{ \begin{array}{l} 0,325 \\ \leq 0,80 \end{array} \right. \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} D/b = 0,325 \\ 0,25 < D/b \leq 0,80 \end{array}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 47
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

$$k = \begin{cases} 3,627 \\ \leq 4 \end{cases} \Rightarrow k = 3,627$$

$$\lambda_p = 0,667 \leq 0,673 \Rightarrow \text{aba com enrijecedor não flamba local}$$

$$b_{ef} = 77,0 \text{ mm}$$

c) Elemento 3 - enrijecedor a 90°

$$t = 2,00 \text{ mm}$$

$$d = 21,00 \text{ mm}$$

$$k = 0,43 \quad (\text{tabela 4.3, caso "a"})$$

$$\lambda_p = 0,53 \leq 0,673 \Rightarrow \text{enrijecedor não flamba local}$$

$$d_{ef} = 21,00 \text{ mm}$$

$$d_s = 21,00 \text{ mm}$$

d) Área efetiva (MLE)

$$A_g = 2027,0 \text{ mm}^2$$

$$A_{inef-1} = 363,6 \text{ mm}^2 \quad (\text{x2})$$

$$A_{inef-2} = 0 \text{ mm}^2 \quad (\text{x2})$$

$$A_{inef-3} = 0 \text{ mm}^2 \quad (\text{x2})$$

$$A_{ef-LE} = 1299,9 \text{ mm}^2$$

E.2. Flambagem local pelo método da seção efetiva (MSE):

Conforme NBR-14762, tabelas 9 e 10, caso "b":

$$\left. \begin{array}{l} \eta = \frac{b_f}{b_w} = 0,28 \\ \eta' = \frac{D}{b_w} = 0,08 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Rightarrow 0,1 \leq \eta \leq 1,0 \\ \Rightarrow 0,1 \leq \eta' \leq 0,3 \\ \Rightarrow K_t = 5,76 \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} \text{NÃO OK} \\ \text{O perfil está fora da tabela 10} \end{array}$$

$$N_t = 93,779 \text{ kN}$$

$$\lambda_p = 2,06 > 0,673 \Rightarrow \text{seção flamba local}$$

$$A_{ef-SE} = 1041,5 \text{ mm}^2 \Rightarrow \text{Não utilizar nos cálculos, pois perfil está fora da tabela 10.}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 48
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	Aprov

F. Flambagem distorcional

Conforme NBR-14762, tabela 11:

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= \frac{b_{ef}}{b_w} = 0,28 \\ n_2 &= \frac{b_w}{t} = 150 \end{aligned} \right\} \Rightarrow 0,4 \leq n_1 \leq 2,0 \Rightarrow \text{NÃO OK}$$

O perfil Ue está fora da tabela 11
Verificar a flambagem distorcional

Considerando-se que as abas do perfil Ue são travadas entre si na formação do perfil caixa, a flambagem por distorção não será um modo de falha do perfil caixa.

G. Cálculo da resistência à força axial de compressão:

$$N_{C,Rd} \leq \left[N_{C,Rd-FT} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = \frac{0,58 \times 1299,9 \times 340}{1,2} = 212,59 \text{ kN} \right.$$

$$\mathbf{N_{C,Rd} = 212,59 \text{ kN}}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 49
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	Aprov

7.3. RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR NO EIXO X ($M_{x,Rd}$) - PERFIL I

Cálculo da resistência ao momento fletor conforme NBR-14762, item 9.8

A. Dados do perfil estrutural

Perfil: Ie 200 x 100 x 25 x 3,0

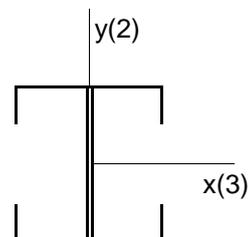
$$k_x \cdot L_x = 6000 \text{ mm}$$

$$k_y \cdot L_y = 6000 \text{ mm}$$

$$k_z \cdot L_z = 6000 \text{ mm}$$

Propriedades geométricas

	Ue 200x100x25x3	Ie 200x200x25x3
A mm ²	1291	2582
I _x = I ₃ mm ⁴	8410800	16821600
W _x =W ₃ mm ³	84110	168220
r _x = r ₃ mm	80,7	80,7
I _y = I ₂ mm ⁴	1751700	6330600
W _y =W ₂ mm ³	26180	63310
r _y = r ₂ mm	36,8	49,5
J mm ⁴	3870	7740
C _w mm ⁶	14970330000	59881340000
r _o mm	118,4	94,7



Material: Chapa fina a quente de aço-carbono, norma ABNT NBR 5004, grau Q-35

Tensão de escoamento..... fy = 340 MPa

Tensão de ruptura..... fu = 450 MPa

Módulo de elasticidade..... E = 200000 MPa

Módulo de elasticidade transversal..... G = 77000 MPa

B. Relação largura-espessura (NBR-14762, item 9.1.2, tabela 4):

$$\text{Elemento 1 (AA): } \frac{b_w}{t} = \frac{188,00}{3,00} = 62,7 \leq 250 \Rightarrow \text{OK}$$

$$\text{Elemento 2 (AA): } \frac{b_f}{t} = \frac{88,00}{3,00} = 29,3 \leq 60 \Rightarrow \text{OK}$$

$$\text{Elemento 3 (AL): } \frac{D}{t} = \frac{19,00}{3,00} = 6,3 \leq 30 \Rightarrow \text{OK}$$

C. ELU de início de escoamento da seção efetiva

$$\sigma = f_y = 340 \text{ MPa}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 50
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

C.1. Flambagem local pelo método da largura efetiva (MLE):

a) Elemento 2 - Aba com enrijecedor simples a 90° (uniformemente comprimido)

$$t = 3,00 \text{ mm}$$

$$D = 25,00 \text{ mm}$$

$$b_f = 88,00 \text{ mm}$$

$$d = 19,00 \text{ mm}$$

$$\lambda_{po} = 1,94 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{Aba sem enrijecedor flamba local}$$

$$I_s = 1714,75 \text{ mm}^4$$

$$I_a \leq \begin{cases} 7606,9 \text{ mm}^4 \\ 9210,84 \text{ mm}^4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad I_a = 7606,93 \text{ mm}^4$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{1714,75}{7606,93} = 0,23 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_s}{I_a} = 0,23$$

$$n = \begin{cases} 0,3452 \\ \geq 0,33 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad n = 0,345 \text{ mm}^4$$

$$\frac{D}{b} = \begin{cases} 0,284 \\ \leq 0,80 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} D/b &= 0,284 \\ 0,25 < D/b &\leq 0,80 \end{aligned}$$

$$k = \begin{cases} 2,463 \\ \leq 4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad k = 2,463$$

$$\lambda_p = 0,81 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{aba com enrijecedor flamba local}$$

$$b_{ef} = 79,1 \text{ mm}$$

$$b_{ef-1} = \begin{cases} 8,9 \text{ mm} \\ \leq 40 \text{ mm} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} b_{ef-1} &= 8,9 \text{ mm} \\ b_{ef-2} &= 70,1 \text{ mm} \end{aligned}$$

b) Elemento 3 - enrijecedor a 90° (primeira iteração)

$$t = 3,00 \text{ mm}$$

$$d = 19,00 \text{ mm}$$

$$k = 0,43 \quad (\text{tabela 4.3, caso "a"})$$

$$\lambda_p = 0,42 \leq 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{enrijecedor não flamba local}$$

$$d_{ef} = 19,00 \text{ mm}$$

$$d_s = \begin{cases} 4,283 \text{ mm} \\ \leq 19,00 \text{ mm} \end{cases}$$

$$d_s = 4,28 \text{ mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		51	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR				

c) Elemento 1 - Alma

$$t = 3,00 \text{ mm}$$

$$b_w = 188,00 \text{ mm}$$

Elemento	1ª iteração			2ª iteração			3ª iteração		
	L mm	y mm	L.y mm ²	L mm	y mm	L.y mm ²	L mm	y mm	L.y mm ²
Flange superior	79,06	1,50	118,6	79,06	1,50	118,59	79,06	1,50	118,59
Canto superior esq.	7,07	3,13	22,1	7,07	3,13	22,14	7,07	3,13	22,14
Canto superior dir.	7,07	3,13	22,1	7,07	3,13	22,14	7,07	3,13	22,14
Enrijecedor superior	4,28	8,14	34,9	4,28	8,14	34,87	4,28	8,14	34,87
Alma	188,00	100,00	18800,0	188,00	100,00	18800,00	188,00	100,00	18800,00
Alma inefetiva				0,00	31,45	0,00	0,00	32,99	0,00
Enrijecedor inferior	19,00	184,50	3505,5	19,00	184,50	3505,50	19,00	184,50	3505,50
Flange inferior	88,00	198,50	17468,0	88,00	198,50	17468,00	88,00	198,50	17468,00
Canto inferior esq.	7,07	196,87	1390,9	7,07	196,87	1390,86	7,07	196,87	1390,86
Canto inferior dir.	7,07	196,87	1390,9	7,07	196,87	1390,86	7,07	196,87	1390,86
Σ	406,60	-	42753,0	406,60	-	42753,0	406,60	-	42753,0
$y_{cg} = y_c =$	105,15 mm			105,15 mm			105,15 mm		
$y_t =$	94,853 mm			94,853 mm			94,853 mm		
$\sigma_1 =$	- 320,6 MPa			- 320,6 MPa			- 320,6 MPa		
$\sigma_2 =$	+ 287,3 MPa			+ 287,3 MPa			+ 287,3 MPa		
$\Psi =$	-0,90			-0,90			-0,90		
$k =$	21,43			21,43			21,43		
$\lambda_p =$	0,57 < 0,673			0,57 < 0,673			0,57 < 0,673		
$b_c =$	99,15 mm			105,15 mm			105,15 mm		
$b_{ef} =$	99,15 mm			105,15 mm			105,15 mm		
$b_{ef-1} =$	25,45 mm			26,99 mm			26,99 mm		
$b_{ef-2} =$	49,57 mm			52,57 mm			52,57 mm		
$b_{ef-1} + b_{ef-2} < b_c$	75,02 < 99,15			79,56 < 105,15			79,56 < 105,15		
$b_{inef} =$	0,00 mm			0,00 mm			0,00 mm		
Convergência				0,0 %			0,0 %		

d) Módulo de resistência elástico

Propriedades da seção efetiva - perfil Ue isolado					
Elemento	L mm	y mm	L.y mm ²	$L.y^2$ mm ³	le_x mm ³
Flange superior	79,06	1,50	118,6	178	
Canto superior esq.	7,07	3,13	22,1	69	13,6
Canto superior dir.	7,07	3,13	22,1	69	13,6
Enrijecedor superior	4,28	8,14	34,9	284	6,5
Alma	188,00	100,00	18800,0	1880000	553722,7
Alma inefetiva	0,00	32,99	0,0	0	0,0
Enrijecedor inferior	19,00	184,50	3505,5	646765	571,6
Flange inferior	88,00	198,50	17468,0	3467398	-
Canto inferior esq.	7,07	196,87	1390,9	273814	13,6
Canto inferior dir.	7,07	196,87	1390,9	273814	13,6
Σ	406,60	-	42753,0	6542391	554355,1

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 52
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

$$y_{cg} = 105,15 \text{ mm}$$

$$I_{xp} = 7804204 \text{ mm}^4 \quad (\text{inerçia do perfil Ue isolado})$$

$$I_x = 15608408 \text{ mm}^4 \quad (\text{inércia do perfil composto})$$

$$W_{ef-LE} = 148444 \text{ mm}^3$$

C.2. Método da seção efetiva (MSE):

Conforme NBR-14762, tabela 13, caso "b":

$$\left. \begin{array}{l} \eta = \frac{b_f}{b_w} = 0,50 \\ \mu = \frac{D}{b_w} = 0,13 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Rightarrow 0,2 \leq \eta \leq 1,0 \\ \Rightarrow \mu \leq 0,3 \\ \Rightarrow K_t = 18,7 \end{array}$$

$$M_1 = 127941 \text{ kN.mm}$$

$$\lambda_p = 0,669 \leq 0,673 \Rightarrow \text{seção não flamba local}$$

$$W_{ef-SE} = 168220 \text{ mm}^3$$

D. ELU de flambagem lateral com torção

D.1. Tensão de flambagem lateral com torção

$$N_{ey} = 347,1 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = 432,8 \text{ kN}$$

$$C_b = 1,0 \quad (\text{a favor da segurança})$$

$$M_e = 36695,69 \text{ kN.mm}$$

$$W_e = W_x = 168220 \text{ mm}^3$$

$$\lambda_o = 1,25 \Rightarrow 0,6 < \lambda_o < 1,336$$

$$\chi_{FLT} = 0,63$$

$$\sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 213,87 \text{ MPa}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	Aprov

D.2. Flambagem local pelo método da largura efetiva (MLE):

a) Elemento 2 - Aba com enrijecedor simples a 90° (uniformemente comprimido)

$$t = 3,00 \text{ mm}$$

$$D = 25,00 \text{ mm}$$

$$b_f = 88,00 \text{ mm}$$

$$d = 19,00 \text{ mm}$$

$$\lambda_{po} = 1,54 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{Aba sem enrijecedor flamba local}$$

$$I_s = 1714,75 \text{ mm}^4$$

$$I_a \leq \begin{cases} 2425,98 \text{ mm}^4 \\ 7389,09 \text{ mm}^4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad I_a = 2425,98 \text{ mm}^4$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{1714,75}{2425,98} = 0,71 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_s}{I_a} = 0,71$$

$$n = \begin{cases} 0,3942 \\ \geq 0,33 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad n = 0,394 \text{ mm}^4$$

$$\frac{D}{b} = \begin{cases} 0,284 \\ \leq 0,80 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} D/b &= 0,284 \\ 0,25 < D/b &\leq 0,80 \end{aligned}$$

$$k = \begin{cases} 3,395 \\ \leq 4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad k = 3,395$$

$$\lambda_p = 0,55 \leq 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{aba com enrijecedor não flamba local}$$

$$b_{ef} = 88,0 \text{ mm}$$

b) Elemento 3 - enrijecedor a 90° (primeira iteração)

$$t = 3,00 \text{ mm}$$

$$d = 19,00 \text{ mm}$$

$$k = 0,43 \quad (\text{tabela 4.3, caso "a"})$$

$$\lambda_p = 0,33 \leq 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{enrijecedor não flamba local}$$

$$d_{ef} = 19,00 \text{ mm}$$

$$d_s = \begin{cases} 13,430 \text{ mm} \\ \leq 19,00 \text{ mm} \end{cases}$$

$$d_s = 13,43 \text{ mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		54	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR				

c) Elemento 1 - Alma

$$t = 3,00 \text{ mm}$$

$$b_w = 188,00 \text{ mm}$$

Elemento	1ª iteração			2ª iteração			3ª iteração		
	L mm	y mm	L.y mm ²	L mm	y mm	L.y mm ²	L mm	y mm	L.y mm ²
Flange superior	88,00	1,50	132,0	88,00	1,50	132,00	88,00	1,50	132,00
Canto superior esq.	7,07	3,13	22,1	7,07	3,13	22,14	7,07	3,13	22,14
Canto superior dir.	7,07	3,13	22,1	7,07	3,13	22,14	7,07	3,13	22,14
Enrijecedor superior	13,43	12,71	170,8	13,43	12,71	170,76	13,43	12,71	170,76
Alma	188,00	100,00	18800,0	188,00	100,00	18800,00	188,00	100,00	18800,00
Alma inefetiva				0,00	29,88	0,00	0,00	31,39	0,00
Enrijecedor inferior	19,00	184,50	3505,5	19,00	184,50	3505,50	19,00	184,50	3505,50
Flange inferior	88,00	198,50	17468,0	88,00	198,50	17468,00	88,00	198,50	17468,00
Canto inferior esq.	7,07	196,87	1390,9	7,07	196,87	1390,86	7,07	196,87	1390,86
Canto inferior dir.	7,07	196,87	1390,9	7,07	196,87	1390,86	7,07	196,87	1390,86
Σ	424,69	-	42902,3	424,69	-	42902,3	424,69	-	42902,3
$y_{cg} = y_c =$	101,02 mm			101,02 mm			101,02 mm		
$y_t =$	98,98 mm			98,98 mm			98,98 mm		
$\sigma_1 =$	- 201,2 MPa			- 201,2 MPa			- 201,2 MPa		
$\sigma_2 =$	+ 196,9 MPa			+ 196,9 MPa			+ 196,9 MPa		
$\Psi =$	-0,98			-0,98			-0,98		
$k =$	23,45			23,45			23,45		
$\lambda_p =$	0,43 < 0,673			0,43 < 0,673			0,43 < 0,673		
$b_c =$	95,02 mm			101,02 mm			101,02 mm		
$b_{ef} =$	95,02 mm			101,02 mm			101,02 mm		
$b_{ef-1} =$	23,88 mm			25,39 mm			25,39 mm		
$b_{ef-2} =$	47,51 mm			50,51 mm			50,51 mm		
$b_{ef-1} + b_{ef-2} < b_c$	71,39 < 95,02			75,90 < 101,02			75,90 < 101,02		
$b_{inef} =$	0,00 mm			0,00 mm			0,00 mm		
Convergência				0,0 %			0,0 %		

d) Módulo de resistência elástico

Propriedades da seção efetiva - perfil Ue isolado					
Elemento	L mm	y mm	L.y mm ²	$L.y^2$ mm ³	I_{e_x} mm ³
Flange superior	88,00	1,50	132,0	198	
Canto superior esq.	7,07	3,13	22,1	69	13,6
Canto superior dir.	7,07	3,13	22,1	69	13,6
Enrijecedor superior	13,43	12,71	170,8	2171	201,8
Alma	188,00	100,00	18800,0	1880000	553722,7
Alma inefetiva	0,00	31,39	0,0	0	0,0
Enrijecedor inferior	19,00	184,50	3505,5	646765	571,6
Flange inferior	88,00	198,50	17468,0	3467398	-
Canto inferior esq.	7,07	196,87	1390,9	273814	13,6
Canto inferior dir.	7,07	196,87	1390,9	273814	13,6
Σ	424,69	-	42902,3	6544299	554550,4

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 55
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	Aprov

$$y_{cg} = 101,02 \text{ mm}$$

$$I_{xp} = 8294559,7 \text{ mm}^4 \quad (\text{inércia do perfil Ue isolado})$$

$$I_x = 16589119 \text{ mm}^4 \quad (\text{inércia do perfil composto})$$

$$W_{\text{ef-LE}} = 164216 \text{ mm}^3$$

D.3. Método da seção efetiva (MSE):

Conforme NBR-14762, tabela 13, caso "b":

$$\left. \begin{array}{l} \eta = \frac{b_f}{b_w} = 0,50 \\ \mu = \frac{D}{b_w} = 0,13 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Rightarrow 0,2 \leq \eta \leq 1,0 \\ \Rightarrow \mu \leq 0,3 \\ \Rightarrow K_t = 18,7 \end{array}$$

$$M_t = 127941 \text{ kN.mm}$$

$$\lambda_p = 0,53 \leq 0,673 \Rightarrow \text{seção não flamba local}$$

$$W_{\text{ef-SE}} = 168220 \text{ mm}^3$$

E. ELU de flambagem distorcional

E.1. Conforme NBR-14762, tabela 14:

$$\left. \begin{array}{l} n_1 = \frac{b_{\text{ef}}}{b_w} = 0,50 \\ n_2 = \frac{b_w}{t} = 66,7 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Rightarrow 0,4 \leq n_1 \leq 2,0 \\ \Rightarrow n_3 = \frac{D}{b_w} \geq 0,09 \end{array}$$

$$n_3 = \frac{D}{b_w} = 0,13 \geq 0,09 \Rightarrow \text{perfil dispensa a verificação da flambagem distorcional quando submetido a flexão}$$

E.2. Flambagem distorcional com programa CUSFM

Conforme mostrado no anexo E, item E.2.2, temos:

$$\chi_{\text{dist}} = 1,86 > 1 \Rightarrow \text{Não ocorre flambagem distorcional no regime elástico.}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 56
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

F. Cálculo da resistência ao momento fletor

$$M_{x,Rd} \leq \begin{cases} M_{x,Rd-F} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = \frac{148444 \times 340}{1,1} = 45883 \text{ kN.mm} \\ M_{x,Rd-FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{c,ef} \cdot f_y}{\gamma} = \frac{0,63 \times 164216 \times 340}{1,1} = 31929 \text{ kN.mm} \\ M_{x,Rd-dist} = \frac{\chi_{dist} \cdot W \cdot f_y}{\gamma} = \frac{1,86 \times 168220 \times 340}{1,1} = 96711 \text{ kN.mm} \end{cases}$$

$M_{x,Rd} = 31929 \text{ kN.mm}$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 57
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	Aprov

7.4. RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR NO EIXO X ($M_{x,Rd}$) - PERFIL CAIXA

Cálculo da resistência ao momento fletor conforme NBR-14762, item 9.8

A. Dados do perfil estrutural

Perfil: Cx 300 x 85 x 25 x 2,0

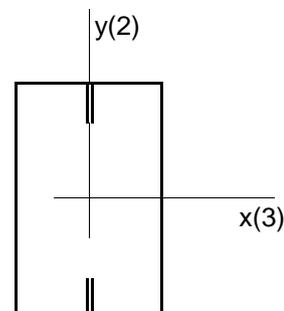
$$k_x \cdot L_x = 1,00 \times 7615,7 = 7615,7 \text{ mm}$$

$$k_y \cdot L_y = 7615,7 / 2 = 3807,8 \text{ mm}$$

$$k_z \cdot L_z = 7615,7 / 2 = 3807,8 \text{ mm}$$

Propriedades geométricas

	Ue 300x85x25x2	CX 300x170x25x2
A mm ²	1014	2027
$I_x = I_3$ mm ⁴	13390900	26781700
$W_x = W_3$ mm ³	89270	178540
$r_x = r_3$ mm	114,9	114,9
$I_y = I_2$ mm ⁴	938900	9916800
$W_y = W_2$ mm ³	14910	116670
$r_y = r_2$ mm	30,4	69,9
J mm ⁴	1350	2700
C_w mm ⁶	17055020000	68220070000
r_o mm	131,6	134,5



Material: Chapa fina a quente de aço-carbono, norma ABNT NBR 5004, grau Q-35

Tensão de escoamento..... $f_y = 340$ MPa

Tensão de ruptura..... $f_u = 450$ MPa

Módulo de elasticidade..... $E = 200000$ MPa

Módulo de elasticidade transversal..... $G = 77000$ MPa

B. Relação largura-espessura (NBR-14762, item 9.1.2, tabela 4):

$$\text{Elemento 1 (AA): } \frac{b_w}{t} = \frac{292,00}{2,00} = 146 \leq 250 \Rightarrow \text{OK}$$

$$\text{Elemento 2 (AA): } \frac{b_f}{t} = \frac{77,00}{2,00} = 38,5 \leq 60 \Rightarrow \text{OK}$$

$$\text{Elemento 3 (AL): } \frac{D}{t} = \frac{21,00}{2,00} = 10,5 \leq 30 \Rightarrow \text{OK}$$

C. ELU de início de escoamento da seção efetiva

$$\sigma = f_y = 340 \text{ MPa}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	Aprov

C.1. Flambagem local pelo método da largura efetiva (MLE):

a) Elemento 2 - Aba com enrijecedor simples a 90° (uniformemente comprimido)

$$t = 2,00 \text{ mm}$$

$$D = 25,00 \text{ mm}$$

$$b_f = 77,00 \text{ mm}$$

$$d = 21,00 \text{ mm}$$

$$\lambda_{po} = 2,55 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{Aba sem enrijecedor flamba local}$$

$$I_s = 1543,50 \text{ mm}^4$$

$$I_a \leq \begin{cases} 4856,5 \text{ mm}^4 \\ 2363,00 \text{ mm}^4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad I_a = 2363,00 \text{ mm}^4$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{1543,50}{2363,00} = 0,65 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_s}{I_a} = 0,65$$

$$n = \begin{cases} 0,2711 \\ \geq 0,33 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad n = 0,333 \text{ mm}^4$$

$$\frac{D}{b} = \begin{cases} 0,325 \\ \leq 0,80 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} D/b &= 0,325 \\ 0,25 < D/b &\leq 0,80 \end{aligned}$$

$$k = \begin{cases} 3,204 \\ \leq 4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad k = 3,204$$

$$\lambda_p = 0,93 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{aba com enrijecedor flamba local}$$

$$b_{ef} = 63,0 \text{ mm}$$

$$b_{ef-1} = \begin{cases} 20,6 \text{ mm} \\ \leq 32 \text{ mm} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} b_{ef-1} &= 20,6 \text{ mm} \\ b_{ef-2} &= 42,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

b) Elemento 3 - enrijecedor a 90° (primeira iteração)

$$t = 2,00 \text{ mm}$$

$$d = 21,00 \text{ mm}$$

$$k = 0,43 \quad (\text{tabela 4.3, caso "a"})$$

$$\lambda_p = 0,695 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{enrijecedor flamba local}$$

$$d_{ef} = 20,65 \text{ mm}$$

$$d_s = \begin{cases} 13,490 \text{ mm} \\ \leq 21,00 \text{ mm} \end{cases}$$

$$d_s = 13,49 \text{ mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		59	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR				

c) Elemento 1 - Alma

$$t = 2,00 \text{ mm}$$

$$b_w = 292,00 \text{ mm}$$

Elemento	1ª iteração			2ª iteração			3ª iteração		
	L mm	y mm	L.y mm ²	L mm	y mm	L.y mm ²	L mm	y mm	L.y mm ²
Flange superior	63,04	1,00	63,0	63,04	1,00	63,04	63,04	1,00	63,04
Canto superior esq.	4,71	2,09	9,8	4,71	2,09	9,84	4,71	2,09	9,84
Canto superior dir.	4,71	2,09	9,8	4,71	2,09	9,84	4,71	2,09	9,84
Enrijecedor superior	13,49	10,74	144,9	13,49	10,74	144,94	13,49	10,74	144,94
Alma	292,00	150,00	43800,0	292,00	150,00	43800,00	292,00	150,00	43800,00
Alma inefetiva				-80,35	68,48	-5502,35	-97,37	79,37	-7728,46
Enrijecedor inferior	21,00	285,50	5995,5	21,00	285,50	5995,50	21,00	285,50	5995,50
Flange inferior	77,00	299,00	23023,0	77,00	299,00	23023,00	77,00	299,00	23023,00
Canto inferior esq.	4,71	297,91	1403,2	4,71	297,91	1403,16	4,71	297,91	1403,16
Canto inferior dir.	4,71	297,91	1403,2	4,71	297,91	1403,16	4,71	297,91	1403,16
Σ	485,37	-	75852,5	405,03	-	70350,1	388,00	-	68124,0
$y_{cg} = y_c =$	156,28 mm			173,69 mm			175,58 mm		
$y_t =$	143,72 mm			126,31 mm			124,42 mm		
$\sigma_1 =$	-	331,3 MPa		-	332,2 MPa		-	332,3 MPa	
$\sigma_2 =$	+	304,0 MPa		+	239,4 MPa		+	233,2 MPa	
$\Psi =$	-0,92			-0,72			-0,70		
$k =$	21,94			17,63			17,26		
$\lambda_p =$	1,34 > 0,673			1,49 > 0,673			1,51 > 0,673		
$b_c =$	152,28 mm			173,69 mm			175,58 mm		
$b_{ef} =$	95,24 mm			99,27 mm			99,46 mm		
$b_{ef-1} =$	24,31 mm			26,68 mm			26,87 mm		
$b_{ef-2} =$	47,62 mm			49,64 mm			49,73 mm		
$b_{ef-1} + b_{ef-2} < b_c$	71,93 < 95,24			76,32 < 99,27			76,60 < 99,46		
$b_{inef} =$	-80,35 mm			-97,37 mm			-98,98 mm		
Convergência				10,0 %			1,1 %		

d) Módulo de resistência elástico

Propriedades da seção efetiva - perfil Ue isolado					
Elemento	L mm	y mm	L.y mm ²	$L.y^2$ mm ³	le_x mm ³
Flange superior	63,04	1,00	63,0	63	
Canto superior esq.	4,71	2,09	9,8	21	4,0
Canto superior dir.	4,71	2,09	9,8	21	4,0
Enrijecedor superior	13,49	10,74	144,9	1557	204,6
Alma	292,00	150,00	43800,0	6570000	2074757
Alma inefetiva	-98,98	79,56	-7874,3	-626447	-80805,0
Enrijecedor inferior	21,00	285,50	5995,5	1711715	771,8
Flange inferior	77,00	299,00	23023,0	6883877	-
Canto inferior esq.	4,71	297,91	1403,2	418017	4,0
Canto inferior dir.	4,71	297,91	1403,2	418017	4,0
Σ	386,39	-	67978,2	15376841	1994945

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 60
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

$$y_{cg} = 175,93 \text{ mm}$$

$$I_{xp} = 10824819 \text{ mm}^4 \quad (\text{inercia do perfil Ue isolado})$$

$$I_x = 21649638 \text{ mm}^4 \quad (\text{inércia do perfil composto})$$

$$W_{\text{ef-LE}} = 123059 \text{ mm}^3$$

C.2. Método da seção efetiva (MSE):

Conforme NBR-14762, tabela 13, caso "b":

$$\left. \begin{array}{l} \eta = \frac{b_f}{b_w} = 0,28 \\ \mu = \frac{D}{b_w} = 0,08 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Rightarrow 0,2 \leq \eta \leq 1,0 \\ \Rightarrow \mu \leq 0,3 \\ \Rightarrow K_t = 29,8 \end{array}$$

$$M_l = 42672 \text{ kN.mm}$$

$$\lambda_p = 1,19 > 0,673 \Rightarrow \text{seção flamba local}$$

$$W_{\text{ef-SE}} = 122082 \text{ mm}^3$$

D. ELU de flambagem lateral com torção

D.1. Tensão de flambagem lateral com torção

$$N_{ey} = 1350,0 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = 524,9 \text{ kN}$$

$$C_b = 1,0 \quad (\text{a favor da segurança})$$

$$M_e = 113219,02 \text{ kN.mm}$$

$$W_e = W_x = 178540 \text{ mm}^3$$

$$\lambda_o = 0,73 \Rightarrow 0,6 < \lambda_o < 1,336$$

$$\chi_{FLT} = 0,94$$

$$\sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 321,15 \text{ MPa}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 61
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

D.2. Flambagem local pelo método da largura efetiva (MLE):

a) Elemento 2 - Aba com enrijecedor simples a 90° (uniformemente comprimido)

$$t = 2,00 \text{ mm}$$

$$D = 25,00 \text{ mm}$$

$$b_f = 77,00 \text{ mm}$$

$$d = 21,00 \text{ mm}$$

$$\lambda_{po} = 2,48 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{Aba sem enrijecedor flamba local}$$

$$I_s = 1543,50 \text{ mm}^4$$

$$I_a \leq \begin{cases} 4320,58 \text{ mm}^4 \\ 2298,80 \text{ mm}^4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad I_a = 2298,80 \text{ mm}^4$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{1543,50}{2298,80} = 0,67 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_s}{I_a} = 0,67$$

$$n = \begin{cases} 0,2799 \\ \geq 0,33 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad n = 0,333 \text{ mm}^4$$

$$\frac{D}{b} = \begin{cases} 0,325 \\ \leq 0,80 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} D/b &= 0,325 \\ 0,25 < D/b &\leq 0,80 \end{aligned}$$

$$k = \begin{cases} 3,229 \\ \leq 4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad k = 3,229$$

$$\lambda_p = 0,90 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{aba com enrijecedor flamba local}$$

$$b_{ef} = 64,5 \text{ mm}$$

$$b_{ef-1} = \begin{cases} 21,6 \text{ mm} \\ \leq 32 \text{ mm} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} b_{ef-1} &= 21,6 \text{ mm} \\ b_{ef-2} &= 42,8 \text{ mm} \end{aligned}$$

b) Elemento 3 - enrijecedor a 90° (primeira iteração)

$$t = 2,00 \text{ mm}$$

$$d = 21,00 \text{ mm}$$

$$k = 0,43 \quad (\text{tabela 4.3, caso "a"})$$

$$\lambda_p = 0,675 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{enrijecedor flamba local}$$

$$d_{ef} = 20,96 \text{ mm}$$

$$d_s = \begin{cases} 14,076 \text{ mm} \\ \leq 21,00 \text{ mm} \end{cases}$$

$$d_s = 14,08 \text{ mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		62	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR				

c) Elemento 1 - Alma

$$t = 2,00 \text{ mm}$$

$$b_w = 292,00 \text{ mm}$$

Elemento	1ª iteração			2ª iteração			3ª iteração		
	L mm	y mm	L.y mm ²	L mm	y mm	L.y mm ²	L mm	y mm	L.y mm ²
Flange superior	64,46	1,00	64,5	64,46	1,00	64,46	64,46	1,00	64,46
Canto superior esq.	4,71	2,09	9,8	4,71	2,09	9,84	4,71	2,09	9,84
Canto superior dir.	4,71	2,09	9,8	4,71	2,09	9,84	4,71	2,09	9,84
Enrijecedor superior	14,08	11,04	155,4	14,08	11,04	155,38	14,08	11,04	155,38
Alma	292,00	150,00	43800,0	292,00	150,00	43800,00	292,00	150,00	43800,00
Alma inefetiva				-78,16	67,89	-5306,32	-94,49	78,43	-7410,41
Enrijecedor inferior	21,00	285,50	5995,5	21,00	285,50	5995,50	21,00	285,50	5995,50
Flange inferior	77,00	299,00	23023,0	77,00	299,00	23023,00	77,00	299,00	23023,00
Canto inferior esq.	4,71	297,91	1403,2	4,71	297,91	1403,16	4,71	297,91	1403,16
Canto inferior dir.	4,71	297,91	1403,2	4,71	297,91	1403,16	4,71	297,91	1403,16
Σ	487,38	-	75864,3	409,22	-	70558,0	392,89	-	68453,9
$y_{cg} = y_c =$	155,66 mm			172,42 mm			174,23 mm		
$y_t =$	144,34 mm			127,58 mm			125,77 mm		
$\sigma_1 =$	- 312,9 MPa			- 313,7 MPa			- 313,8 MPa		
$\sigma_2 =$	+ 289,5 MPa			+ 230,2 MPa			+ 224,4 MPa		
$\Psi =$	-0,93			-0,73			-0,72		
$k =$	22,13			17,89			17,52		
$\lambda_p =$	1,29 > 0,673			1,44 > 0,673			1,45 > 0,673		
$b_c =$	151,66 mm			172,42 mm			174,23 mm		
$b_{ef} =$	97,38 mm			101,50 mm			101,69 mm		
$b_{ef-1} =$	24,81 mm			27,19 mm			27,37 mm		
$b_{ef-2} =$	48,69 mm			50,75 mm			50,85 mm		
$b_{ef-1} + b_{ef-2} < b_c$	73,50 < 97,38			77,94 < 101,50			78,22 < 101,69		
$b_{inef} =$	-78,16 mm			-94,49 mm			-96,01 mm		
Convergência				9,7 %			1,0 %		

d) Módulo de resistência elástico

Propriedades da seção efetiva - perfil Ue isolado					
Elemento	L mm	y mm	L.y mm ²	$L.y^2$ mm ³	le_x mm ³
Flange superior	64,46	1,00	64,5	64	
Canto superior esq.	4,71	2,09	9,8	21	4,0
Canto superior dir.	4,71	2,09	9,8	21	4,0
Enrijecedor superior	14,08	11,04	155,4	1715	232,4
Alma	292,00	150,00	43800,0	6570000	2074757
Alma inefetiva	-96,01	78,61	-7548,1	-593386	-73761,4
Enrijecedor inferior	21,00	285,50	5995,5	1711715	771,8
Flange inferior	77,00	299,00	23023,0	6883877	-
Canto inferior esq.	4,71	297,91	1403,2	418017	4,0
Canto inferior dir.	4,71	297,91	1403,2	418017	4,0
Σ	391,36	-	68316,3	15410061	2002016

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	63
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

$$y_{cg} = 174,56 \text{ mm}$$

$$I_{xp} = 10973665 \text{ mm}^4 \quad (\text{inércia do perfil Ue isolado})$$

$$I_x = 21947331 \text{ mm}^4 \quad (\text{inércia do perfil composto})$$

$$W_{FLT-LE} = 125730 \text{ mm}^3$$

D.3. Método da seção efetiva (MSE):

Conforme NBR-14762, tabela 13, caso "b":

$$\left. \begin{array}{l} \eta = \frac{b_f}{b_w} = 0,28 \\ \mu = \frac{D}{b_w} = 0,08 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Rightarrow 0,2 \leq \eta \leq 1,0 \\ \Rightarrow \mu \leq 0,3 \\ \Rightarrow K_t = 29,8 \end{array}$$

$$M_t = 42672 \text{ kN.mm}$$

$$\lambda_p = 1,16 > 0,673 \Rightarrow \text{seção flamba local}$$

$$W_{FLT-SE} = 124792 \text{ mm}^3$$

E. ELU de flambagem distorcional

E.1. Conforme NBR-14762, tabela 14:

$$\left. \begin{array}{l} n_1 = \frac{b_{ef}}{b_w} = 0,28 \\ n_2 = \frac{b_w}{t} = 150 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Rightarrow 0,4 \leq n_1 \leq 2,0 \\ \Rightarrow \text{NÃO OK} \\ \text{O perfil Ue está fora da tabela 11} \\ \text{Verificar a flambagem distorcional} \end{array}$$

Considerando-se que as abas do perfil Ue são travadas entre si na formação do perfil caixa, a flambagem por distorção não será um modo de falha do perfil caixa.

F. Cálculo da resistência ao momento fletor

$$M_{x,Rd} \leq \left[\begin{array}{l} M_{x,Rd-F} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = \frac{123059 \times 340}{1,1} = 38036 \text{ kN.mm} \\ M_{x,Rd-FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{c,ef} \cdot f_y}{\gamma} = \frac{0,94 \times 125730 \times 340}{1,1} = 36707 \text{ kN.mm} \end{array} \right.$$

$$M_{x,Rd} = 36707 \text{ kN.mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 64
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

7.5. RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR NO EIXO Y ($M_{y,Rd}$) - PERFIL I

Cálculo da resistência ao momento fletor conforme NBR-14762, item 9.8

A. Dados do perfil estrutural

Perfil: Ue 200 x 100 x 25 x 3,0

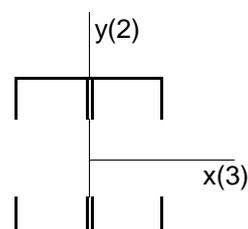
$$k_x \cdot L_x = 6000 \text{ mm}$$

$$k_y \cdot L_y = 6000 \text{ mm}$$

$$k_z \cdot L_z = 6000 \text{ mm}$$

Propriedades geométricas

	Ue 200x100x25x3	Ie 200x200x25x3
A mm ²	1291	2582
$I_x = I_3$ mm ⁴	8410800	16821600
$W_x = W_3$ mm ³	84110	168220
$r_x = r_3$ mm	80,7	80,7
$I_y = I_2$ mm ⁴	1751700	6330600
$W_y = W_2$ mm ³	26180	63310
$r_y = r_2$ mm	36,8	49,5
J mm ⁴	3870	7740
C_w mm ⁶	14970330000	59881340000
r_o mm	118,4	94,7



Material: Chapa fina a quente de aço-carbono, norma ABNT NBR 5004, grau Q-35

Tensão de escoamento..... $f_y = 340$ MPa

Tensão de ruptura..... $f_u = 450$ MPa

Módulo de elasticidade..... $E = 200000$ MPa

Módulo de elasticidade transversal..... $G = 77000$ MPa

B. Relação largura-espessura (NBR-14762, item 9.1.2, tabela 4):

$$\text{Elemento 1 (AA): } \frac{b_w}{t} = \frac{188,00}{3,00} = 62,7 \leq 250 \Rightarrow \text{OK}$$

$$\text{Elemento 2 (AA): } \frac{b_f}{t} = \frac{88,00}{3,00} = 29,3 \leq 60 \Rightarrow \text{OK}$$

$$\text{Elemento 3 (AL): } \frac{D}{t} = \frac{19,00}{3,00} = 6,3 \leq 30 \Rightarrow \text{OK}$$

C. ELU de início de escoamento da seção efetiva

$$\sigma = f_y = 340 \text{ MPa}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 65
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

C.1. Flambagem local pelo método da largura efetiva (MLE):

a) Elemento 3 - enrijecedor a 90° (primeira iteração)

Primeira iteração com a aba uniformemente comprimida com enrijecedor de borda simples.

$$t = 3,00 \text{ mm}$$

$$D = 25,00 \text{ mm}$$

$$b_f = 88,00 \text{ mm}$$

$$d = 19,00 \text{ mm}$$

$$\lambda_{po} = 1,94 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{Aba sem enrijecedor flamba local}$$

$$I_s = 1714,75 \text{ mm}^4$$

$$I_a \leq \begin{cases} 7606,9 \text{ mm}^4 \\ 9210,84 \text{ mm}^4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad I_a = 7606,93 \text{ mm}^4$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{1714,75}{7606,93} = 0,23 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_s}{I_a} = 0,23$$

$$n = \begin{cases} 0,3452 \\ \geq 0,33 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad n = 0,345 \text{ mm}^4$$

$$\frac{D}{b} = \begin{cases} 0,284 \\ \leq 0,80 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} D/b &= 0,284 \\ 0,25 < D/b &\leq 0,80 \end{aligned}$$

$$k = \begin{cases} 2,463 \\ \leq 4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad k = 2,463$$

$$\lambda_p = 0,81 > 0,673 \quad \text{aba com enrijecedor flamba local}$$

$$b_{ef} = 79,1 \text{ mm}$$

$$b_{ef-1} = \begin{cases} 8,9 \text{ mm} \\ \leq 40 \text{ mm} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} b_{ef-1} &= 8,9 \text{ mm} \\ b_{ef-2} &= 70,1 \text{ mm} \end{aligned}$$

Para o enrijecedor uniformemente comprimido, temos:

$$t = 3,00 \text{ mm}$$

$$d = 19,00 \text{ mm}$$

$$k = 0,43 \quad (\text{tabela 4.3, caso "a"})$$

$$\lambda_p = 0,42 \leq 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{enrijecedor não flamba local}$$

$$d_{ef} = 19,00 \text{ mm}$$

$$d_s = \begin{cases} 4,283 \text{ mm} \\ \leq 19,00 \text{ mm} \end{cases}$$

$$d_s = 4,28 \text{ mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		66	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR				

b) Elemento 2 - Aba com enrijecedor - cálculo iterativo

$$t = 3,00 \text{ mm}$$

$$b_w = 88,00 \text{ mm}$$

Elemento	1ª iteração			2ª iteração			3ª iteração		
	L mm	x mm	L.x mm ²	L mm	x mm	L.x mm ²	L mm	x mm	L.x mm ²
Enrijecedor superior	4,28	1,50	6,4	4,28	1,50	6,42	4,28	1,50	6,42
Canto superior	7,07	3,13	22,1	7,07	3,13	22,14	7,07	3,13	22,14
Aba superior	88,00	50,00	4400,0	88,00	50,00	4400,00	88,00	50,00	4400,00
Aba inefetiva				0,00	36,21	0,00	0,00	36,21	0,00
Canto central 1	7,07	96,87	684,4	7,07	96,87	684,36	7,07	96,87	684,36
Canto central 2	7,07	103,13	728,6	7,07	103,13	728,64	7,07	103,13	728,64
Alma 1	188,00	98,50	18518,0	188,00	98,50	18518,00	188,00	98,50	18518,00
Alma 2	188,00	101,50	19082,0	188,00	101,50	19082,00	188,00	101,50	19082,00
Aba inferior	88,00	150,00	13200,0	88,00	150,00	13200,00	88,00	150,00	13200,00
Canto inferior	7,07	196,87	1390,9	7,07	196,87	1390,86	7,07	196,87	1390,86
Enrijecedor inferior	19,00	198,50	3771,5	19,00	198,50	3771,50	19,00	198,50	3771,50
Σ	603,54	-	61803,9	603,54	-	61803,9	603,54	-	61803,9
$x_{cg} = x_c =$	102,4 mm			102,4 mm			102,4 mm		
$x_1 =$	2,4 mm			2,4 mm			2,4 mm		
$\sigma_1 =$	-	320,1 MPa		-	320,1 MPa		-	320,1 MPa	
$\sigma_2 =$	-	27,9 MPa		-	27,9 MPa		-	27,9 MPa	
$\Psi =$	0	$\leq 0,09$	< 1	0	$\leq 0,09$	< 1	0	$\leq 0,09$	< 1
$k =$	7,35			7,35			7,35		
$\lambda_p =$	$0,46 \leq 0,673$			$0,46 < 0,673$			$0,46 < 0,673$		
$b_c =$	88,00 mm			88,00 mm			88,00 mm		
$b_{ef} =$	88,00 mm			88,00 mm			88,00 mm		
$b_{ef-1} =$	30,21 mm			30,21 mm			30,21 mm		
$b_{ef-2} =$	44,00 mm			44,00 mm			44,00 mm		
$b_{ef-1} + b_{ef-2} < b_c$	$74,21 < 88,00$			$74,21 < 88,00$			$74,21 < 88,00$		
$b_{inef} =$	0,00 mm			0,00 mm			0,00 mm		
Convergência				0,0 %			0,0 %		

c) Módulo de resistência elástico

Propriedades da seção efetiva - perfil Ue isolado					
Elemento	L mm	x mm	L.x mm ²	$L.x^2$ mm ³	le_y mm ³
Enrijecedor superior	4,28	1,50	6,4	10	0,0
Canto superior	7,07	3,13	22,1	69	13,6
Aba superior	88,00	50,00	4400,0	220000	56789,3
Aba inefetiva	0,00	36,21	0,0	0	0,0
Canto central 1	7,07	96,87	684,4	66292	13,6
Canto central 2	7,07	103,13	728,6	75147	13,6
Alma 1	188,00	98,50	18518,0	1824023	0,0
Alma 2	188,00	101,50	19082,0	1936823	0,0
Aba inferior	88,00	150,00	13200,0	1980000	56789,3
Canto inferior	7,07	196,87	1390,9	273814	13,6
Enrijecedor inferior	19,00	198,50	3771,5	748643	0,0
Σ	603,54	-	61803,9	7124821	113633,0

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 67
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

$$x_{cg} = 102,4 \text{ mm}$$

$$I_{yp} = 2728850 \text{ mm}^4 \quad (\text{inercia do perfil Ue isolado})$$

$$I_y = 5457700 \text{ mm}^4 \quad (\text{inércia do perfil composto})$$

$$W_{ef-LE} = 53297 \text{ mm}^3$$

D. ELU de flambagem distorcional

D.1. Conforme NBR-14762, tabela 14:

$$\left. \begin{array}{l} n_1 = \frac{b_{ef}}{b_w} = 0,50 \\ n_2 = \frac{b_w}{t} = 66,7 \end{array} \right\} \Rightarrow 0,4 \leq n_1 \leq 2,0$$

$$\Rightarrow n_3 = \frac{D}{b_w} \geq 0,09$$

$$n_3 = \frac{D}{b_w} = 0,13 \geq 0,09 \Rightarrow \text{perfil dispensa a verificação da flambagem distorcional quando submetido a flexão}$$

D.2. Flambagem distorcional com programa CUSFM

Conforme mostrado no anexo E, item E.2.2, temos:

$$\chi_{dist} = 2,40 > 1 \Rightarrow \text{Não ocorre flambagem distorcional no regime elástico.}$$

E. Cálculo da resistência ao momento fletor

$$M_{y,Rd} \leq \begin{cases} M_{y,Rd-F} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = \frac{53297 \times 340}{1,1} = 16474 \text{ kN.mm} \\ M_{y,Rd-dist} = \frac{\chi_{dist} \cdot W \cdot f_y}{\gamma} = \frac{2,40 \times 63310 \times 340}{1,1} = 46965 \text{ kN.mm} \end{cases}$$

$$M_{y,Rd} = 16474 \text{ kN.mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 68
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov FCR			

8. DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA PRINCIPAL

8.1. VERIFICAÇÃO DAS COLUNAS

Colunas em perfil Ie 200x100x25x3,0:

$$N_{c,Rd} = 243,23 \text{ kN}$$

$$M_{x,Rd} = 31,93 \text{ kN.m}$$

$$M_{y,Rd} = 16,47 \text{ kN.m}$$

EIXO	Combinação CP [VY+ SC]								N+Mx+My Sd/Rd
	N _{c,Sd} kN	N Sd/Rd		M _{x,sd} kN.m	M _x Sd/Rd		M _{y,Sd} kN.m	M _x Sd/Rd	
A1	24,19	0,10		13,24	0,41		6,64	0,40	0,92 ≤ 1 ⇒ OK
B1	18,17	0,07		15,94	0,50		6,64	0,40	0,98 ≤ 1 ⇒ OK
A2	31,10	0,13		22,04	0,69		-	-	0,82 ≤ 1 ⇒ OK
B2	12,89	0,05		24,11	0,76		-	-	0,81 ≤ 1 ⇒ OK

EIXO	Combinação CP [VX+ SC]								N+Mx+My Sd/Rd
	N _{c,Sd} kN	N Sd/Rd		M _{x,sd} kN.m	M _x Sd/Rd		M _{y,Sd} kN.m	M _x Sd/Rd	
A1	15,80	0,06		7,15	0,22		8,36	0,51	0,80 ≤ 1 ⇒ OK
B1	15,79	0,06		7,15	0,22		8,36	0,51	0,80 ≤ 1 ⇒ OK
A2	50,37	0,21		15,43	0,48		-	-	0,69 ≤ 1 ⇒ OK
B2	49,60	0,20		15,46	0,48		-	-	0,69 ≤ 1 ⇒ OK

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 69
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov FCR			

8.2. VERIFICAÇÃO DAS VIGAS (TESOURAS)

Tesoura em perfil Cx 300x85x25x2,0 (peça inclinada)

$$N_{c,Rd} = 212,59 \text{ kN}$$

$$M_{x,Rd} = 36,71 \text{ kN.m}$$

SEÇÃO	Combinação CP [VY+ SC]								
	$N_{c,Sd}$ kN	N Sd/Rd		$M_{x,sd}$ kN.m	Mx Sd/Rd		$M_{y,Sd}$ kN.m	Mx Sd/Rd	$N+Mx+My$ Sd/Rd
1A	2,75	0,01		4,32	0,12				0,13 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
1C	0,89	0,00		0	0,00				0,00 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
1B	0,21	0,00		5,54	0,15				0,15 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
2A	12,16	0,06		12,69	0,35				0,40 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
2C	12,65	0,06		0	0,00				0,06 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
2B	17,52	0,08		11,38	0,31				0,39 $\leq 1 \Rightarrow$ OK

SEÇÃO	Combinação CP [VX+ SC]								
	$N_{c,Sd}$ kN	N Sd/Rd		$M_{x,sd}$ kN.m	Mx Sd/Rd		$M_{y,Sd}$ kN.m	Mx Sd/Rd	$N+Mx+My$ Sd/Rd
1A	3,19	0,02		5,04	0,14				0,15 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
1C	0,26	0,00		0	0,00				0,00 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
1B	3,14	0,01		6,05	0,16				0,18 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
2A	29,43	0,14		6,19	0,17				0,31 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
2C	14,90	0,07		0	0,00				0,07 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
2B	29,43	0,14		6,17	0,17				0,31 $\leq 1 \Rightarrow$ OK

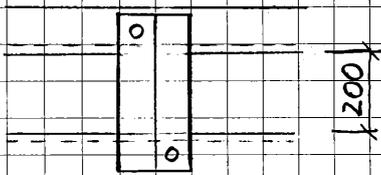
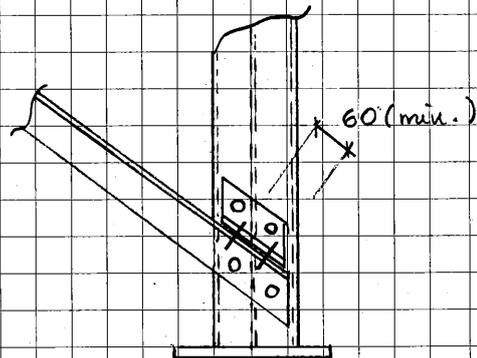
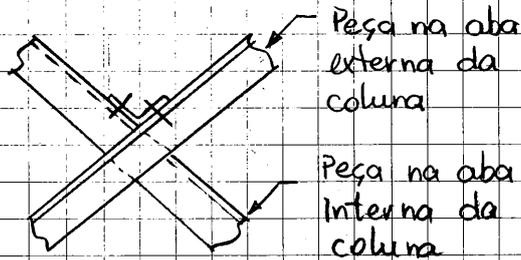
8.3. VERIFICAÇÃO DOS CONTRAVENTOS LATERAIS:

Neste item calcula-se a barra tracionada de contra-vento lateral longitudinal:

$$N_{t, sd} = 38,75 \text{ kN}$$

MATERIAL: L 90 x 90 x 3 - $A_g = 525,2 \text{ mm}^2$
 $f_y = 340 \text{ MPa}$ $f_u = 450 \text{ MPa}$

LIGAÇÕES:



LIGAÇÃO COM AS COLUNAS
EIXOS 1, 2, 9, 10

UNIÃO ENTRE OS
CONTRAVENTOS EM "X"

PARAFUSOS: ASTM A325 - $\phi 1/2"$ (12,5 mm)

$$A_g = 525,2 \text{ mm}^2$$

$$A_{no} = 525,2 - (12,5 + 1,5) \cdot 3 = 483,2 \text{ mm}^2$$

$$C_t = 1,0 \quad (\text{perfil ligado pelas 2 abas nas colunas})$$

$$A_n = 525,2 - 2 \cdot (12,5 + 1,5) \cdot 3 = 441,2 \text{ mm}^2$$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	71
		Data	Elab. ARM	Verif.	

RESISTÊNCIA DE CÁLCULO:

$$N_{t,Rd} \leq \begin{cases} \frac{A_g f_y}{\gamma} = \frac{525,2 \cdot 340}{1,1} = 162,3 \text{ kN} \\ \frac{A_{no} f_u}{\gamma} = \frac{483,2 \cdot 450}{1,35} = 161,0 \text{ kN} \\ \frac{c_t \cdot A_n f_u}{\gamma} = \frac{1,0 \cdot 441,2 \cdot 450}{1,65} = 120,3 \text{ kN} \end{cases}$$

VERIFICAÇÃO:

$$N_{t,Rd} = 120,3 \text{ kN} \quad \rhd \quad N_{t,Ed} = 38,75 \text{ kN} \quad (\text{OK})$$

DIMENSIONAMENTO DO CONTRAVENTO:

Pela verificação anterior, o perfil inicialmente utilizado supera em muito a resistência necessária, podendo ser reduzido:

MATERIAL : L 60 x 60 x 2 - $A_g = 240 \text{ mm}^2$
 $f_y = 340 \text{ MPa}$ $f_u = 450 \text{ MPa}$

$$A_{no} = 240 - 14 \cdot 2 = 212 \text{ mm}^2$$

$$A_n = 240 - 2 \cdot 14 \cdot 2 = 184 \text{ mm}^2$$

$$N_{t,Rd} \leq \begin{cases} A_g f_y / \gamma = 240 \cdot 340 / 1,1 = 74,2 \text{ kN} \\ A_{no} f_u / \gamma = 212 \cdot 450 / 1,35 = 70,7 \text{ kN} \\ c_t \cdot A_n f_u / \gamma = 1,0 \cdot 184 \cdot 450 / 1,65 = 50,2 \text{ kN} \end{cases}$$

$$N_{t,Rd} = 50,2 \text{ kN} \quad \rhd \quad N_{t,Ed} = 39,5 \text{ kN} \quad (\text{OK})$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 72
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

9. DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS AUXILIARES

9.1. RESISTÊNCIA DE CÁLCULO - PERFIL Ue

9.1.1. RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR NO EIXO X ($M_{x,Rd}$) - PERFIL Ue:

Cálculo da resistência ao momento fletor conforme NBR-14762, item 9.8

A. Dados do perfil estrutural

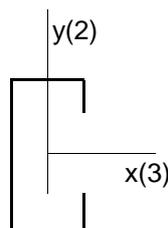
Perfil: Ue 200 x 100 x 20 x 2,0
Galvanizado Z-180 (e=0,018mm)

Dimensões líquidas: 199,964 x 99,964 x 19,964 x 1,964

$k_x \cdot L_x = 0,65 \times 6000 = 3900$ mm Conforme NBR-8800, tabela E.1, item (a)
 $k_y \cdot L_y = 0,65 \times 6000 = 3900$ mm Conforme NBR-8800, tabela E.1, item (a)
 $k_z \cdot L_z = 1,00 \times 6000 = 6000$ mm Conforme NBR-8800, item E.2.2.

Propriedades geométricas

	Ue 200x100x25x2,0
A mm ²	858
$I_x = I_3$ mm ⁴	5661842
$W_x = W_3$ mm ³	56629
$r_x = r_3$ mm	81,235
$I_y = I_2$ mm ⁴	1200861
$W_{y1} = W_2$ mm ³	36217 (alma)
$W_{y3} = W_3$ mm ⁴	17976 (aba)
$r_y = r_2$ mm	37,4
J mm ⁴	555,5
C_w mm ⁶	8954319282
r_o mm	118,3



Material: Chapa fina a frio de aço-carbono galvanizado, norma ABNT NBR 7008, grau ZAR-320

Tensão de escoamento..... $f_y = 320$ MPa
Tensão de ruptura..... $f_u = 390$ MPa
Módulo de elasticidade..... $E = 200000$ MPa
Módulo de elasticidade transversal..... $G = 77000$ MPa

B. Relação largura-espessura (NBR-14762, item 9.1.2, tabela 4):

Elemento 1 (AA): $\frac{b_w}{t} = \frac{192,11}{1,96} = 97,8 \leq 250 \Rightarrow OK$
Elemento 2 (AA): $\frac{b_f}{t} = \frac{92,11}{1,96} = 46,9 \leq 60 \Rightarrow OK$
Elemento 3 (AL): $\frac{D}{t} = \frac{16,04}{1,96} = 8,2 \leq 30 \Rightarrow OK$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 73
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

C. ELU de início de escoamento da seção efetiva

$$\sigma = f_y = 320 \text{ MPa}$$

C.1. Flambagem local pelo método da largura efetiva (MLE):

a) Elemento 2 - Aba com enrijecedor simples a 90° (uniformemente comprimido)

$$t = 1,96 \text{ mm}$$

$$D = 19,96 \text{ mm}$$

$$b_f = 92,11 \text{ mm}$$

$$d = 16,04 \text{ mm}$$

$$\lambda_{po} = 3,01 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{Aba sem enrijecedor flamba local}$$

$$I_s = 674,91 \text{ mm}^4$$

$$I_a \leq \begin{cases} 8758,7 \text{ mm}^4 \\ 2583,28 \text{ mm}^4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad I_a = 2583,28 \text{ mm}^4$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{674,91}{2583,28} = 0,26 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_s}{I_a} = 0,26$$

$$n = \begin{cases} 0,2146 \\ \geq 0,33 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad n = 0,333 \text{ mm}^4$$

$$\frac{D}{b} = \begin{cases} 0,217 \\ \leq 0,80 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} D/b &= 0,217 \\ D/b &\leq 0,25 \end{aligned}$$

$$k = \begin{cases} 2,905 \\ \leq 4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad k = 2,905$$

$$\lambda_p = 1,16 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{aba com enrijecedor flamba local}$$

$$b_{ef-1} = \begin{cases} 8,4 \text{ mm} \\ \leq 32 \text{ mm} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} b_{ef-1} &= 8,4 \text{ mm} \\ b_{ef-2} &= 56,0 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$b_{ef} = 64,4 \text{ mm}$$

b) Elemento 3 - enrijecedor a 90° (primeira iteração)

$$t = 1,96 \text{ mm}$$

$$d = 16,04 \text{ mm}$$

$$k = 0,43 \quad (\text{tabela 4.3, caso "a"})$$

$$\lambda_p = 0,52 \leq 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{enrijecedor não flamba local}$$

$$d_{ef} = 16,04 \text{ mm}$$

$$d_s = \begin{cases} 4,190 \text{ mm} \\ \leq 16,04 \text{ mm} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad d_s = 4,19 \text{ mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		74	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR				

c) Elemento 1 - Alma

$$t = 1,96 \text{ mm}$$

$$b_w = 192,11 \text{ mm}$$

Elemento	1ª iteração			2ª iteração			3ª iteração		
	L mm	y mm	L.y mm ²	L mm	y mm	L.y mm ²	L mm	y mm	L.y mm ²
Flange superior	64,41	0,98	63,2	64,41	0,98	63,25	64,41	0,98	63,25
Canto superior esq.	4,63	2,05	9,5	4,63	2,05	9,49	4,63	2,05	9,49
Canto superior dir.	4,63	2,05	9,5	4,63	2,05	9,49	4,63	2,05	9,49
Enrijecedor superior	4,19	6,02	25,2	4,19	6,02	25,23	4,19	6,02	25,23
Alma	192,11	99,98	19207,3	192,11	99,98	19207,34	192,11	99,98	19207,34
Alma inefetiva				-38,76	46,35	-1796,46	-45,28	51,63	-2337,64
Enrijecedor inferior	16,04	188,02	3015,1	16,04	188,02	3015,06	16,04	188,02	3015,06
Flange inferior	92,11	198,98	18327,8	92,11	198,98	18327,83	92,11	198,98	18327,83
Canto inferior esq.	4,63	197,91	915,4	4,63	197,91	915,39	4,63	197,91	915,39
Canto inferior dir.	4,63	197,91	915,4	4,63	197,91	915,39	4,63	197,91	915,39
Σ	387,35	-	42488,5	348,59	-	40692,0	342,07	-	40150,8
$y_{cg} = y_c =$	109,69 mm			116,73 mm			117,38 mm		
$y_t =$	90,274 mm			83,231 mm			82,588 mm		
$\sigma_1 =$	308,5 MPa			309,2 MPa			309,3 MPa		
$\sigma_2 =$	-251,9 MPa			-217,4 MPa			-214,4 MPa		
$\Psi =$	-0,82			-0,70			-0,69		
$k =$	19,62			17,28			17,10		
$\lambda_p =$	0,91 > 0,673			0,97 > 0,673			0,98 > 0,673		
$b_c =$	105,76 mm			116,73 mm			117,38 mm		
$b_{ef} =$	87,92 mm			92,79 mm			92,94 mm		
$b_{ef-1} =$	23,04 mm			25,06 mm			25,16 mm		
$b_{ef-2} =$	43,96 mm			46,40 mm			46,47 mm		
$b_{ef-1} + b_{ef-2} < b_c$	67,00 < 87,92			71,45 < 92,79			71,63 < 92,94		
$b_{inef} =$	-38,76 mm			-45,28 mm			-45,74 mm		
Convergência				6,0 %			0,5 %		

d) Módulo de resistência elástico

Propriedades da seção efetiva - perfil Ue isolado					
Elemento	L mm	y mm	L.y mm ²	$L.y^2$ mm ³	le_x mm ³
Flange superior	64,41	0,98	63,2	62	
Canto superior esq.	4,63	2,05	9,5	19	3,8
Canto superior dir.	4,63	2,05	9,5	19	3,8
Enrijecedor superior	4,19	6,02	25,2	152	6,1
Alma	192,11	99,98	19207,3	1920388	590819,9
Alma inefetiva	-45,74	51,73	-2366,4	-122418	-7976,7
Enrijecedor inferior	16,04	188,02	3015,1	566885	343,6
Flange inferior	92,11	198,98	18327,8	3646909	-
Canto inferior esq.	4,63	197,91	915,4	181167	3,8
Canto inferior dir.	4,63	197,91	915,4	181167	3,8
Σ	341,61	-	40122,1	6374352	583208,1

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 75
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	Aprov

$$y_{cg} = 117,45 \text{ mm}$$

$$I_{xp} = 4409525 \text{ mm}^4 \quad (\text{inerçia do perfil Ue isolado})$$

$$W_{ef-LE} = 37543 \text{ mm}^3$$

C.2. Método da seção efetiva (MSE):

Conforme NBR-14762, tabela 13, caso "b":

$$\left. \begin{array}{l} \eta = \frac{b_f}{b_w} = 0,50 \\ \mu = \frac{D}{b_w} = 0,10 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Rightarrow 0,2 \leq \eta \leq 1,0 \\ \Rightarrow \mu \leq 0,3 \\ \Rightarrow K_t = 18,7 \end{array}$$

$$M_t = 18471 \text{ kN.mm}$$

$$\lambda_p = 0,99 > 0,673 \Rightarrow \text{seção flamba local}$$

$$W_{ef-SE} = 44474 \text{ mm}^3$$

D. ELU de flambagem lateral com torção

D.1. Tensão de flambagem lateral com torção

$$N_{ey} = 155,8 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = 38,1 \text{ kN}$$

$$C_b = 1,0 \quad (\text{a favor da segurança})$$

$$M_e = 9120,43 \text{ kN.mm}$$

$$W_e = W_x = 56629 \text{ mm}^3$$

$$\lambda_o = 1,41 \Rightarrow \lambda_o \geq 1,336$$

$$\chi_{FLT} = 0,50$$

$$\sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 161,06 \text{ MPa}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 76
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

D.2. Flambagem local pelo método da largura efetiva (MLE):

a) Elemento 2 - Aba com enrijecedor simples a 90° (uniformemente comprimido)

$$t = 1,96 \text{ mm}$$

$$D = 19,96 \text{ mm}$$

$$b_f = 92,11 \text{ mm}$$

$$d = 16,04 \text{ mm}$$

$$\lambda_{po} = 2,14 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{Aba sem enrijecedor flamba local}$$

$$I_s = 674,91 \text{ mm}^4$$

$$I_a \leq \begin{cases} 2145,77 \text{ mm}^4 \\ 1854,30 \text{ mm}^4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad I_a = 1854,30 \text{ mm}^4$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{674,91}{1854,30} = 0,36 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_s}{I_a} = 0,36$$

$$n = \begin{cases} 0,3214 \\ \geq 0,33 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad n = 0,333 \text{ mm}^4$$

$$\frac{D}{b} = \begin{cases} 0,217 \\ \leq 0,80 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} D/b &= 0,217 \\ D/b &\leq 0,25 \end{aligned}$$

$$k = \begin{cases} 2,905 \\ \leq 4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad k = 2,905$$

$$\lambda_p = 0,82 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{aba com enrijecedor flamba local}$$

$$b_{ef} = 82,1 \text{ mm}$$

b) Elemento 3 - enrijecedor a 90° (primeira iteração)

$$t = 1,96 \text{ mm}$$

$$d = 16,04 \text{ mm}$$

$$k = 0,43 \quad (\text{tabela 4.3, caso "a"})$$

$$\lambda_p = 0,37 \leq 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{enrijecedor não flamba local}$$

$$d_{ef} = 16,04 \text{ mm}$$

$$d_s = \begin{cases} 5,837 \text{ mm} \\ \leq 16,04 \text{ mm} \end{cases}$$

$$d_s = 5,84 \text{ mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		77	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR				

c) Elemento 1 - Alma

$$t = 1,96 \text{ mm}$$

$$b_w = 192,11 \text{ mm}$$

Elemento	1ª iteração			2ª iteração			3ª iteração		
	L mm	y mm	L.y mm ²	L mm	y mm	L.y mm ²	L mm	y mm	L.y mm ²
Flange superior	82,07	0,98	80,6	82,07	0,98	80,59	82,07	0,98	80,59
Canto superior esq.	4,63	2,05	9,5	4,63	2,05	9,49	4,63	2,05	9,49
Canto superior dir.	4,63	2,05	9,5	4,63	2,05	9,49	4,63	2,05	9,49
Enrijecedor superior	5,84	6,85	40,0	5,84	6,85	39,96	5,84	6,85	39,96
Alma	192,11	99,98	19207,3	192,11	99,98	19207,34	192,11	99,98	19207,34
Alma inefetiva				0,00	29,67	0,00	0,00	30,68	0,00
Enrijecedor inferior	16,04	188,02	3015,1	16,04	188,02	3015,06	16,04	188,02	3015,06
Flange inferior	92,11	198,98	18327,8	92,11	198,98	18327,83	92,11	198,98	18327,83
Canto inferior esq.	4,63	197,91	915,4	4,63	197,91	915,39	4,63	197,91	915,39
Canto inferior dir.	4,63	197,91	915,4	4,63	197,91	915,39	4,63	197,91	915,39
Σ	406,66	-	42520,5	406,66	-	42520,5	406,66	-	42520,5
$y_{cg} = y_c =$	104,56 mm			104,56 mm			104,56 mm		
$y_t =$	95,404 mm			95,404 mm			95,404 mm		
$\sigma_1 =$	155,0 MPa			155,0 MPa			155,0 MPa		
$\sigma_2 =$	-140,9 MPa			-140,9 MPa			-140,9 MPa		
$\Psi =$	-0,91			-0,91			-0,91		
$k =$	21,73			21,73			21,73		
$\lambda_p =$	0,61 < 0,673			0,61 < 0,673			0,61 < 0,673		
$b_c =$	100,63 mm			104,56 mm			104,56 mm		
$b_{ef} =$	100,63 mm			104,56 mm			104,56 mm		
$b_{ef-1} =$	25,74 mm			26,75 mm			26,75 mm		
$b_{ef-2} =$	50,32 mm			52,28 mm			52,28 mm		
$b_{ef-1} + b_{ef-2} < b_c$	76,06 < 100,63			79,03 < 104,56			79,03 < 104,56		
$b_{inef} =$	0,00 mm			0,00 mm			0,00 mm		
Convergência				0,0 %			0,0 %		

d) Módulo de resistência elástico

Propriedades da seção efetiva - perfil Ue					
Elemento	L mm	y mm	L.y mm ²	$L.y^2$ mm ³	le_x^3 mm ³
Flange superior	82,07	0,98	80,6	79	
Canto superior esq.	4,63	2,05	9,5	19	3,8
Canto superior dir.	4,63	2,05	9,5	19	3,8
Enrijecedor superior	5,84	6,85	40,0	274	16,6
Alma	192,11	99,98	19207,3	1920388	590819,9
Alma inefetiva	0,00	30,68	0,0	0	0,0
Enrijecedor inferior	16,04	188,02	3015,1	566885	343,6
Flange inferior	92,11	198,98	18327,8	3646909	-
Canto inferior esq.	4,63	197,91	915,4	181167	3,8
Canto inferior dir.	4,63	197,91	915,4	181167	3,8
Σ	406,66	-	42520,5	6496908	591195,3

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	78
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

$$y_{cg} = 104,56 \text{ mm}$$

$$I_{xp} = 5189165,9 \text{ mm}^4$$

$$W_{FLT-LE} = 49628 \text{ mm}^3$$

D.3. Método da seção efetiva (MSE):

Conforme NBR-14762, tabela 13, caso "b":

$$\left. \begin{array}{l} \eta = \frac{b_f}{b_w} = 0,50 \\ \mu = \frac{D}{b_w} = 0,10 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Rightarrow 0,2 \leq \eta \leq 1,0 \\ \Rightarrow \mu \leq 0,3 \\ \Rightarrow K_t = 18,7 \end{array}$$

$$M_l = 18471 \text{ kN.mm}$$

$$\lambda_p = 0,70 > 0,673 \Rightarrow \text{seção flamba local}$$

$$W_{FLT-SE} = 55358 \text{ mm}^3$$

E. ELU de flambagem distorcional

E.1. Conforme NBR-14762, tabela 14:

$$\left. \begin{array}{l} n_1 = \frac{b_{ef}}{b_w} = 0,50 \\ n_2 = \frac{b_w}{t} = 102 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Rightarrow 0,4 \leq n_1 \leq 2,0 \\ \Rightarrow n_3 = \frac{D}{b_w} \geq 0,13 \end{array}$$

$$n_3 = \frac{D}{b_w} = 0,10 < 0,13 \Rightarrow \text{verificar a flambagem distorcional}$$

E.2. Flambagem distorcional pelo programa CUSFM

Conforme mostrado no anexo E, item E.1.1, temos:

$$\chi_{dist} = 0,85$$

F. Cálculo da resistência ao momento fletor

$$M_{x,Rd} \leq \left\{ \begin{array}{l} M_{x,Rd-F} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = \frac{37543 \times 320}{1,1} = 10922 \text{ kN.mm} \\ M_{x,Rd-FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{c,ef} \cdot f_y}{\gamma} = \frac{0,50 \times 49628 \times 320}{1,1} = 7266,4 \text{ kN.mm} \\ M_{x,Rd-dist} = \frac{\chi_{dist} \cdot W \cdot f_y}{\gamma} = \frac{0,85 \times 56629 \times 320}{1,1} = 14003 \text{ kN.mm} \end{array} \right.$$

$$M_{x,Rd} = 7266 \text{ kN.mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 79
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	Aprov

9.1.2. RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR NO EIXO Y ($M_{y,Rd}$) - PERFIL Ue SEÇÃO DO APOIO:

Cálculo da resistência ao momento fletor conforme NBR-14762, item 9.8

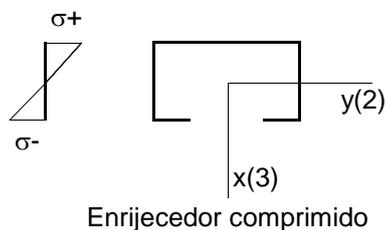
A. Dados do perfil estrutural

Perfil: Ue 200 x 100 x 20 x 2,0
Galvanizado Z-180 (e=0,018mm)

Dimensões líquidas: 199,96 x 99,964 x 19,964 x 1,964

Propriedades geométricas

		Ue 200x100x25x2,0
A	mm ²	858
$I_x = I_3$	mm ⁴	5661842
$W_x = W_3$	mm ³	56629
$r_x = r_3$	mm	81,235
$I_y = I_2$	mm ⁴	1200861
$W_{y1} = W_2$	mm ³	36217 (alma)
$W_{y3} = W_3$	mm ³	17976 (aba)
$r_y = r_2$	mm	37,4
J	mm ⁴	555,5
C_w	mm ⁶	8954319282
r_o	mm	118,3



Material: Chapa fina a frio de aço-carbono galvanizado, norma ABNT NBR 7008, grau ZAR-320
Tensão de escoamento..... $f_y = 320$ MPa
Tensão de ruptura..... $f_u = 390$ MPa
Módulo de elasticidade..... $E = 200000$ MPa
Módulo de elasticidade transversal..... $G = 77000$ MPa

B. Relação largura-espessura (NBR-14762, item 9.1.2, tabela 4):

Elemento 1 (AA): $\frac{b_w}{t} = \frac{192,11}{1,96} = 97,8 \leq 250 \Rightarrow OK$
Elemento 2 (AA): $\frac{b_f}{t} = \frac{92,11}{1,96} = 46,9 \leq 60 \Rightarrow OK$
Elemento 3 (AL): $\frac{D}{t} = \frac{16,04}{1,96} = 8,2 \leq 30 \Rightarrow OK$

C. ELU de início de escoamento da seção efetiva

$\sigma = f_y = 320$ MPa

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 80
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

C.1. Flambagem local pelo método da largura efetiva (MLE):

a) Elemento 3 - enrijecedor a 90° (primeira iteração)

Primeira iteração com a aba uniformemente comprimida com enrijecedor de borda simples.

$$\begin{aligned} t &= 1,96 \text{ mm} \\ D &= 19,96 \text{ mm} \\ b_f &= 92,11 \text{ mm} \\ d &= 16,04 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\lambda_{po} = 3,01 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{Aba sem enrijecedor flamba local}$$

$$I_s = 674,91 \text{ mm}^4$$

$$I_a \leq \begin{cases} 8758,7 \text{ mm}^4 \\ 2583,28 \text{ mm}^4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad I_a = 2583,28 \text{ mm}^4$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{674,91}{2583,28} = 0,26 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_s}{I_a} = 0,26$$

$$n = \begin{cases} 0,2146 \\ \geq 0,33 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad n = 0,333 \text{ mm}^4$$

$$\frac{D}{b} = \begin{cases} 0,217 \\ \leq 0,80 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} D/b &= 0,217 \\ 0,25 < D/b &\leq 0,80 \end{aligned}$$

$$k = \begin{cases} 2,905 \\ \leq 4 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad k = 2,905$$

$$\lambda_p = 1,16 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{aba com enrijecedor flamba local}$$

$$b_{ef-1} = \begin{cases} 8,4 \text{ mm} \\ \leq 32 \text{ mm} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} b_{ef-1} &= 8,4 \text{ mm} \\ b_{ef-2} &= 56,0 \text{ ''} \end{aligned}$$

$$b_{ef} = 64,4 \text{ mm}$$

Para o enrijecedor uniformemente comprimido, temos:

$$\begin{aligned} t &= 1,96 \text{ mm} \\ d &= 16,04 \text{ mm} \\ k &= 0,43 \quad (\text{tabela 4.3, caso "a"}) \end{aligned}$$

$$\lambda_p = 0,52 \leq 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{enrijecedor não flamba local}$$

$$d_{ef} = 16,04 \text{ mm}$$

$$d_s = \begin{cases} 4,190 \text{ mm} \\ \leq 16,04 \text{ mm} \end{cases}$$

$$d_s = 4,19 \text{ mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		81	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR				

b) Elemento 2 - Aba com enrijecedor - cálculo iterativo

$$t = 1,96 \text{ mm}$$

$$b_w = 92,11 \text{ mm}$$

Elemento	2ª iteração			2ª iteração			3ª iteração		
	L mm	x mm	L.x mm ²	L mm	x mm	L.x mm ²	L mm	x mm	L.x mm ²
Enrijecedor superior	4,19	0,98	4,1	4,19	0,98	4,11	4,19	0,98	4,11
Canto superior	4,63	2,05	9,5	4,63	2,05	9,49	4,63	2,05	9,49
Aba	92,11	49,98	4603,7	92,11	49,98	4603,74	92,11	49,98	4603,74
Aba inefetiva				0,00	32,74	0,00	0,00	32,74	0,00
Canto inferior	4,63	97,91	452,9	4,63	97,91	452,87	4,63	97,91	452,87
Alma	192,11	98,98	19015,2	192,11	98,98	19015,23	192,11	98,98	19015,23
Σ	297,66	-	24085,4	297,66	-	24085,4	297,66	-	24085,4
$x_{cg} = x_c =$	80,92 mm			80,92 mm			80,92 mm		
$x_t =$	19,0 mm			19,0 mm			19,0 mm		
$\sigma_1 =$	-	304,5 MPa		-	304,5 MPa		-	304,5 MPa	
$\sigma_2 =$	+	59,8 MPa		+	59,8 MPa		+	59,8 MPa	
$\Psi =$	-0,20 < -0,236			-0,20 < -0,236			-0,20 < -0,236		
$k =$	9,82			9,82			9,82		
$\lambda_p =$	0,61 \leq 0,673			0,61 < 0,673			0,61 < 0,673		
$b_c =$	92,11 mm			92,11 mm			92,11 mm		
$b_{ef} =$	92,11 mm			92,11 mm			92,11 mm		
$b_{inef} =$	0,00 mm			0,00 mm			0,00 mm		
Convergência				0,0 %			0,0 %		

c) Módulo de resistência elástico

Propriedades da seção efetiva - meio perfil Ue						
Elemento	n	L mm	x mm	L.x mm ²	L.x ² mm ³	le_y mm ³
Enrijecedor superior	2	4,19	0,98	4,1	4	0,0
Canto superior	2	4,63	2,05	9,5	19	3,8
Aba	2	92,11	49,98	4603,7	230104	65119,5
Aba inefetiva	2	0,00	32,74	0,0	0	0,0
Canto inferior	2	4,63	97,91	452,9	44341	3,8
Alma	1	192,11	98,98	19015,2	1882166	0,0
Σ		403,20	-	29155,66	2431104	130254

$$x_{cg} = 72,31 \text{ mm}$$

$$I_y = 889918 \text{ mm}^4$$

$$W_{ef-LE} = 12307 \text{ mm}^3$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 82
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

D. ELU de flambagem distorcional

Flambagem distorcional pelo programa CUSFM

Conforme mostrado no anexo E, item E.1.2, temos:

$$\chi_{\text{dist}} = 0,93$$

E. Cálculo da resistência ao momento fletor

$$M_{y,Rd} \leq \begin{cases} M_{y,Rd-F} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = \frac{12307 \times 320}{1,1} = 3580,2 \text{ Kn.mm} \\ M_{y,Rd-dist} = \frac{\chi_{\text{dist}} \cdot W \cdot f_y}{\gamma} = \frac{0,93 \times 17976 \times 320}{1,1} = 4863,3 \text{ Kn.mm} \end{cases}$$

$$M_{y,Rd} = 3580 \text{ kN.mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	83
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

9.1.3. RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR NO EIXO Y ($M_{y,Rd}$) - PERFIL Ue SEÇÃO CENTRAL:

Cálculo da resistência ao momento fletor conforme NBR-14762, item 9.8

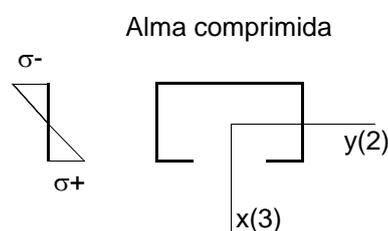
A. Dados do perfil estrutural

Perfil: Ue 200 x 100 x 20 x 2,0
Galvanizado Z-180 (e=0,018mm)

Dimensões líquidas: 199,96 x 99,964 x 19,964 x 1,964

Propriedades geométricas

		Ue 200x100x25x2,0
A	mm ²	858
$I_x = I_3$	mm ⁴	5661842
$W_x = W_3$	mm ³	56629
$r_x = r_3$	mm	81,235
$I_y = I_2$	mm ⁴	1200861
$W_{y1} = W_2$	mm ³	36217 (alma)
$W_{y3} = W_3$	mm ³	17976 (aba)
$r_y = r_2$	mm	37,4
J	mm ⁴	555,5
C_w	mm ⁶	8954319282
r_o	mm	118,3



Material: Chapa fina a frio de aço-carbono galvanizado, norma ABNT NBR 7008, grau ZAR-320
Tensão de escoamento..... $f_y = 320$ MPa
Tensão de ruptura..... $f_u = 390$ MPa
Módulo de elasticidade..... $E = 200000$ MPa
Módulo de elasticidade transversal..... $G = 77000$ MPa

B. Relação largura-espessura (NBR-14762, item 9.1.2, tabela 4):

Elemento 1 (AA): $\frac{b_w}{t} = \frac{192,11}{1,96} = 97,8 \leq 250 \Rightarrow OK$
Elemento 2 (AA): $\frac{b_f}{t} = \frac{92,11}{1,96} = 46,9 \leq 60 \Rightarrow OK$
Elemento 3 (AL): $\frac{D}{t} = \frac{16,04}{1,96} = 8,2 \leq 30 \Rightarrow OK$

C. ELU de início de escoamento da seção efetiva

$\sigma = f_y = 320$ MPa

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		84	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR				

C.1. Flambagem local pelo método da largura efetiva (MLE):

a) Elemento 1 - Alma

Primeira iteração com a alma uniformemente comprimida.

$$t = 1,96 \text{ mm}$$

$$b_w = 192,11 \text{ mm}$$

$$k = 4,0 \quad (\text{tabela 4.2, caso "a"})$$

$$\lambda_p = 2,06 > 0,673 \quad \Rightarrow \quad \text{Alma flamba local}$$

$$b_{ef} = 83,32 \text{ mm}$$

b) Elemento 2 - Aba com enrijecedor - cálculo iterativo

$$t = 1,964 \text{ mm}$$

$$b_w = 92,11 \text{ mm}$$

Elemento	1ª iteração			2ª iteração			3ª iteração		
	L mm	x mm	L.x mm ²	L mm	x mm	L.x mm ²	L mm	x mm	L.x mm ²
Alma	83,32	0,98	81,8	83,32	0,98	81,82	83,32	0,98	81,82
Canto sup. direito	4,63	2,05	9,5	4,63	2,05	9,49	4,63	2,05	9,49
Canto sup. esquerdo	4,63	2,05	9,5	4,63	2,05	9,49	4,63	2,05	9,49
Aba direita	92,11	49,98	4603,7	92,11	49,98	4603,74	92,11	49,98	4603,74
Aba esquerda	92,11	49,98	4603,7	92,11	49,98	4603,74	92,11	49,98	4603,74
Aba inefetiva (2x)				0,00	12,57	0,00	0,00	12,57	0,00
Canto inf. Direito	4,63	97,91	452,9	4,63	97,91	452,87	4,63	97,91	452,87
Canto inf. Esquerdo	4,63	97,91	452,9	4,63	97,91	452,87	4,63	97,91	452,87
Enrijecedor direito	16,04	98,98	1587,3	16,04	98,98	1587,28	16,04	98,98	1587,28
Enrijecedor esquerdo	16,04	98,98	1587,3	16,04	98,98	1587,28	16,04	98,98	1587,28
Σ	318,11	-	13388,6	318,11	-	13388,6	318,11	-	13388,6
$x_{cg} = x_c =$	42,088 mm			42,088 mm			42,088 mm		
$x_t =$	57,9 mm			57,9 mm			57,9 mm		
$\sigma_1 =$	- 211,0 MPa			- 211,0 MPa			- 211,0 MPa		
$\sigma_2 =$	+ 298,3 MPa			+ 298,3 MPa			+ 298,3 MPa		
$\Psi =$	-1,41 < -0,236			-1,41 < -0,236			-1,41 < -0,236		
$k =$	36,95			36,95			36,95		
$\lambda_p =$	0,26 ≤ 0,673			0,26 < 0,673			0,26 < 0,673		
$b_c =$	38,16 mm			38,16 mm			38,16 mm		
$b_{ef} =$	38,16 mm			38,16 mm			38,16 mm		
$b_{inef} =$	0,00 mm			0,00 mm			0,00 mm		
	Convergência			0,0 %			0,0 %		

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 85
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

c) Módulo de resistência elástico

Propriedades da seção efetiva - perfil Ue					
Elemento	L mm	x mm	L.x mm ²	L.x ² mm ³	I _{ey} mm ³
Alma	83,32	0,98	81,8	80	0,0
Canto sup. direito	4,63	2,05	9,5	19	3,8
Canto sup. esquerdo	4,63	2,05	9,5	19	3,8
Aba direita	92,11	49,98	4603,7	230104	65119,5
Aba esquerda	92,11	49,98	4603,7	230104	65119,5
Aba inefetiva (2x)	0,00	12,57	0,0	0	0,0
Canto inf. Direito	4,63	97,91	452,9	44341	3,8
Canto inf. Esquerdo	4,63	97,91	452,9	44341	3,8
Enrijecedor direito	16,04	98,98	1587,3	157112	0,0
Enrijecedor esquerdo	16,04	98,98	1587,3	157112	0,0
Σ	318,11	-	13388,6	863234	130254,2

$$x_{cg} = 42,088 \text{ mm}$$

$$I_y = 844512 \text{ mm}^4$$

$$W_{ef-LE} = 20066 \text{ mm}^3$$

D. Cálculo da resistência ao momento fletor

$$M_{y,Rd} = M_{y,Rd-F} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = \frac{20066 \times 320}{1,1} = 5837,3 \text{ kN.mm}$$

$$M_{y,Rd} = 5837 \text{ kN.mm}$$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 86
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	Aprov

9.1.4. RESISTÊNCIA DE CÁLCULO AO ESFORÇO CORTANTE:

$$\frac{h}{t_y} = \frac{b_w}{t_m} = \frac{192,11}{1,964} = 97,8$$

$$1,4 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} = 1,4 \left(\frac{200000 \cdot 5,0}{250} \right)^{1/2} = 88,54 < \frac{b_w}{t_m}$$

$$V_{y,rd} = 0,905 \cdot \frac{E k_v t^3}{h \cdot \gamma}$$

$$V_{y,rd} = 0,905 \cdot \frac{200000 \cdot 5,0 \cdot 1,964^3}{192,11 \cdot 1,1}$$

• $V_{y,rd} = 32,4 \text{ kN}$

$$\frac{h}{t_x} = \frac{b_f}{t_m} = \frac{92,11}{1,964} = 46,9$$

$$1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} = 1,08 \left(\frac{200000 \cdot 5,0}{250} \right)^{1/2} = 68,3 > \frac{b_f}{t_m}$$

$$V_{x,rd} = 0,6 \frac{f_y h t}{\gamma}$$

$$V_{x,rd} = 0,6 \cdot \frac{250 \cdot 92,11 \cdot 1,964}{1,1} (\times 2)$$

• $V_{x,rd} = 49,3 \text{ kN}$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 87
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

9.2. CÁLCULO DAS TERÇAS DE COBERTURA:

9.2.1. CARGAS ADIANTES:

$$W_{co} = 250 \text{ N/m}^2$$

$$SC = 250 \text{ N/m}^2$$

$$V_{sucção} = -1,4 \cdot 685 \text{ N/m}^2 = -959 \text{ N/m}^2$$

As cargas anteriores estão calculadas no item 5.

Para o vão entre terças de 1900 mm, temos:

$$CP = 250 \cdot 1,9 = 475 \text{ N/m}$$

$$SC = 250 \cdot 1,9 = 475 \text{ N/m}$$

$$V_{sucção} = 959 \cdot 1,9 = 1822 \text{ N/m}$$

9.2.2. CARGAS DE CÁLCULO:

Considerando as cargas agrupadas conforme item 6.2:

$$CC1 : CP \ SC = 1,4 \ CP + 1,4 \ SC \quad (\text{ELU})$$

$$CC2 : CP \ V_{sucção} = 1,0 \ CP + 1,4 \ V_{sucção} \quad (\text{ELU})$$

$$CC3 : CP \ SC = 1,0 \ CP + 1,0 \ SC \quad (\text{ELS})$$

$$CC4 : CP \ V_{sucção} = 1,0 \ CP + 1,0 \ V_{sucção} \quad (\text{ELS})$$

temos para os estados limites últimos (ELU):

$$CC1 : q_1 = 1,4 \cdot 475 + 1,4 \cdot 475 \Rightarrow q_1 = 1330 \text{ N/m}$$

$$CC2 : q_2 = 1,0 \cdot 475 - 1,4 \cdot 1822 \Rightarrow q_2 = -2075,8 \text{ N/m}$$

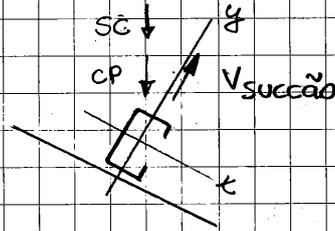
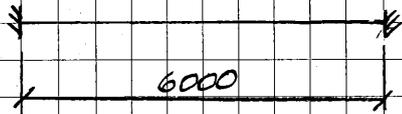
E para os estados limites de serviço (ELS):

$$CC3 : q_3 = 1,0 \cdot 475 + 1,0 \cdot 475 \Rightarrow q_3 = 950 \text{ N/m}$$

$$CC4 : q_4 = 1,0 \cdot 475 - 1,0 \cdot 1822 \Rightarrow q_4 = -1347 \text{ N/m}$$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	88
		Data	Elab. ARM	Verif.	

9.2.3) ESFORÇOS SOLICITANTES:



CC1: $q_{1x} = 1330 \cdot \text{sen } 10^\circ = 231 \text{ N/m}$

$q_{1y} = 1330 \cdot \text{cos } 10^\circ = 1310 \text{ N/m}$

CC2: $q_{2x} = (1,4 \cdot 475) \cdot \text{sen } 10^\circ = 115,5 \text{ N/m}$

$q_{2y} = (1,0 \cdot 475) \cdot \text{cos } 10^\circ - 1,4 \cdot 1822 = -2083 \text{ N/m}$

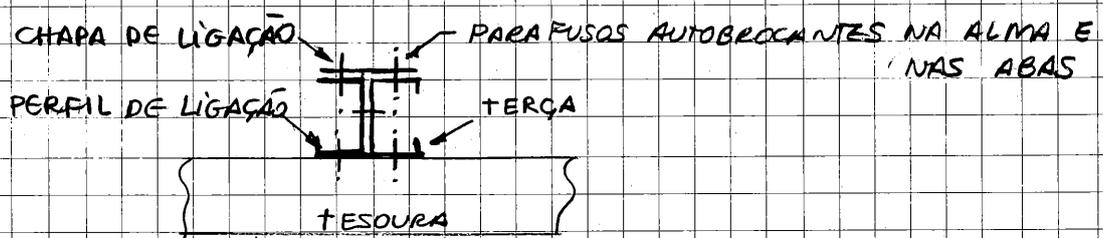
CC3: $q_{3x} = 950 \cdot \text{sen } 10^\circ = 165 \text{ N/m}$

$q_{3y} = 950 \cdot \text{cos } 10^\circ = 936 \text{ N/m}$

CC4: $q_{4x} = (1,0 \cdot 475) \cdot \text{sen } 10^\circ = 82,5 \text{ N/m}$

$q_{4y} = (1,0 \cdot 475) \cdot \text{cos } 10^\circ - 1,0 \cdot 1822 = -1354 \text{ N/m}$

As terças são calculadas como vigas contínuas, com apoio rígido sobre as tesouras e com a seguinte ligação típica:



NOTA: ISOLAMENTO COM MANTA ACÚSTICA (BORRACHA ESP. MÍNIMA 1,0 MM) NAS FACES DE CONTATO COM AS TESOURAS
A LIGAÇÃO NÃO SERÁ DIMENSIONADA NESTE TRABALHO, SEGUINDO O CÁLCULO DO MANUAL.

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 89
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	Aprov

$$M_{sd} = \frac{q \cdot l^2}{12}$$

$$V_{sd} = \frac{q \cdot l}{2}$$

$$CC1: M_{y, sd} = 231 \cdot \frac{6^2}{12} = 693 \text{ Nm}$$

$$M_{x, sd} = -1310 \cdot \frac{6^2}{12} = -3930 \text{ Nm}$$

$$V_{x, sd} = 231 \cdot \frac{6}{2} = 693 \text{ N}$$

$$V_{y, sd} = -1310 \cdot \frac{6}{2} = -3930 \text{ N}$$

$$CC2: M_{y, sd} = \frac{115,5 \cdot 6^2}{12} = 346,5 \text{ Nm}$$

$$M_{x, sd} = -\frac{2083 \cdot 6^2}{12} = -6249 \text{ Nm}$$

$$V_{x, sd} = \frac{115,5 \cdot 6}{2} = 346,5 \text{ N}$$

$$V_{y, sd} = -\frac{2083 \cdot 6}{2} = -6249 \text{ N}$$

Pelas espessuras acima, conclui-se que o caso mais drástico é CC2, correspondente à carga do vento de sucção no telhado.

Considerando a ABNT 6120, a terça deve ser também verificada para:

$$CC5: 1,4 CP + 1 kN = 665 \text{ N/m} + 1000 \text{ N}$$

$$M_{y, sd} = (\sin 10^\circ) \left(665 \cdot \frac{6^2}{12} + 1000 \cdot \frac{6}{8} \right) = 477 \text{ Nm}$$

$$M_{x, sd} = (\cos 10^\circ) \cdot 2745 = 2703 \text{ Nm}$$

$$V_{x, sd} = (\sin 10^\circ) \left(665 \cdot \frac{6}{2} + \frac{1000}{2} \right) = 433 \text{ N}$$

$$V_{y, sd} = (\cos 10^\circ) \cdot 2495 = 2457 \text{ N}$$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 90
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

9.2.4. CÁLCULO DA DEFLEXÃO:

$$\Delta_{max} = \frac{wL^4}{384EI}$$

$$\Delta_{y,max} = \frac{6000^4}{384 \cdot 200000 \cdot 5661842} \cdot q_y$$

$$\Delta_{y,max} = 2,98 \cdot q_y \text{ (N/mm)} \quad [\text{mm}]$$

$$\Delta_{x,max} = \frac{6000^4}{384 \cdot 200000 \cdot 1200681} \cdot q_x$$

$$\Delta_{x,max} = 14,05 \cdot q_x \text{ (N/mm)} \quad [\text{mm}]$$

$$\text{CC3: } \Delta_{y,max} = 2,98 \cdot 936 \cdot 10^{-3} = 2,8 \text{ mm}$$

$$\Delta_{x,max} = 14,05 \cdot 165 \cdot 10^{-3} = 2,3 \text{ mm}$$

$$\text{CC4: } \Delta_{y,max} = 2,98 \cdot 1354 \cdot 10^{-3} = 4,0 \text{ mm}$$

$$\Delta_{x,max} = 14,05 \cdot 82,5 \cdot 10^{-3} = 1,2 \text{ mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 91
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov FCR			

9.2.5. VERIFICAÇÃO DAS TERÇAS DE COBERTURA

a) Conforme NBR-14762, item 9.9:

$$M_{x,Rd} = 7266 \text{ N.m}$$

$$M_{y,Rd} = 3580 \text{ N.m} \quad \text{região do apoio (com enrijecedor comprimido)}$$

Combinação	$M_{x,sd}$	M_x	$M_{y,sd}$	M_y	M_x+M_y
	N.m	Sd/Rd	N.m	Sd/Rd	Sd/Rd
CC1	3930	0,54	693	0,19	0,73 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
CC2	6249	0,86	346,5	0,10	0,96 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
CC5	2703	0,37	477	0,13	0,51 $\leq 1 \Rightarrow$ OK

b) Conforme NBR-14762, item 9.8.4:

$$M_{x,Rd} = 7266 \text{ N.m}$$

$$V_{y,Rd} = 32400 \text{ N}$$

Combinação	$M_{x,sd}$	$V_{y,sd}$	M_x+V_y
	N.m	N	Sd/Rd
CC1	3930	3930	0,31 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
CC2	6249	6249	0,78 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
CC5	2703	2457	0,14 $\leq 1 \Rightarrow$ OK

$$M_{y,Rd} = 3580 \text{ N.m} \quad \text{região do apoio (com enrijecedor comprimido)}$$

$$V_{x,Rd} = 49300 \text{ N}$$

Combinação	$M_{y,sd}$	$V_{x,sd}$	M_y+V_x
	N.m	N	Sd/Rd
CC1	693	693	0,04 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
CC2	346,5	346,5	0,01 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
CC5	477	433	0,02 $\leq 1 \Rightarrow$ OK

c) Verificação da deflexão conforme NBR-14762, tabela A.1:

Deslocamento vertical máximo admissível

Conforme NBR-14672, tabela A.1, item "terças de cobertura":

$$D_{adm} = \frac{L}{180} = \frac{6000}{180} = 33,3 \text{ mm}$$

A favor da segurança, adota-se L/180 para todos os casos de carga.

$$D_{m\acute{a}x} = 4,0 \text{ mm} < 33,3 \text{ mm} \quad (\text{OK})$$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 92
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

9.3. CÁLCULO DAS VIGAS DE FECHAMENTO LATERAL:

9.3.1. CARGAS ATUANTES

$$W_{FE} = 300 \text{ N/m}^2$$

$$SC = \text{zero}$$

$$V_x = V_y = 1,0 \cdot 685 \text{ N/m}^2 = 685 \text{ N/m}^2 \quad (\text{por caso})$$

As cargas acima estão calculadas no item 5.

Para o vão entre travessas de 1500 mm, temos:

$$CP = 300 \cdot 1,5 = 450 \text{ N/m}$$

$$V_x = V_y = 685 \cdot 1,5 = 1027,5 \text{ N/m}$$

9.3.2. CARGAS DE CÁLCULO:

Considerando as cargas agrupadas conforme item 6.2.

$$CC1: CP \cdot V_y = 1,4 CP + 1,4 V_y \quad (\text{lateral})$$

$$CC2: CP \cdot V_x = 1,4 CP + 1,4 V_x \quad (\text{frontal})$$

$$CC3: CP \cdot V_e = 1,0 CP + 1,0 V_e \quad (\text{para deslocamentos})$$

Temos para os estados limites últimos (ELU):

$$CC1: q_{1x} = 1,4 \cdot 450 = 630 \text{ N/m}$$

$$q_{1y} = 1,4 \cdot 1027,5 = 1439 \text{ N/m}$$

$$CC2: q_{2x} = 630 \text{ N/m}$$

$$q_{2y} = 1439 \text{ N/m}$$

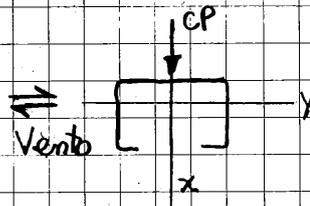
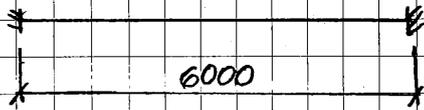
E para o estado limite de serviço (ELS):

$$CC3: q_{3x} = 450 \text{ N/m}$$

$$q_{3y} = 1028 \text{ N/m}$$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 93
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

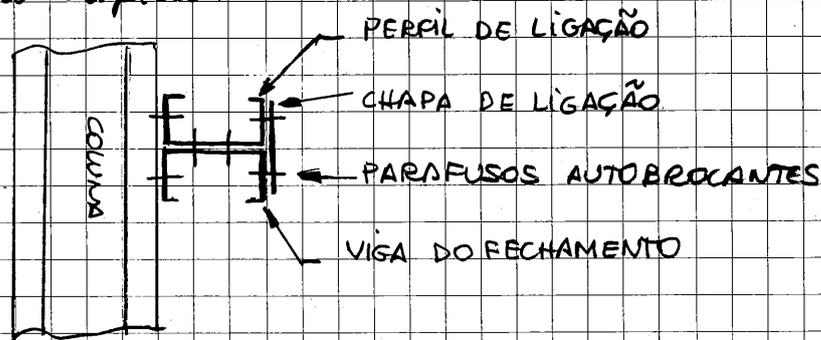
9.3.3. ESFORÇOS SOLICITANTES:



$$q_{ix} = 630 \text{ N/m}$$

$$q_{iy} = 1439 \text{ N/m}$$

As travessas são calculadas como vigas contínuas, com apoio rígido sobre as colunas e com a ligação típica:



NOTA: UTILIZAR ISOLAMENTO COM MANTA ACÚSTICA (BORRACHA ESP. MÍNIMA 1,0 mm) NAS FACES DE CONTATO COM AS COLUNAS.

A LIGAÇÃO NÃO SERÁ DIMENSIONADA NESTE TRABALHO, SEGUINDO O ROTEIRO DO MANUAL.

$$M_{sd} = \frac{q \cdot l^2}{12}$$

$$V_{sd} = \frac{q \cdot l}{2}$$

$$CC1 = CC2: M_{y, sd} = \frac{630 \cdot 6^2}{12} = 1890 \text{ N.m}$$

$$M_{x, sd} = \frac{1439 \cdot 6^2}{12} = 4317 \text{ N.m}$$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 94
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

$$V_{x,sd} = \frac{630 \cdot 6}{2} = 1890 \text{ N}$$

$$V_{y,sd} = \frac{1439 \cdot 6}{2} = 4317 \text{ N}$$

Considerando-se a ABNT 6120, calcula-se a uga também para o carregamento de 1 kN:

CC4: 1,4 CP + 1,0 kN

$$M_{y,sd} = \frac{630 \cdot 6^2}{12} + 1000 \cdot \frac{6}{8} = 2640 \text{ Nm}$$

$$V_{x,sd} = (630 \cdot 6 + 1000) \cdot 0,5 = 2390 \text{ N}$$

9.3.4. TIRANTES DE APOIO DAS TRAVESSAS:

Numa verificação inicial com a combinação cci, temos:

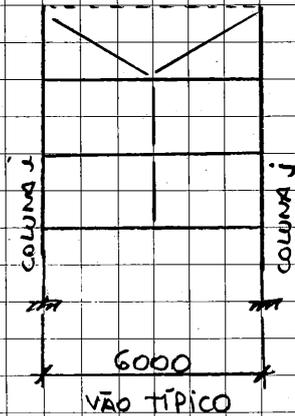
$$\frac{M_{x,sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{4317}{7266} + \frac{1890}{3580} = 1,12 > 1,0 \text{ (não ok)}$$

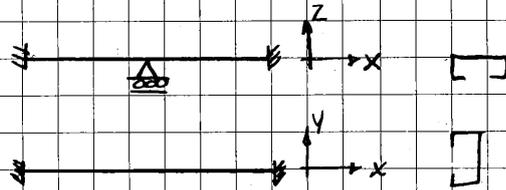
As resistências $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ foram calculadas no item 9.1.

Desta forma, o perfil não resiste à flexão combinada, sendo acrescentados tirantes verticais para apoio central do perfil.

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 95
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	



TIRANTES EM L 60x60x2,
fixados na alma das vigas



Com a adição dos tirantes, temos as cargas de cálculo:

$$CC1 = CC2: M_{y, sd} = 630 \cdot \frac{3^2}{8} = 709 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{x, sd} = 1439 \cdot \frac{6^2}{12} = 4317 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$V_{x, sd} = \frac{5}{8} \cdot 630 \cdot 3 = 1182 \text{ N}$$

$$V_{y, sd} = 1439 \cdot \frac{6}{2} = 4317 \text{ N}$$

$$CC3: M_{y, sd} = 450 \cdot \frac{3^2}{8} = 506 \text{ Nm}$$

$$M_{x, sd} = 11028 \cdot \frac{6^2}{12} = 3084 \text{ Nm}$$

$$V_{x, sd} = 450 \cdot 3 \cdot \frac{5}{8} = 844 \text{ N}$$

$$V_{y, sd} = 1028 \cdot 6 \cdot 0,5 = 3084 \text{ N}$$

$$CC4: M_{y, sd} = 630 \cdot \frac{3^2}{8} + 1000 \cdot 3 \cdot \frac{3}{16} = 1271 \text{ Nm}$$

$$V_{x, sd} = (630 \cdot 3 + 1000) \cdot 0,5 = 1445 \text{ N}$$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 96
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

9.3.6. CÁLCULO DA DEFLEXÃO:

$$\Delta_{y, \max} = \frac{w L^4}{384 EI}$$

$$\Delta_{y, \max} = \frac{6000^4}{384 \cdot 200000 \cdot 5661842} \cdot q_y$$

$$\Delta_{y, \max} = 2,98 q_y \text{ (N/mm)} \quad [\text{mm}]$$

$$\Delta_{x, \max} = 0,0054 \cdot \frac{w L^4}{EI}$$

$$\Delta_{x, \max} = 0,0054 \cdot \frac{3000^4}{200000 \cdot 1200681} \cdot q_x$$

$$\Delta_{x, \max} = 1,82 \cdot q_x \text{ (N/mm)} \quad [\text{mm}]$$

$$\text{CC3 : } \Delta_{y, \max} = 2,98 \cdot 1028 \cdot 10^{-3} = 3,1 \text{ mm}$$

$$\Delta_{x, \max} = 1,82 \cdot 450 \cdot 10^{-3} = 0,8 \text{ mm}$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 97
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov FCR			

9.3.7. VERIFICAÇÃO DAS VIGAS DO FECHAMENTO LATERAL:

a) Conforme NBR-14762, item 9.9:

$$M_{x,Rd} = 7266 \text{ N.m}$$

$$M_{y,Rd} = 3580 \text{ N.m} \quad \text{região do apoio (com enrijecedor comprimido)}$$

Combinação	$M_{x,sd}$ N.m	M_x Sd/Rd	$M_{y,sd}$ N.m	M_y Sd/Rd	M_x+M_y Sd/Rd
CC1 e CC2	4317	0,59	709	0,20	0,79 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
CC4	0	0,00	1271	0,36	0,36 $\leq 1 \Rightarrow$ OK

b) Conforme NBR-14762, item 9.8.4:

$$M_{x,Rd} = 7266 \text{ N.m}$$

$$V_{y,Rd} = 32400 \text{ N}$$

Combinação	$M_{x,sd}$ N.m	$V_{y,sd}$ N	M_x+V_y Sd/Rd
CC1 e CC2	4317	4317	0,37 $\leq 1 \Rightarrow$ OK

$$M_{y,Rd} = 3580 \text{ N.m} \quad \text{região do apoio (com enrijecedor comprimido)}$$

$$V_{x,Rd} = 49300 \text{ N}$$

Combinação	$M_{y,sd}$ N.m	$V_{x,sd}$ N	M_y+V_x Sd/Rd
CC1 e CC2	709	1182	0,04 $\leq 1 \Rightarrow$ OK
CC4	709	1182	0,04 $\leq 1 \Rightarrow$ OK

c) Verificação da deflexão conforme NBR-14762, tabela A.1:

Deslocamento vertical máximo admissível

Conforme NBR-14672, tabela A.1, item "travessas de fechamento":

$$D_{adm} = \frac{L}{180} = \frac{6000}{180} = 33,3 \text{ mm}$$

A favor da segurança, adota-se L/180 para todos os casos de carga.

$$D_{m\acute{a}x} = 3,1 \text{ mm} < 33,3 \text{ mm} \quad (\text{OK})$$

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 98
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	Aprov

10. COMENTÁRIOS FINAIS

A) CARGA DE VENTO

O item 6.2.2 da NBR-6123 indica os tipos de elementos construtivos e vedações impermeáveis segundo os critérios desta norma. Por exclusão, o fechamento por telha trapezoidal deve ser tratado como um revestimento permeável.

No manual de galpões, o coeficiente de pressão interna (c_{pi}) foi adotado conforme item 6.2.5.a, correspondente a "2 faces opostas igualmente permeáveis e as outras faces impermeáveis", mas o galpão não atende a esta condição de impermeabilidade segundo o item 6.6.2.

No cálculo atual, o coeficiente de pressão interna (c_{pi}) foi calculado conforme item 6.2.5.b, sob a hipótese de estrutura com as "4 faces igualmente permeáveis". Esta condição está coerente com o especificado no item 6.2.2 da norma para o fechamento em telha.

A carga de vento longitudinal (VX) no quadro extremo a barlavento foi calculada com $c_{pi}=-0,3$ porque este seria o pior caso para as cargas nos contraventos e para a análise de flexibilidade. Assim, $c_p = c_{p_e} - c_{p_i} = 0,7 - (-0,3) = 1,0$

Esta majoração da carga não interfere significativamente no dimensionamento dos pórticos. No restante do galpão, a carga de vento longitudinal (VX) foi considerada com $c_{pi}=0$.

Para o vento transversal (VY) foi adotado $c_{pi}=0$ em todos os pórticos, pois estes trabalham individualmente. O efeito de se utilizar $c_{pi}=-0,3$ não leva a alteração significativa da carga no pórtico porque o aumento do c_p a sotavento e a redução do c_p a barlavento são equivalentes.

Considerando a simetria geométrica e de carregamento do galpão, foi feito o cálculo somente com o vento em uma direção positiva e mantida a simetria dos perfis no dimensionamento.

B) CARGA DE PESO PRÓPRIO DA COBERTURA E FECHAMENTOS

No manual de galpões, item 2.6.1, as cargas devido ao peso próprio dos fechamentos e cobertura estão aplicadas em uma única carga sobre a cobertura. No cálculo atual, estas cargas foram divididas e aplicadas como cargas distribuídas no elementos específicos, ou seja:

- Peso próprio da cobertura foi aplicado nas tesouras;
- Peso próprio do fechamento foi aplicado nas colunas.

Embora estas cargas sejam transmitidas de forma concentrada, foram inseridas como cargas distribuídas no modelo de cálculo para permitir o ajuste posterior das terças e treliças.

C) TERÇAS E TRAVESSAS

As terças e travessas do fechamento foram calculadas com ligação rígida (engaste) na tesoura e nas colunas, respectivamente, com o objetivo de reduzir os momentos fletores nestas peças.

Conseqüentemente, a seção de apoio fica submetida a esforços de flexão e de cisalhamento, sendo verificada conforme os critérios da NBR-14762, item 9.8.4.

Os comprimentos de flambagem foram adotados conforme NBR-8800, tabela A.1, seguindo o indicado na NBR-14762, item 8.2 para perfis isolados.

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 99
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	

D) ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os perfis indicados atendem aos critérios de dimensionamento da NBR-14762, apresentando resistência suficiente para uso no projeto do galpão.

Para atender aos critérios de deslocabilidade e deslocamentos, foi necessário engastar as bases das colunas e modificar as tesouras de cobertura (de viga para viga-treliça) a fim de conter as deformações laterais e verticais do galpão.

Nesta concepção, também as terças e travessas do fechamentos foram projetadas com ligações rígidas no intuito de tentar contrabalançar os momentos fletores nas seções centrais e de apoio, além de reduzir os deslocamentos destas peças.

Na análise de esforços combinados, as colunas estão adequadamente dimensionadas com fatores de resistência ($S/R = \text{solicitante} / \text{resistente}$) entre 0,7 a 1,0. As tesouras (vigas de cobertura) estão superdimensionadas com fatores de resistência entre 0,3 e 0,4.

Um novo cálculo do galpão pode ser feito para reduzir a seção das tesouras até o seu adequado dimensionamento tanto à resistência (S/R) quanto à deformação da cobertura.

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 100
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov FCR			

ANEXOS

ANEXO A - NOTAS DE CÁLCULO 101

ANEXO B - PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DOS PERFIS 118

ANEXO C - DEFORMAÇÃO DA ESTRUTURA COM TESOURA EM VIGA 122

ANEXO D - VERIFICAÇÃO DOS PERFIS VIA SOFTWARE CUFSM 4.05 126

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 101
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

ANEXO A - NOTAS DE CÁLCULO

Neste anexo estão indicadas as fórmulas e o roteiro de cálculo que foram implementados na planilha de cálculo desenvolvida para o projeto do galpão.

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 102
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

1) BARRAS SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO:

a) Conforme NBR-14762, item 9.7:

$$N_{c,sd} \leq N_{c,rd}$$

$$N_{c,rd} \leq \begin{cases} N_{c,rd,FT} = \chi A_{ef} \cdot f_y / \gamma \\ N_{c,rd,dist} = \chi_{dist} \cdot A_g \cdot f_y / \gamma \end{cases}$$

b) Flambagem global por flexão e por torção (perfil simétrico):

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI}{(k_x L_x)^2}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI}{(k_y L_y)^2}$$

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

$$r_0 = (r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)^{0.5}$$

$$N_e \leq \begin{cases} N_{ex} \\ N_{ey} \\ N_{ez} \end{cases}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}}$$

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

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

$$\sigma_c = \chi f_y$$

σ_c = tensão para verificação da flambagem local conf. 9.2.2 e 9.2.3.

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 103
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

c) Flambagem local pelo método da largura efetiva:

c.1) Elemento 1 - alma:

$$b = b_w - 4t$$

$$k = 4,0 \quad (\text{tabela 4.2, caso "a"})$$

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_c}}} = \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_c}} \quad \lambda_p = \text{índice de esbelteza relativa local}$$

$$\lambda_p \leq 0,673 \quad \left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow \text{não haverá flambagem local no elemento 1 sob a tensão } \sigma_c. \\ \Rightarrow b_{ef} = b. \\ \Rightarrow \sigma_c = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2} \end{array} \right.$$

$$\lambda_p > 0,673 \quad \left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow \text{Elemento 1 tem flambagem local sob a tensão } \sigma_c \\ \Rightarrow b_{ef} = \frac{b}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \leq b. \end{array} \right.$$

c.2) Elemento 2 - aba com enrijecedor a 90°:

$$b = b_f - 4t$$

$$\lambda_{p0} = \frac{b/t}{0,623 \sqrt{\frac{E}{\sigma}}}$$

$$\lambda_{p0} \leq 0,673 \quad \left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow b_{ef} = b_f \\ \Rightarrow d_{ef} = d_s \\ \Rightarrow \text{Aba sem enrijecedor não flamba local} \end{array} \right.$$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 104
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

Para $\lambda_{po} \leq 0,673$:

$$d = D - 2t$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12}$$

$$I_a \leq \begin{cases} 399 t^4 (0,487 \lambda_{po} - 0,328)^3 \\ t^4 (56 \lambda_{po} + 5) \end{cases}$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1$$

$$\frac{D}{b} \leq 0,8$$

$$m = \begin{cases} (0,582 - 0,122 \lambda_{po}) \\ \geq 1/3 \end{cases}$$

$$\text{Se } D/b \leq 0,25 : K = \begin{cases} 3,57 (I_s/I_a)^m + 0,43 \\ \leq 4 \end{cases}$$

$$\text{Se } 0,25 < D/b \leq 0,8 : K = \begin{cases} (4,82 - 5 D/b) (I_s/I_a)^m + 0,43 \\ \leq 4 \end{cases}$$

$$\lambda_p = \frac{b/\tau}{0,95 \sqrt{\frac{KE}{\sigma_c}}}$$

$$\lambda_p \leq 0,673 \Rightarrow b_{ef} = b_f \quad (\text{Aba não flamba local})$$

$$\lambda_p > 0,673 \Rightarrow b_{ef} = \begin{cases} \frac{b}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \\ \leq b_f \end{cases}$$

$$b_{ef,1} = \frac{I_s}{I_a} \cdot \frac{b_{ef}}{2} \leq \frac{b_{ef}}{2}$$

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

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 105
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

c.3) Elemento 3 - enrijecedores a 90°:

$$d = D - 2t$$

$$k = 0,43 \quad (\text{Tabela 4.3, caso "a"})$$

$$\lambda_p = \frac{d/t}{0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_c}}}$$

$$\lambda_p \leq 0,673 \left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow \text{sem flambagem local do enrijecedor} \\ \text{sob a tensão } \sigma_c \\ \Rightarrow d_s = d_{ef} = d \end{array} \right.$$

$$d_{ef} = \begin{cases} d & \text{para } \lambda \leq 0,673 \\ \frac{d}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) & \text{para } \lambda > 0,673 \end{cases} \quad (9.2.2.1)$$

$$\lambda_p > 0,673 \left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow \text{enrijecedor com flambagem local} \\ \Rightarrow d_s = \begin{cases} \left(\frac{I_s}{I_a}\right) d_{ef} = \left(\frac{I_s}{I_a}\right) \cdot \frac{d}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \\ \leq d_{ef} = \frac{d}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \end{cases} \end{array} \right.$$

c.4) Área efetiva:

$$A_{ef} = A_g - \left(\sum_{i=1}^3 (b_i - b_{ef,i}) \cdot t \right) \times 2$$

↙ Perfil composto, a área inefetiva de cada perfil foi dobrada.

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 106
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

d) Flambagem local pelo método da seção efetiva:

$$N_e = k_e \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_w/t)^2} \cdot A$$

$$k_e = 6,8 - 5,8 \eta + 9,2 \eta^2 - 6,0 \eta^3 \quad (\text{tabela 9, caso b})$$

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} \quad 0,1 \leq \eta \leq 1,0$$

$$\eta' = \frac{D}{b_w} \quad 0,1 \leq \eta' \leq 0,3$$

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi A_g f_y}{N_e} \right)^{1/2}$$

$$\lambda_p \leq 0,776 \quad \Rightarrow \quad A_{ef} = A_g$$

$$\lambda_p > 0,776 \quad \Rightarrow \quad A_{ef} = \frac{A}{\lambda_p^{0,8}} \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}} \right)$$

e) Flambagem distorcional

Conforme tabela 11 da NBR-14762 (U ensajeado):

$$\left. \begin{array}{l} \frac{b_f}{b_w} = m_1 \\ \frac{b_w}{t} = m_2 \end{array} \right\} \text{ com os valores de } m_1 \text{ e } m_2 \text{ obtêm-se da} \\ \text{tabela 2 o valor de:} \\ m_3 = \frac{D}{b_w} \text{ mínimo}$$

Se $\frac{D}{b_w} \geq m_3 \Rightarrow$ dispensada a verificação da flambagem distorcional

Se $\frac{D}{b_w} < m_3 \Rightarrow$ verificar a flambagem distorcional

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 107
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

Cálculo da flambagem distorcional:

N_{dist} = carga axial de flambagem distorcional elástica, a ser calculada via o programa CUFSM 4.0.

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{dist}}}$$

$$\chi_{dist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}} \right) \frac{1}{\lambda_{dist}^{1,2}} \quad \text{para } \lambda_{dist} > 0,561$$

$$\chi_{dist} = 1,0 \quad \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,561$$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 108
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

2) BARRAS SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES:

a) Conforme NBR-14762, item 9.8:

$$M_{sd} \leq M_{rd}$$

$$V_{sd} \leq V_{rd}$$

$$M_{rd} \leq \begin{cases} W_{ef} \cdot f_y / \gamma & \text{(ELU escoamento seção efetiva)} \\ \chi_{FLT} \cdot W_{G,ef} \cdot f_y / \gamma & \text{(ELU flambagem lateral / torção)} \\ \chi_{diat} \cdot W \cdot f_y / \gamma & \text{(ELU flambagem distorcional)} \end{cases}$$

b) Início de escoamento da seção efetiva pelo MLE:

$$\sigma_c = f_y$$

b.1) Elemento 2 - Flange comprimido:

O flange é tratado como um elemento uniformemente comprimido na flexão, ou seja: $\sigma_c = f_y$

$$b = b_f - 4t$$

$$\lambda_{po} = \frac{b/t}{0,623 \sqrt{\frac{E}{f_y}}}$$

$$\lambda_{po} \leq 0,673 \Rightarrow \begin{cases} b_{ef} = b_f \\ d_{ef} = d_s \\ \text{Aba sem enrijecedor não flamba local} \end{cases}$$

Para $\lambda > 0,673$, temos:

$$d = D - 2t$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12}$$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 109
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

$$I_a \leq \begin{cases} 399 t^4 (0,487 \lambda_{po} - 0,328)^3 \\ t^4 (56 \lambda_{po} + 5) \end{cases}$$

$$\frac{I_s}{I_a} \leq 1 \quad e \quad \frac{D}{b} \leq 0,8 \quad \text{para cálculo de } K$$

$$m = \begin{cases} (0,582 - 0,122 \lambda_{po}) \\ \geq 1/3 \end{cases}$$

$$\text{Se } D/b \leq 0,25: \quad K = \begin{cases} 3,57 (I_s/I_a)^m + 0,43 \\ \leq 4 \end{cases}$$

$$\text{Se } 0,25 \leq \frac{D}{b} \leq 0,8: \quad K = \begin{cases} (4,82 - 5 D/b) (I_s/I_a)^m + 0,43 \\ \leq 4 \end{cases}$$

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95 \sqrt{\frac{KE}{f_y}}}$$

$$\lambda_p \leq 0,673 \Rightarrow b_{ef} = b_f \quad (\text{Aba não flamba local na flexão})$$

$$\lambda_p > 0,673 \Rightarrow b_{ef} = \begin{cases} \frac{b}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \\ \leq b_f \end{cases}$$

$$b_{ef,1} = \frac{I_s}{I_a} \cdot \frac{b_{ef}}{2} \leq \frac{b_{ef}}{2}$$

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

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 110
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	

b.2) Elemento 3 - enrijecedor a 90°:

Na 1ª iteração considera-se o enrijecedor com tensão uniforme e igual a que solicita a mesa, ou seja:

$$\sigma_c = f_y$$

$$d = D - 2t$$

$$K = 0,43 \quad (\text{tabela 4.3, caso a})$$

$$\lambda_p = \frac{d/\tau}{0,95 \sqrt{\frac{KE}{f_y}}}$$

$$\lambda_p \leq 0,673 \Rightarrow \begin{cases} d_s = d_{ef} = d \\ \text{Enrijecedor não flamba local com } f_y. \end{cases}$$

$$\lambda_p > 0,673 \Rightarrow \begin{cases} d_s \leq \begin{cases} \frac{I_s}{I_a} \cdot \frac{d}{\lambda_p} \cdot \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \\ d_{ef} = \frac{d}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \end{cases} \\ \text{Enrijecedor flamba local com } f_y. \end{cases}$$

Conforme item 9.2.2.1 da NBR-14762

$$d_{ef} = \begin{cases} d & \text{para } \lambda \leq 0,673 \\ \frac{d}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) & \text{para } \lambda > 0,673 \end{cases}$$

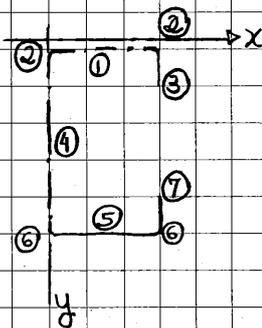
d_s = largura efetiva reduzida do enrijecedor
(a ser usada no cálculo da área efetiva)

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	111
		Data	Elab. ARM	Verif.	

b.3) Elemento 1 - alma do perfil

A linha neutra (LN) da seção do perfil muda de posição devido à redução da área dos elementos e, portanto, deve ser calculada uma linha neutra da seção efetiva (LNe) até a convergência dos valores de tensão e propriedades da seção.

As propriedades da seção efetiva são calculadas pelo método linear, conforme mostrado abaixo:



— Considera-se a massa linear, ou seja, concentrada na linha média da seção.

① Flange superior: $L = b_{ef}$ (largura efetiva)
 $y = 0,5 t$

② Cantos superiores: $L = 1,57 R_m$
 $y = 2t - 0,637 R_m$
 $R_m = 1,5 t$

④ Alma é separada em seção cheia e área inefetiva
Na seção cheia: $L = b_w - 4t$
 $y = 0,5 b_w$

Na área inefetiva: $L = -b_c + (b_{ef-1} + b_{ef-2})$
 $b_c = y_{cc} - 2t$
 $y = (2t + b_{ef-1}) + \frac{b_{inef}}{2}$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	112
		Data	Elab. ARM	Verif.	

③ Enrijecedor superior: $L = d_s$ (largura efetiva)
 $y = 2t + 0,5d_s$

⑤ Flange inferior: $L = b_f$ (largura total)
 $y = b_w - 0,5t$

⑥ Cantos inferiores: $L = 1,57 R_m$
 $y = b_w - (2t - 0,637 R_m)$
 $R_m = 1,5t$

⑦ Enrijecedor inferior: $L = d$ (largura total)
 $y = 2t + 0,5d$

$$y_{cg} = \frac{\sum Ly}{\sum L}$$

No processo iterativo, calcula-se em cada etapa:

$$y_{cg} = \sum Ly / \sum L$$

$$y_c = y_{cg}$$

distância da borda comprimida

$$y_t = b_w - y_{cg}$$

distância da borda traçionada

$$\sigma_1 = \frac{(y_c - 2t)}{y_{cg}} \cdot f_y$$

Tensão de compressão na alma

$$\sigma_2 = \frac{(y_t - 2t)}{y_{cg}} \cdot f_y$$

Tensão de tração na alma

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

$\psi \leq -0,236 \Rightarrow$ Tabela 5, caso d.

$-0,236 < \psi < 0 \Rightarrow$ Tabela 5, caso c.

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	113
		Data	Elab. ARM	Verif.	

Como as tensões σ_1 e σ_2 têm valores próximos (em módulo), geralmente $\psi \leq -0,236$. Nesse caso:

$$\psi \leq -0,236 \Rightarrow K = 4 + 2(1-\psi)^3 + 2(1-\psi)$$

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95 \sqrt{\frac{KE}{\sigma_1}}}$$

$$\lambda_p \leq 0,673 \Rightarrow \begin{cases} b_{ef} = b \\ \text{Alma não flamba com } \sigma_1 \end{cases}$$

Para $\lambda_p > 0,673$ (alma flamba com σ_1):

$$b_c = y_{cg} - 2t$$

$$b_{ef} = \begin{cases} \frac{b_c}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \\ \leq b_c \end{cases}$$

$$b_{ef-1} = \frac{b_{ef}}{3-\psi} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Com as condições:} \\ \psi \leq -0,236 \end{array} \right\}$$

$$b_{ef-2} = 0,5 b_{ef} \quad \left. \begin{array}{l} b_{ef-1} + b_{ef-2} = b_c \Rightarrow b_{ef-1} \leq 0,5 b_c \end{array} \right\}$$

$$b_{inef} = (b_{ef-1} + b_{ef-2}) - b_c \quad (\text{valor negativo})$$

O processo anterior é repetido até que a diferença dos valores do y_{cg} seja menor que 5%.

Para a seção final, calcula-se:

$$I_{x'} = b^3/12 \quad (\text{inércia efetiva de cada elemento})$$

$$I_x = \left(\sum L_y^2 - \sum I_{x'} - y_{cg}^2 \cdot \sum L \right) \cdot t \quad (\text{inércia da seção efetiva})$$

$$W_{ef} = I_x / y_{cg}$$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	114
		Data	Elab. ARM	Verif.	

c) Início do escoamento da seção efetiva pelo MSE:

$$\eta = \frac{bf}{bw} \quad \text{com } 0,2 \leq \eta \leq 1,0$$

$$\mu = \frac{D}{bw} \quad \text{com } \mu \leq 0,3$$

K_e é obtido da tabela 13, caso b, com interpolação.

$$M_e = K_e \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(bw/t)^2} \cdot W_x$$

$$\lambda_p = \left(\frac{W_x f_y}{M_e} \right)^{1/2}$$

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

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

d) Flambagem lateral com torção:

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

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

$$r_0^2 = r_{xx}^2 + r_{yy}^2 + x_0^2 + y_0^2$$

$$C_b = \frac{1,25 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

Δ fator da segurança e por simplificação, adota-se $C_b = 1,0$ no cálculo.

$$M_e = C_b \cdot r_0 \cdot (N_{ey} \cdot N_{ez})^{1/2}$$

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	115
		Data	Elab. ARM	Verif.	

$$\lambda_0 = \left(\frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{1/2}$$

Para $\lambda_0 < 0,6 \Rightarrow \chi_{FLT} = 1,0$

Para $0,6 < \lambda_0 < 1,336 \Rightarrow \chi_{FLT} = 1,11 (1 - 0,278 \lambda_0^2)$

Para $\lambda_0 \geq 1,336 \Rightarrow \chi_{FLT} = 1/\lambda_0^2$

$$\sigma_c = \chi_{FLT} \cdot f_y$$

(e) Flambagem lateral com torção pelo MLE:

O cálculo de $W_{c,ef}$ segue o mesmo procedimento feito anteriormente (para escoamento), porém com a tensão de compressão $\sigma_c = \chi_{FLT} \cdot f_y$

(f) Flambagem lateral com torção pelo MSE:

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} \quad \text{com } 0,2 \leq \eta \leq 1,0$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} \quad \text{com } \mu \leq 0,3$$

K_e é obtido da tabela 13, caso b, com interpolação.

$$M_{\phi} = K_e \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) (b_w/t)^2} \cdot W_c$$

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi_{FLT} \cdot W_c \cdot f_y}{M_e} \right)^{1/2}$$

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

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

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 116
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	Aprov.

g) Flambagem distorcional:

M_{dist} é o momento fletor de flambagem distorcional, a ser calculado via programa CURSIM 4.0.

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{W \cdot f_y}{M_{dist}} \right)^{1/2}$$

$$\chi_{dist} = 1,0 \quad \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,673$$

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

Conforme a Tabela 14 da NBR-14762, pode ser dispensada a verificação da flambagem distorcional quando: $\frac{D}{b_w} \geq \frac{D}{b_w} / \text{mínimo}$ dado na tabela 14.

$$\left. \begin{array}{l} m_1 = \frac{b_f}{b_w} \\ m_2 = \frac{b_w}{t} \end{array} \right\} m_3 = \frac{D}{b_w} / \text{mínimo} \quad \text{é obtido da tabela 14 com os valores de } m_1 \text{ e } m_2 \text{ e por interpolação.}$$

Se $\frac{D}{b_w} < m_3 \Rightarrow$ verificar a flambagem distorcional

Se $\frac{D}{b_w} \geq m_3 \Rightarrow$ dispensada a verificação.

UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO			Folha 117
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL		Rev 0	
		Data	Elab. ARM	Verif.	Aprov

3. DIMENSIONAMENTO:

A estrutura principal é formada por pórticos transversais, colunas contraventadas longitudinais e travessas contraventadas na cobertura.

Nesta concepção, as barras estão submetidas à combinação de esforços normais de tração ou compressão e de esforços de flexão no eixo de maior inércia (I_x). Para os pórticos extremos, nos eixos 1 e 10, ocorre também a flexão no eixo de menor inércia (I_y) devido à carga de vento.

Conforme NBR-14762, item 9.9, o dimensionamento deve atender ao requisito:

$$\frac{S_d}{R_d} = \frac{N_{sd}}{N_{rd}} + \frac{M_{x,sd}}{M_{x,rd}} + \frac{M_{y,sd}}{M_{y,rd}} \leq 1,0$$

Onde: N_{sd} , $M_{x,sd}$, $M_{y,sd}$ são de cálculo estrutural

N_{rd} , $M_{x,rd}$, $M_{y,rd}$ são calculados conforme itens 1 e 2 anteriores.

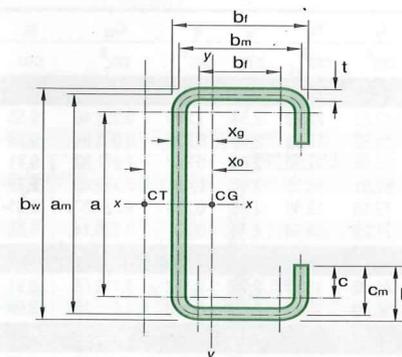
EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 118
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov FCR			

ANEXO B

PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DOS PERFIS

t=ri	A	m	Barra	I _x	W _x	r _x	x _g	x ₀	I _y	W _y	r _y	I _t	C _w	r ₀
mm	cm ²	kg/m	kg	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ⁶	cm
U 75 x 40														
4,75	6,62	5,20	31,18	54,07	14,42	2,86	1,26	2,46	9,97	3,64	1,23	0,497	89,06	3,96
4,25	5,99	4,71	28,23	49,81	13,28	2,88	1,23	2,47	9,14	3,30	1,23	0,361	82,46	3,99
3,75	5,35	4,20	25,20	45,23	12,06	2,91	1,21	2,48	8,26	2,96	1,24	0,251	75,27	4,02
3,35	4,82	3,79	22,72	41,34	11,02	2,93	1,19	2,48	7,52	2,68	1,25	0,180	69,09	4,04
3,00	4,35	3,42	20,51	37,76	10,07	2,94	1,17	2,49	6,85	2,42	1,25	0,130	63,34	4,06
2,65	3,88	3,04	18,26	34,01	9,07	2,96	1,16	2,50	6,15	2,16	1,26	0,091	57,28	4,07
2,25	3,32	2,61	15,64	29,52	7,87	2,98	1,14	2,51	5,32	1,86	1,27	0,056	49,94	4,10
2,00	2,97	2,33	13,98	26,60	7,09	2,99	1,13	2,51	4,78	1,66	1,27	0,040	45,13	4,11
U 68 x 30 (*)														
2,25	2,71	2,13	12,78	18,68	5,49	2,62	0,81	1,74	2,31	1,05	0,92	0,046	17,81	3,28
2,00	2,43	1,91	11,44	16,88	4,96	2,64	0,79	1,74	2,08	0,94	0,93	0,032	16,16	3,29
U 50 x 25														
3,00	2,70	2,12	12,74	9,71	3,89	1,90	0,77	1,50	1,57	0,91	0,76	0,081	6,27	2,53
2,65	2,42	1,90	11,39	8,85	3,54	1,91	0,75	1,50	1,42	0,81	0,77	0,057	5,75	2,55
2,25	2,08	1,64	9,81	7,79	3,12	1,93	0,73	1,51	1,25	0,70	0,77	0,035	5,09	2,57
2,00	1,87	1,47	8,80	7,07	2,83	1,95	0,72	1,52	1,13	0,63	0,78	0,025	4,64	2,59
U 45 x 20 (*)														
2,25	1,75	1,37	8,22	5,04	2,24	1,70	0,57	1,15	0,64	0,45	0,60	0,029	2,10	2,14
2,00	1,57	1,23	7,39	4,60	2,04	1,71	0,56	1,15	0,58	0,40	0,61	0,021	1,93	2,15

(*) **Perfis de encaixe** - Linha de perfis com medidas especiais que a Tecnofer oferece para facilitar ainda mais a montagem de estruturas.



"U" ENRIJECIDO

Com uma grande variedade de aplicações desde a construção civil pesada até estruturas de máquinas e instalações industriais, o Perfil "U" Enrijecido Tecnofer é um dos mais comercializados em todo o país.

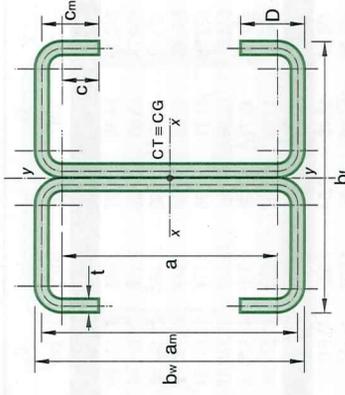
Designação NBR 6355: **Ue b_w x b_f x D x t_n**
(Exemplo: Ue 150 x 60 x 20 x 2,65)

t=ri	A	m	Barra	I _x	W _x	r _x	x _g	x ₀	I _y	W _y	r _y	I _t	C _w	r ₀
mm	cm ²	kg/m	kg	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ⁶	cm
Ue 300 x 100 x 25														
4,75	24,64	19,34	116,06	3.269,56	217,97	11,52	2,70	6,54	291,49	39,96	3,44	1,851	52.671,43	13,69
4,25	22,19	17,42	104,50	2.962,01	197,47	11,55	2,71	6,60	266,95	36,61	3,47	1,335	48.142,60	13,75
3,75	19,70	15,46	92,79	2.645,98	176,40	11,59	2,71	6,66	241,02	33,06	3,50	0,923	43.389,66	13,82
3,35	17,69	13,88	83,31	2.387,01	159,13	11,62	2,71	6,71	219,25	30,08	3,52	0,661	39.422,06	13,87
3,00	15,91	12,49	74,93	2.155,90	143,73	11,64	2,71	6,75	199,46	27,37	3,54	0,477	35.827,35	13,91
2,65	14,11	11,08	66,47	1.920,58	128,04	11,67	2,72	6,79	178,97	24,57	3,56	0,330	32.115,67	13,96
Ue 300 x 85 x 25														
4,75	23,22	18,23	109,35	2.959,01	197,27	11,29	2,20	5,33	193,55	30,71	2,89	1,744	35.606,89	12,82
4,25	20,91	16,42	98,50	2.683,21	178,88	11,33	2,20	5,39	177,84	28,22	2,92	1,258	32.623,96	12,88
3,75	18,58	14,58	87,49	2.399,14	159,94	11,36	2,20	5,45	161,08	25,57	2,94	0,870	29.473,26	12,94
3,35	16,68	13,10	78,57	2.165,90	144,39	11,39	2,20	5,49	146,91	23,32	2,97	0,623	26.828,70	12,99
3,00	15,01	11,78	70,69	1.957,43	130,50	11,42	2,20	5,53	133,94	21,26	2,99	0,450	24.422,19	13,04
2,65	13,32	10,45	62,73	1.744,85	116,32	11,45	2,20	5,57	120,43	19,12	3,01	0,311	21.927,55	13,08
2,25	11,37	8,92	53,54	1.496,84	99,79	11,48	2,20	5,62	104,32	16,57	3,03	0,192	18.966,44	13,13
2,00	10,14	7,96	47,75	1.339,09	89,27	11,49	2,20	5,64	93,89	14,91	3,04	0,135	17.055,02	13,16
Ue 250 x 100 x 25														
4,75	22,27	17,48	104,88	2.126,71	170,14	9,77	2,97	7,04	275,49	39,18	3,52	1,673	35.206,53	12,55
4,25	20,06	15,75	94,49	1.928,96	154,32	9,81	2,97	7,10	252,32	35,90	3,55	1,207	32.218,03	12,61
3,75	17,83	13,99	83,96	1.725,17	138,01	9,84	2,98	7,16	227,83	32,43	3,58	0,835	29.072,02	12,68
3,35	16,01	12,57	75,42	1.557,77	124,62	9,86	2,98	7,21	207,28	29,52	3,60	0,598	26.438,85	12,73
3,00	14,41	11,31	67,86	1.408,08	112,65	9,89	2,98	7,25	188,58	26,86	3,62	0,432	24.048,03	12,78
2,65	12,79	10,04	60,23	1.255,39	100,43	9,91	2,98	7,29	169,21	24,11	3,64	0,299	21.574,59	12,83
Ue 250 x 85 x 25														
4,75	20,84	16,36	98,16	1.912,44	153,00	9,58	2,42	5,77	183,39	30,17	2,97	1,566	23.805,91	11,57
4,25	18,79	14,75	88,49	1.736,46	138,92	9,61	2,42	5,83	168,51	27,73	2,99	1,130	21.837,62	11,63
3,75	16,70	13,11	78,66	1.554,63	124,37	9,65	2,43	5,89	152,64	25,13	3,02	0,782	19.752,09	11,70
3,35	15,01	11,78	70,68	1.404,92	112,39	9,68	2,43	5,93	139,21	22,92	3,05	0,561	17.996,84	11,75
3,00	13,51	10,60	63,62	1.270,81	101,67	9,70	2,43	5,97	126,92	20,91	3,07	0,405	16.396,10	11,80
2,65	11,99	9,41	56,49	1.133,79	90,70	9,72	2,43	6,02	114,13	18,80	3,08	0,280	14.733,46	11,84
2,25	10,24	8,04	48,24	973,59	77,89	9,75	2,43	6,06	98,87	16,29	3,11	0,173	12.755,84	11,89
2,00	9,14	7,17	43,04	871,52	69,72	9,77	2,43	6,09	88,98	14,67	3,12	0,122	11.477,06	11,93
Ue 200 x 100 x 25														
4,75	19,89	15,62	93,69	1.263,30	126,33	7,97	3,29	7,63	255,66	38,13	3,59	1,495	21.779,32	11,60
4,25	17,94	14,08	84,49	1.147,68	114,77	8,00	3,30	7,69	234,22	34,95	3,61	1,079	19.966,65	11,67
3,75	15,95	12,52	75,13	1.028,07	102,81	8,03	3,30	7,75	211,55	31,59	3,64	0,747	18.049,40	11,74
3,35	14,34	11,25	67,53	929,48	92,95	8,05	3,31	7,80	192,50	28,76	3,66	0,536	16.438,12	11,79
3,00	12,91	10,13	60,80	841,08	84,11	8,07	3,31	7,84	175,17	26,18	3,68	0,387	14.970,33	11,84
2,65	11,46	9,00	53,99	750,68	75,07	8,09	3,31	7,89	157,20	23,51	3,70	0,268	13.447,29	11,89

"I" ENRIJECIDO

Mais uma solução estrutural extremamente eficaz que a Tecnofer coloca à disposição dos profissionais de engenharia e arquitetura. Funcionalidade e versatilidade em uma infundável lista de possibilidades de uso.

Designação NBR 6355: **Ie b_w x b_f x D x t_n**
(Exemplo: Ie 150 x 120 X 20 x 4,75)



t=fi	A	m	Barra	k _x	W _x	f _x	I _y	W _y	f _y	I _t	C _w
mm	cm ²	kg/m	kg	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ⁶
I 150 x 100											
4,75	22,27	17,48	104,88	689,69	91,96	5,57	70,90	14,18	1,78	1,673	3,628,24
4,25	20,06	15,75	94,49	627,49	83,66	5,59	63,96	12,79	1,79	1,207	3,318,47
3,75	17,83	13,99	83,96	582,91	75,05	5,62	56,95	11,39	1,79	0,835	2,992,83
3,35	16,01	12,57	75,42	509,52	67,94	5,64	51,27	10,25	1,79	0,598	2,720,61
3,00	14,41	11,31	67,86	461,52	61,54	5,66	46,25	9,25	1,79	0,432	2,473,69
2,65	12,79	10,04	60,23	412,34	54,98	5,68	41,17	8,23	1,79	0,299	2,218,45
2,25	10,92	8,57	51,42	354,64	47,29	5,70	35,27	7,05	1,80	0,184	1,916,39
2,00	9,74	7,64	45,86	317,77	42,37	5,71	31,54	6,31	1,80	0,130	1,721,88
I 125 x 100											
4,75	19,89	15,62	93,69	443,73	71,00	4,72	70,63	14,13	1,88	1,495	2,335,31
4,25	17,94	14,08	84,49	404,57	64,73	4,75	63,77	12,75	1,89	1,079	2,139,49
3,75	15,95	12,52	75,13	363,69	58,19	4,78	56,82	11,36	1,89	0,747	1,932,74
3,35	14,34	11,25	67,53	329,74	52,76	4,80	51,18	10,24	1,89	0,536	1,759,25
3,00	12,91	10,13	60,80	299,11	47,86	4,81	46,18	9,24	1,89	0,387	1,601,41
2,65	11,46	9,00	53,99	267,60	42,82	4,83	41,12	8,22	1,89	0,268	1,437,81
2,25	9,79	7,69	46,12	230,53	36,88	4,85	35,25	7,05	1,90	0,165	1,243,64
2,00	8,74	6,86	41,15	206,76	33,08	4,86	31,52	6,30	1,90	0,116	1,118,31
I 100 x 100											
4,75	17,52	13,75	82,50	260,19	52,04	3,85	70,36	14,07	2,00	1,316	1,357,74
4,25	15,81	12,41	74,48	237,93	47,59	3,88	63,58	12,72	2,01	0,951	1,247,04
3,75	14,08	11,05	66,30	214,53	42,91	3,90	56,69	11,34	2,01	0,659	1,129,36
3,35	12,66	9,94	59,64	194,95	38,99	3,92	51,09	10,22	2,01	0,473	1,030,03
3,00	11,41	8,96	53,73	177,19	35,44	3,94	46,12	9,22	2,01	0,342	939,24
2,65	10,14	7,96	47,75	158,85	31,77	3,96	41,07	8,21	2,01	0,237	844,74
2,25	8,67	6,80	40,82	137,14	27,43	3,98	35,22	7,04	2,02	0,146	732,09
2,00	7,74	6,07	36,44	123,18	24,64	3,99	31,50	6,30	2,02	0,103	659,11
I 100 x 80											
4,75	15,62	12,26	73,55	217,09	43,42	3,73	35,49	8,87	1,51	1,173	723,11
4,25	14,11	11,08	66,47	198,97	39,79	3,75	32,06	8,01	1,51	0,849	666,62
3,75	12,58	9,87	59,23	179,79	35,96	3,78	28,58	7,15	1,51	0,589	605,93
3,35	11,32	8,89	53,33	163,66	32,73	3,80	25,77	6,44	1,51	0,423	554,24
3,00	10,21	8,01	48,08	148,97	29,79	3,82	23,27	5,82	1,51	0,306	506,66
2,65	9,08	7,13	42,76	133,73	26,75	3,84	20,75	5,19	1,51	0,212	456,81
2,25	7,77	6,10	36,58	115,65	23,13	3,86	17,81	4,45	1,51	0,131	397,01
2,00	6,94	5,45	32,67	103,97	20,79	3,87	15,95	3,99	1,52	0,092	358,06
I 75 x 80											
4,75	13,24	10,39	62,37	108,13	28,83	2,86	35,22	8,81	1,63	0,995	356,26
4,25	11,99	9,41	56,46	99,62	26,56	2,88	31,86	7,97	1,63	0,721	329,85
3,75	10,70	8,40	50,40	90,47	24,12	2,91	28,45	7,11	1,63	0,501	301,10
3,35	9,65	7,57	45,44	82,68	22,05	2,93	25,67	6,42	1,63	0,361	276,35
3,00	8,71	6,84	41,02	75,51	20,14	2,94	23,21	5,80	1,63	0,261	253,36
2,65	7,75	6,09	36,52	68,02	18,14	2,96	20,70	5,17	1,63	0,181	229,10
2,25	6,64	5,21	31,28	59,04	15,74	2,98	17,78	4,45	1,64	0,112	199,77
2,00	5,94	4,66	27,96	53,21	14,19	2,99	15,93	3,98	1,64	0,079	180,54
I 50 x 50											
3,00	5,41	4,25	25,47	19,43	7,77	1,90	5,43	2,17	1,00	0,162	25,08
2,65	4,84	3,80	22,79	17,71	7,08	1,91	4,86	1,94	1,00	0,113	23,00
2,25	4,17	3,27	19,63	15,58	6,23	1,93	4,19	1,67	1,00	0,070	20,36
2,00	3,74	2,93	17,60	14,15	5,66	1,95	3,76	1,50	1,00	0,050	18,58

Para dimensões não constantes destas tabelas consulte o Departamento Técnico da Tecnofer.

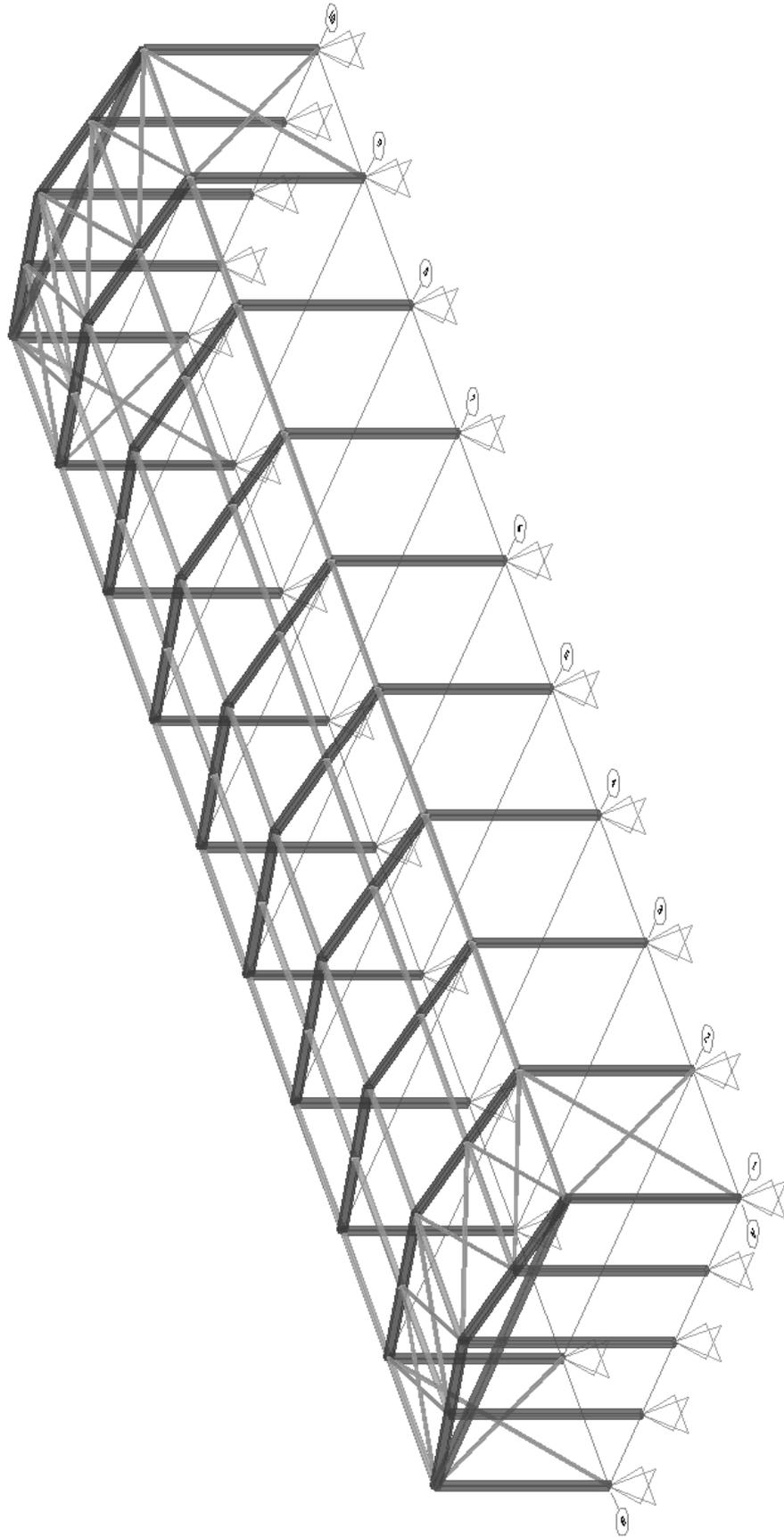
t=fi	A	m	Barra	k _x	W _x	f _x	I _y	W _y	f _y	I _t	C _w
mm	cm ²	kg/m	kg	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ⁶
Ie 300 x 200 x 25											
4,75	49,28	38,69	232,13	6.539,12	435,94	11,52	943,56	94,36	4,38	3,703	210.685,72
4,25	44,38	34,83	209,01	5.924,02	394,93	11,55	859,16	85,92	4,40	2,689	192.570,41
3,75	39,40	30,93	185,58	5.291,95	352,80	11,59	771,36	77,14	4,42	1,845	173.558,63
3,35	35,37	27,77	166,61	4.774,01	318,27	11,62	698,65	69,86	4,44	1,322	157.688,22
3,00	31,82	24,98	149,86	4.311,81	287,45	11,64	633,19	63,32	4,46	0,954	143.309,41
2,65	28,23	22,16	132,95	3.856,08	256,08	11,67	566,02	56,60	4,48	0,660	128.462,69
2,25	24,08	18,91	113,44	3.292,90	219,53	11,69	487,12	48,71	4,50	0,406	110.911,48
2,00	21,47	16,86	101,14	2.944,58	196,31	11,71	436,65	43,66	4,51	0,286	99.620,64
Ie 300 x 170 x 25											
4,75	46,43	36,45	218,70	5.918,01	394,53	11,29	611,37	71,93	3,63	3,489	142.427,55
4,25	41,83	32,83	197,00	5.366,41	357,76	11,33	557,87	65,63	3,65	2,516	130.495,83
3,75	37,15	29,16	174,98	4.798,28	319,89	11,36	501,92	59,05	3,68	1,740	117.893,03
3,35	33,36	26,19	157,15	4.331,81	288,79	11,39	453,37	53,57	3,69	1,247	107.314,81
3,00	30,02	23,56	141,38	3.914,87	260,99	11,42	413,30	48,62	3,71	0,900	97.688,75
2,65	26,64	20,91	125,46	3.489,71	232,65	11,45	369,99	43,53	3,73	0,623	87.701,19
2,25	22,73	17,85	107,08	2.993,69	199,58	11,48	318,93	37,52	3,75	0,383	75.865,74
2,00	20,27	15,92	95,49	2.678,17	178,54	11,49	286,18	33,67	3,76	0,270	68.220,07
Ie 250 x 200 x 25											
4,75	44,53	34,96	209,75	4.253,43	340,27	9,77	943,30	94,33	4,60	3,346	140.826,13
4,25	40,13	31,50	188,99	3.857,92	308,63	9,81	858,97	85,90	4,63	2,413	128.872,13
3,75	35,65	27,99	167,92	3.450,35	276,03	9,84	771,23	77,12	4,65	1,669	116.288,06
3,35	32,02	25,14	150,84	3.115,54	249,24	9,86	698,55	69,86	4,67	1,197	105.755,38
3,00	28,82	22,62	135,73	2.816,17	225,29	9,89	633,12	63,31	4,69	0,864	96.192,12
2,65	25,58	20,08	120,47	2.510,78	200,86	9,91	565,97	56,60	4,70	0,598	86.298,35
2,25	21,83	17,14	102,84	2.154,35	172,35	9,93	487,09	48,71	4,72	0,368	74.578,41
2,00	19,47	15,29	91,72	1.927,54	154,20	9,95	436,63	43,66	4,74	0,259	67.025,85
Ie 250 x 170 x 25											
4,75	41,68	32,72	196,33	3.824,88	305,99	9,58	611,10	71,89	3,83	3,132	95.223,64
4,25	37,58	29,50	176,98	3.472,91	277,83	9,61	557,68	65,61	3,85	2,260	87.350,48
3,75	33,40	26,22	157,32	3.109,25	248,74	9,65	501,79	59,03	3,88	1,564	79.008,35
3,35	30,01	23,56	141,37	2.809,84	224,79	9,68	455,27	53,56	3,89	1,122	71.987,37
3,00	27,02	21,21	127,25	2.541,63	203,33	9,70	413,23	48,62	3,91	0,810	65.584,41
2,65	23,99	18,83	112,98	2.267,58	181,41	9,72	369,94	43,52	3,93	0,561	58.933,84
2,25	20,48	16,08	96,48	1.947,19	155,78	9,75	318,91	37,52	3,95	0,349	51.023,38
2,00	18,27	14,35	86,07	1.743,03	139,44	9,77	286,16	33,67	3,96	0,243	45.908,23

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 122
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov FCR			

ANEXO C

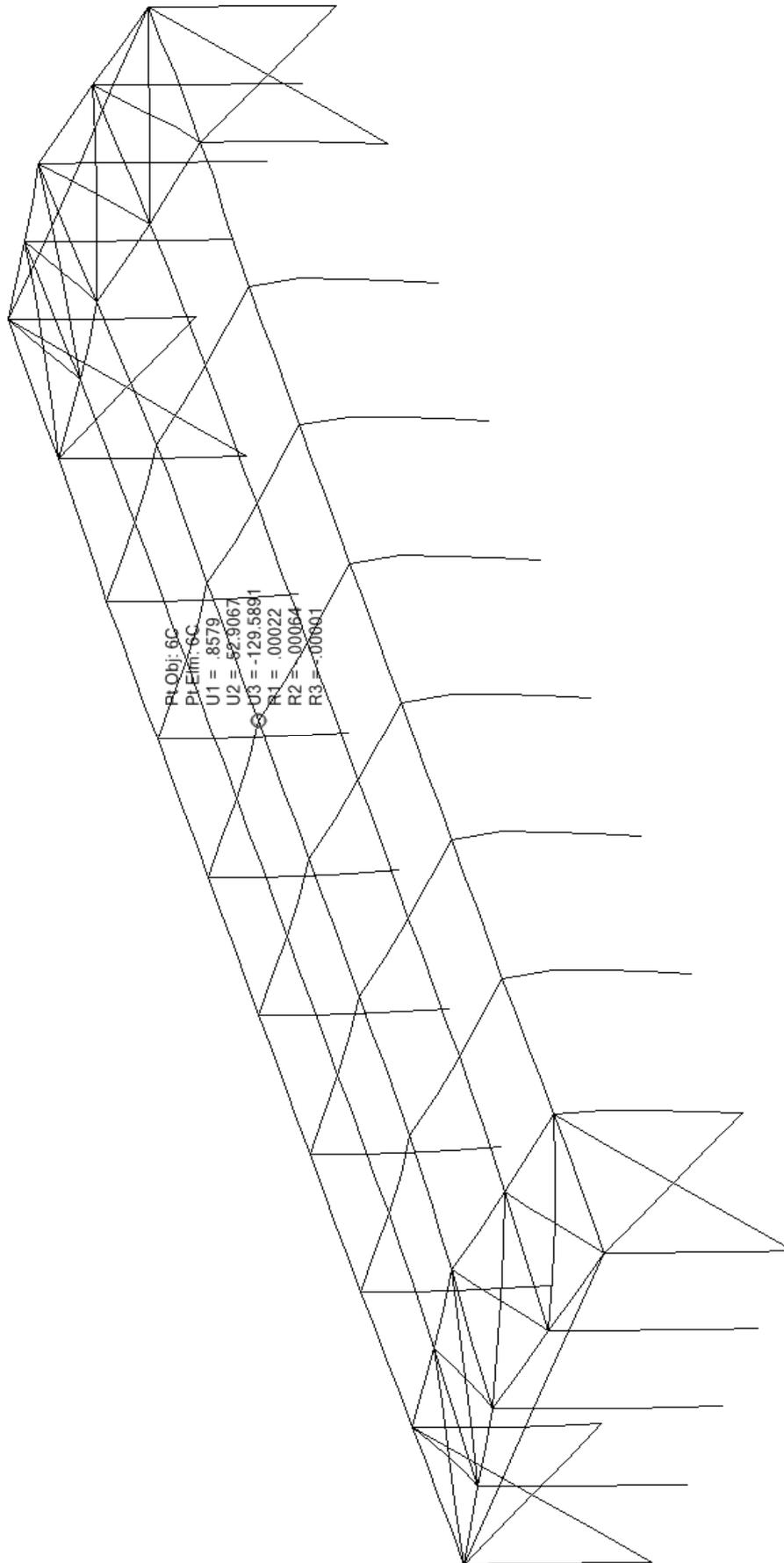
DEFORMAÇÃO DA ESTRUTURA COM TESOURA EM VIGA

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	123
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	



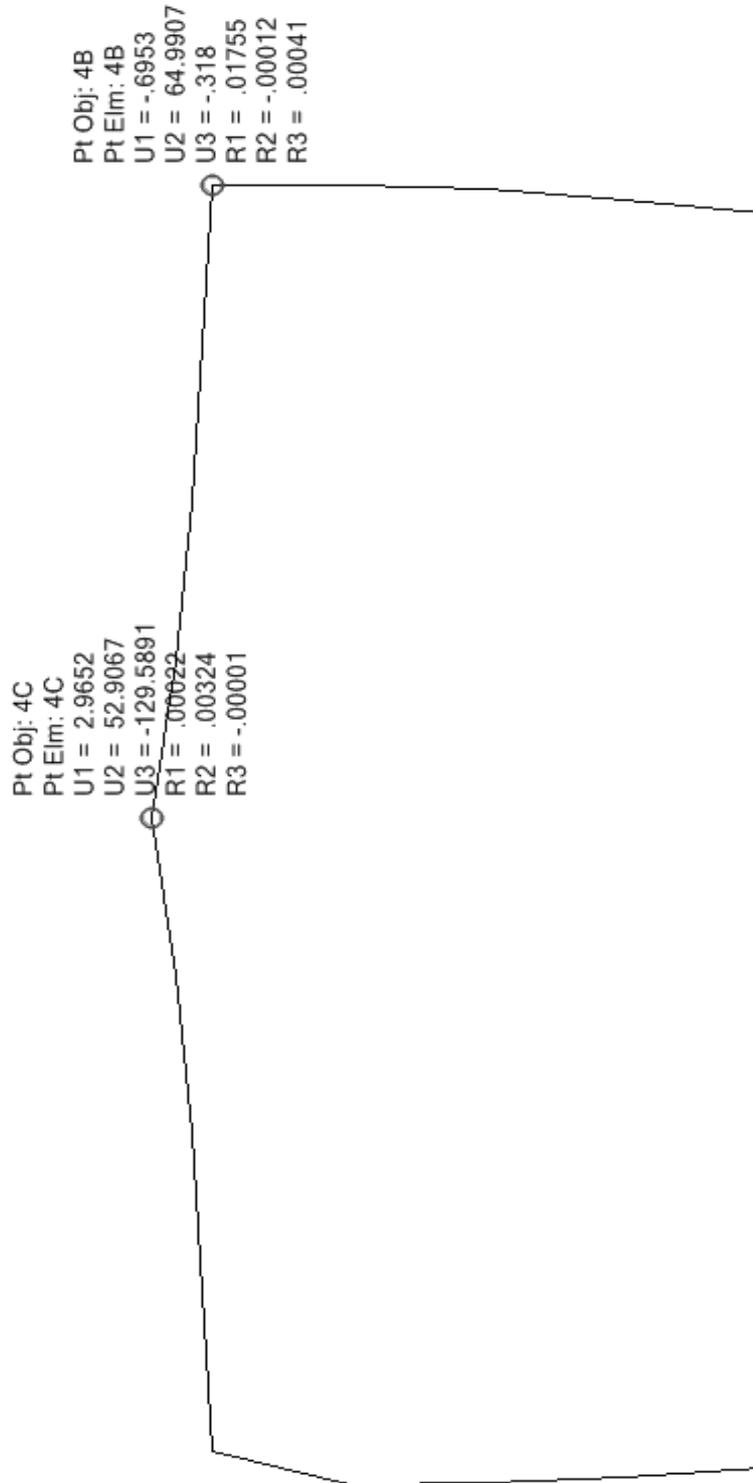
GALPÃO COM TESOURA EM VIGA - VISTA GERAL

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 124
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			



GALPÃO COM TESOURA EM VIGA - DEFORMAÇÃO MÁXIMA (ELS) EM mm

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 125
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	



GALPÃO COM TESOURA EM VIGA - EIXO 5 - DEFORMAÇÃO MÁXIMA (ELS) EM mm

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 126
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev 0		
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov FCR			

ANEXO D

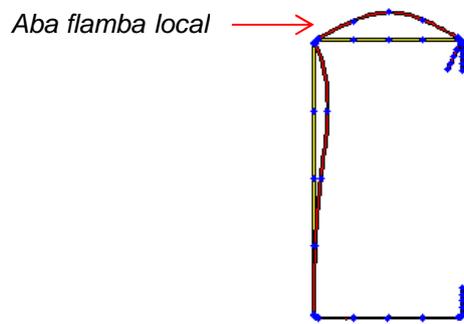
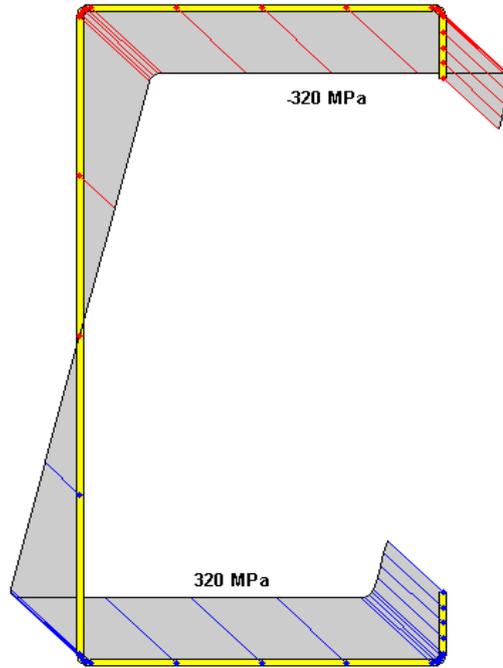
VERIFICAÇÃO DOS PERFIS VIA SOFTWARE CUFSM 4.05

EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 127
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

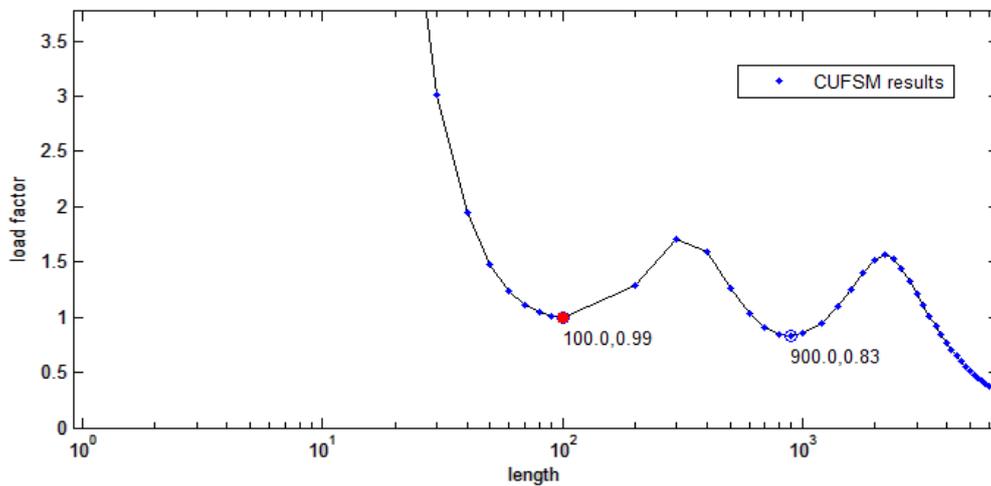
D. ANEXO D- VERIFICAÇÃO DOS PERFIS VIA SOFTWARE CUFSM 4.05

D.1. TERÇAS E VIGAS DE FECHAMENTO

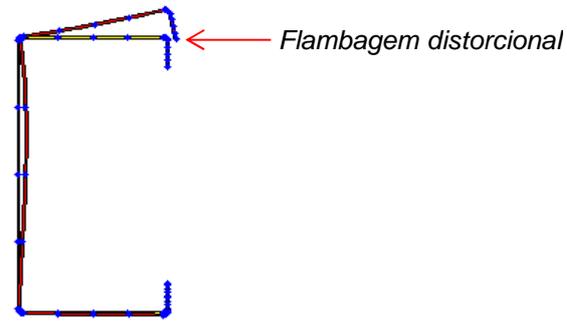
D.1.1. PERFIL Ue-200x100x2 - FLEXÃO EM TORNO DO EIXO DE MAIOR INÉRCIA



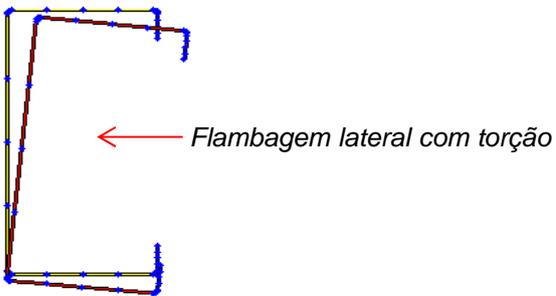
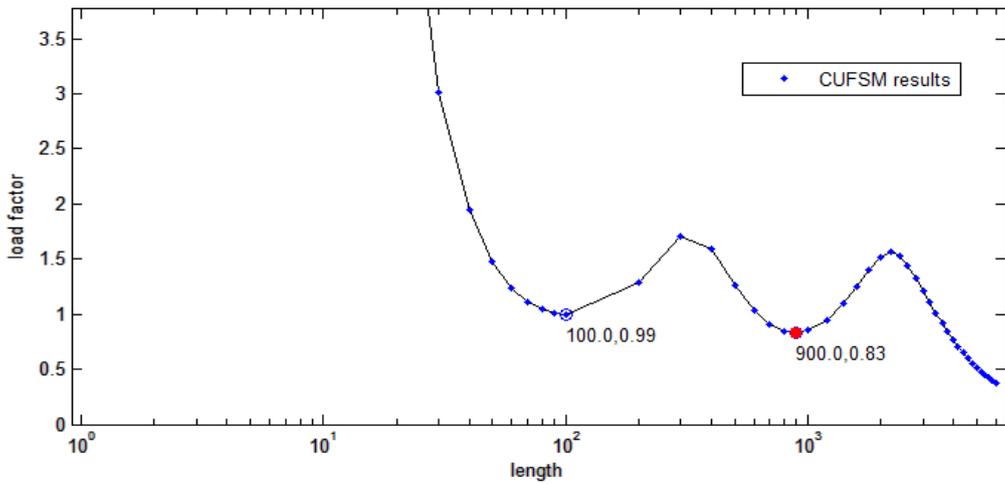
Buckled shape for CUFSM results
length = 100 load factor = 0.99477 mode = 1 → $\sigma = f_y$
cFSM classification results: off



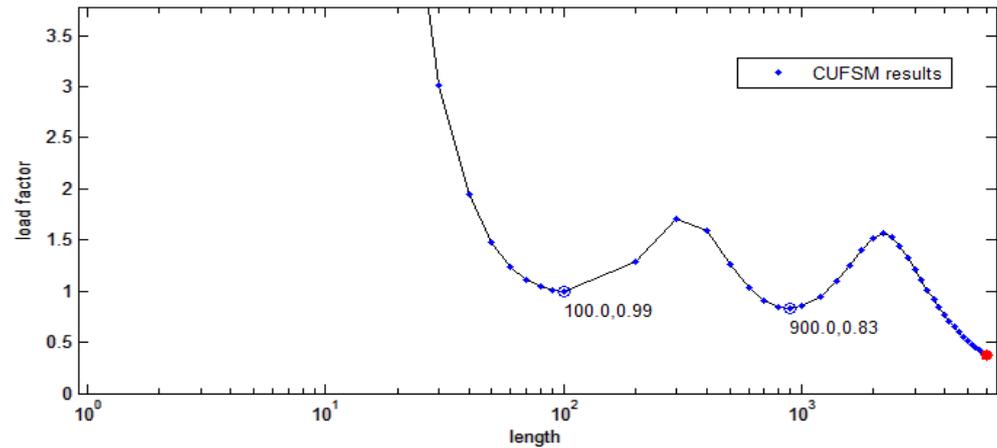
EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			128
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			



Buckled shape for CUFSM results
 length = 900 load factor = 0.83334 mode = 1
 cFSM classification results: off $\chi_{dist} = 0,83$

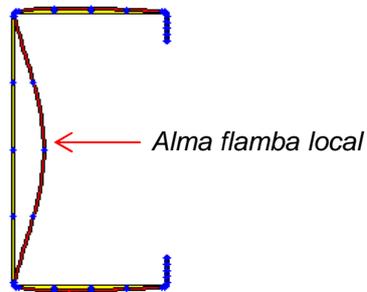
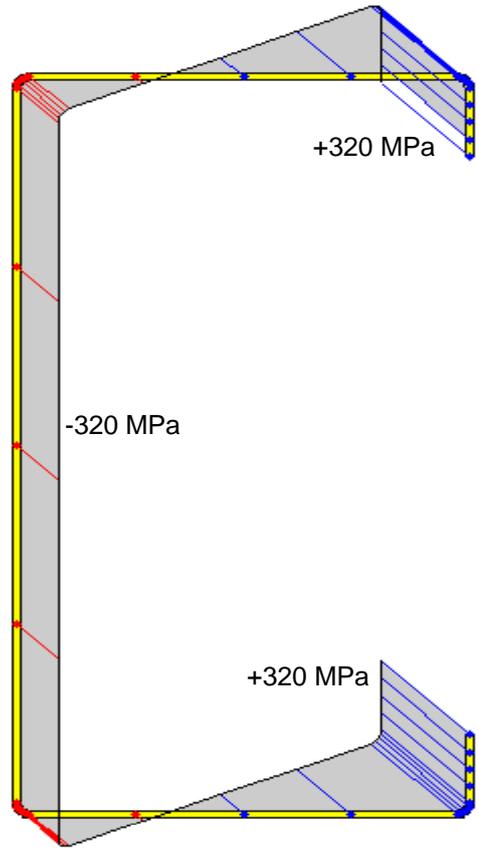


Buckled shape for CUFSM results
 length = 6000 load factor = 0.37008 mode = 1
 cFSM classification results: off $\chi_{FLT} = 0,37$
 para $L_{FLT} = 6,0m$

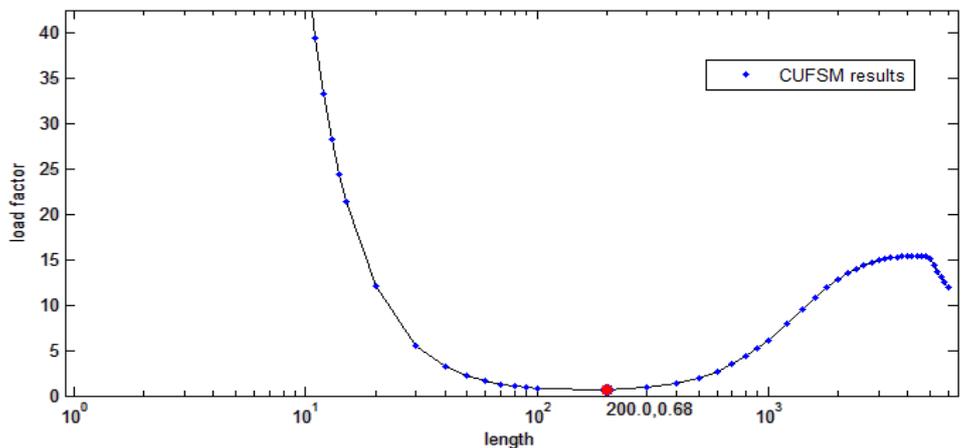


EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			129
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

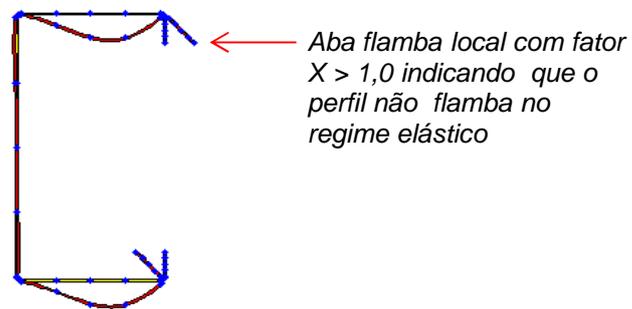
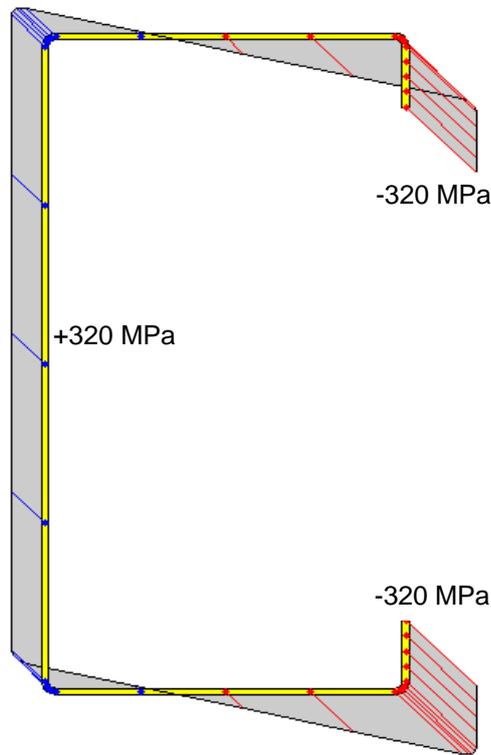
D.1.2.PERFIL Ue-200x100x2 - FLEXÃO EM TORNO DO EIXO DE MENOR INÉRCIA



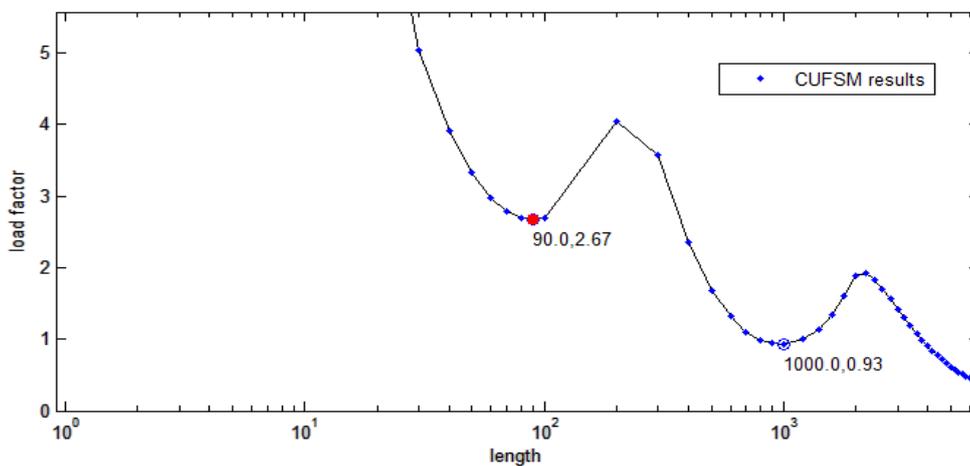
Buckled shape for CUFSM results
length = 200 load factor = 0.6783 mode = 1 $\chi_{FL} = 0,68$
cFSM classification results: off



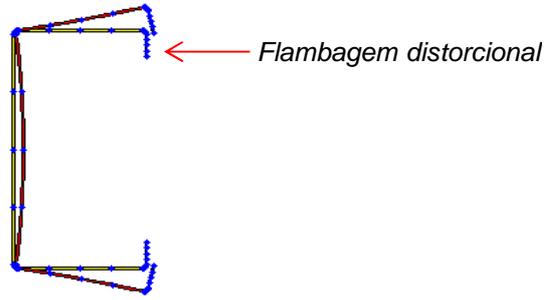
EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev	0	Aprov	FCR	130
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.			



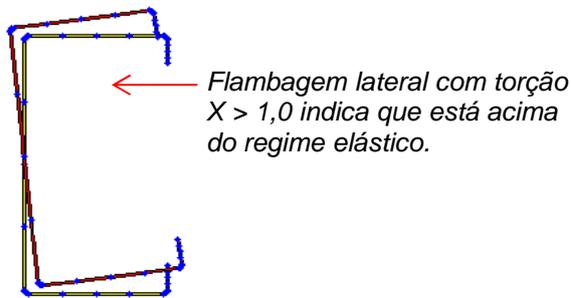
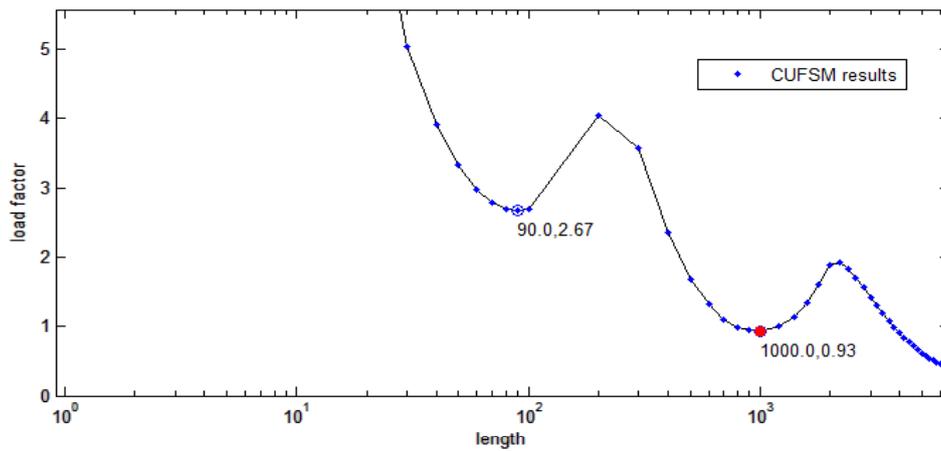
Buckled shape for CUFSM results
length = 90 load factor = 2.6743 mode = 1
cFSM classification results: off



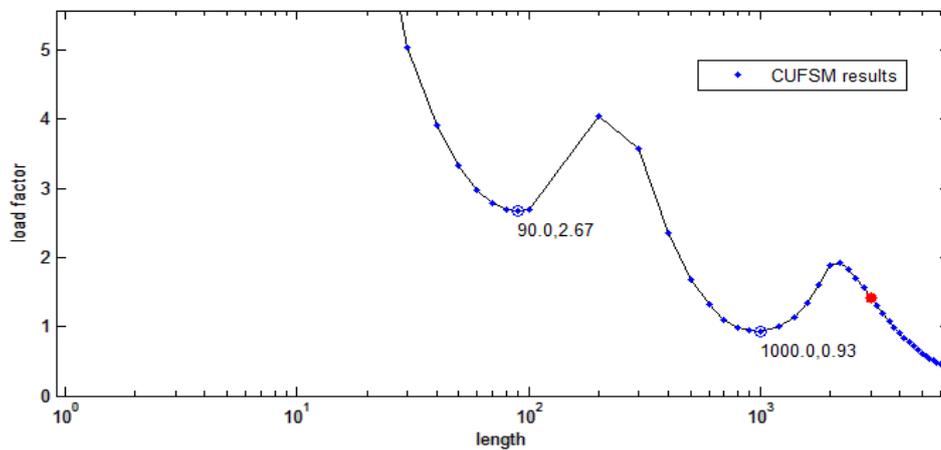
EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 131
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			



Buckled shape for CUFSM results
length = 1000 load factor = 0.93174 mode = 1
cFSM classification results: off $\chi_{dist} = 0,93$



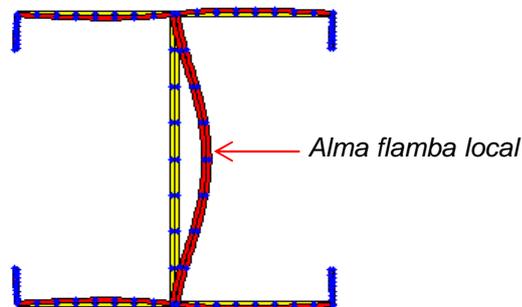
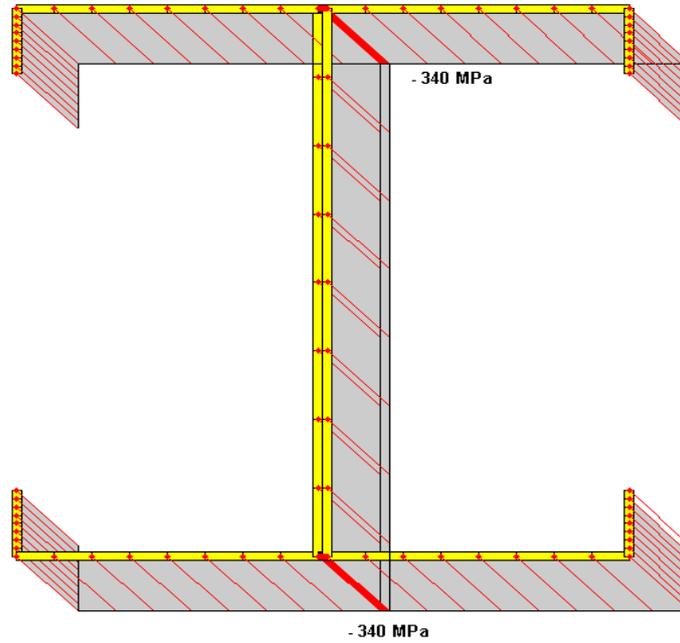
Buckled shape for CUFSM results
length = 3000 load factor = 1.4253 mode = 1
cFSM classification results: off



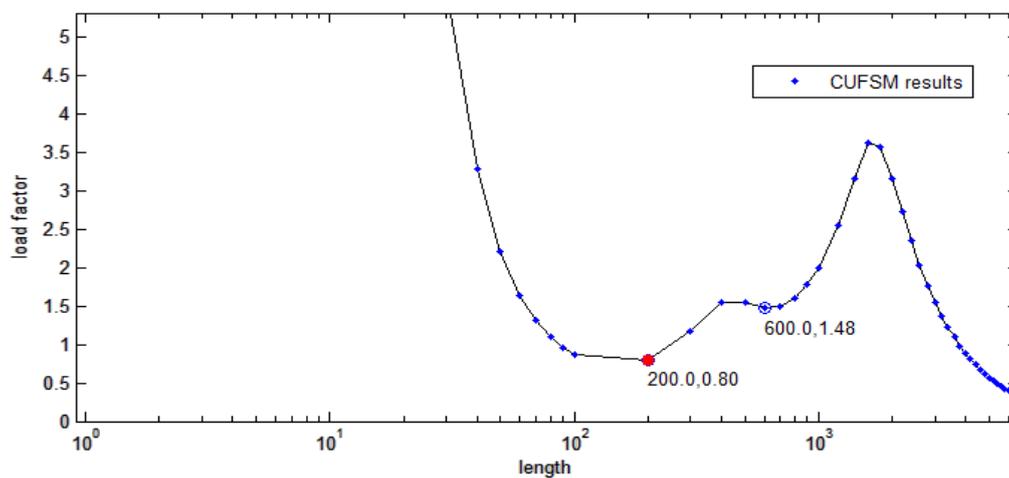
EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO					Folha	
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0		132	
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

D.2. COLUNAS

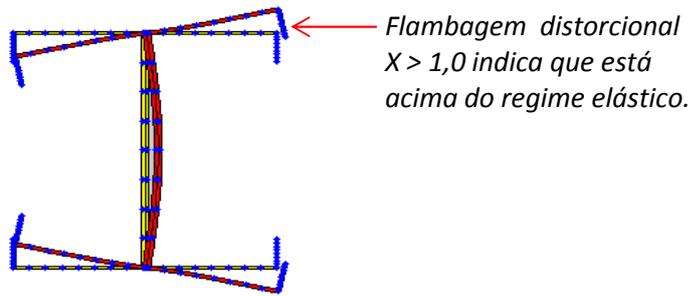
D.2.1. PERFIL Ie-200x100x3 - COMPRESSÃO



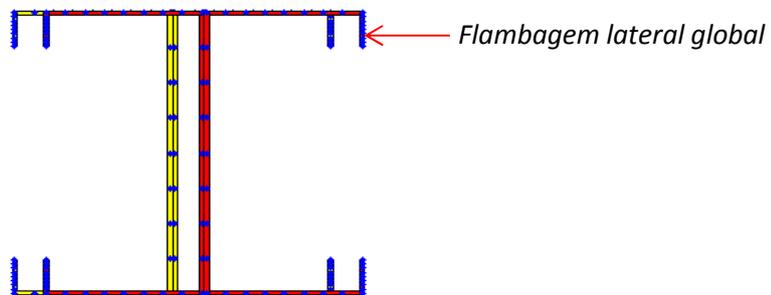
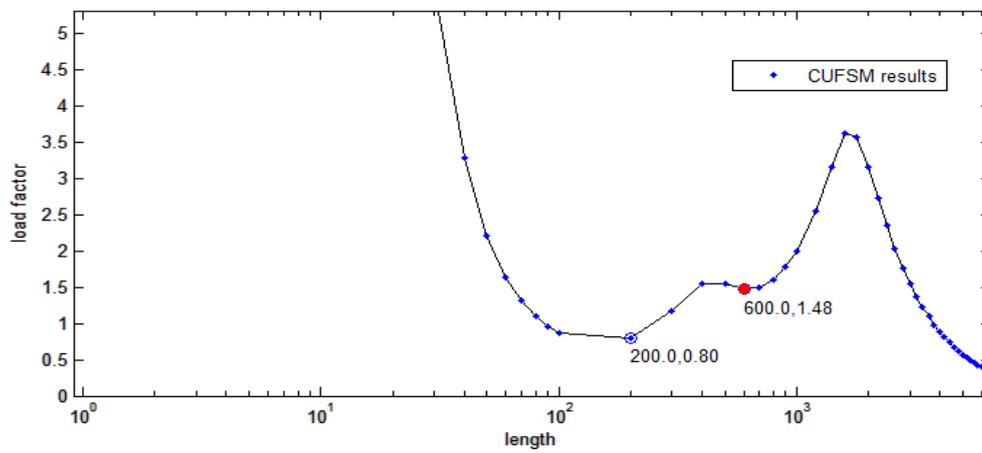
Buckled shape for CUFSM results
length = 200 load factor = 0.80167 mode = 1 $\chi_{FL} = 0,8$
cFSM classification results: off



EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			133
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

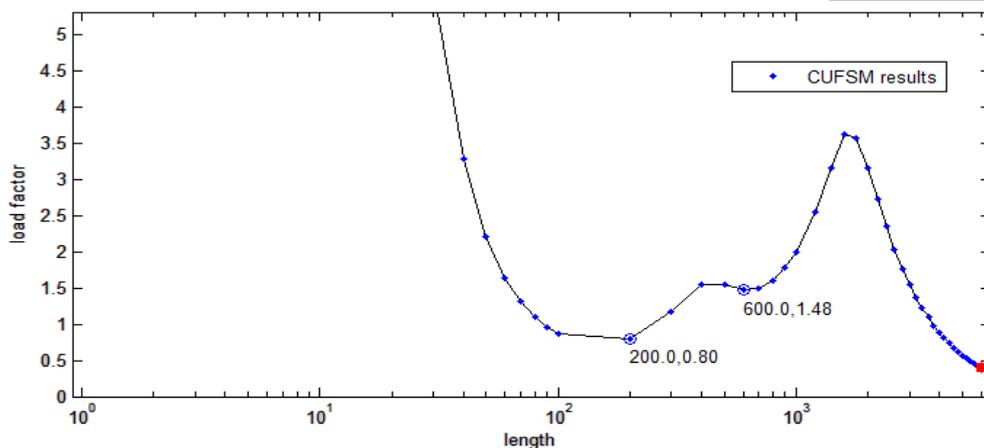


Buckled shape for CUFSM results
length = 600 load factor = 1.4756 mode = 1
cFSM classification results: off



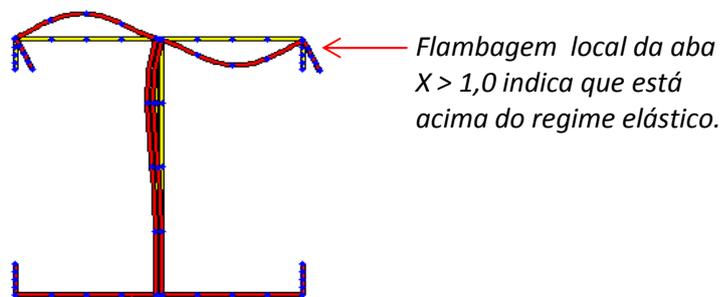
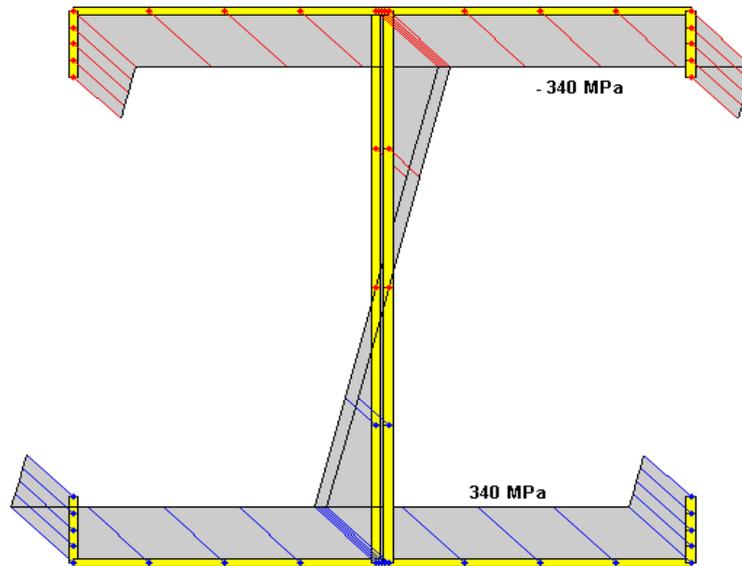
Buckled shape for CUFSM results
length = 6000 load factor = 0.39789 mode = 1
cFSM classification results: off

$\chi_{FY} = 0,4$
para $L_{FY} = 6,0m$

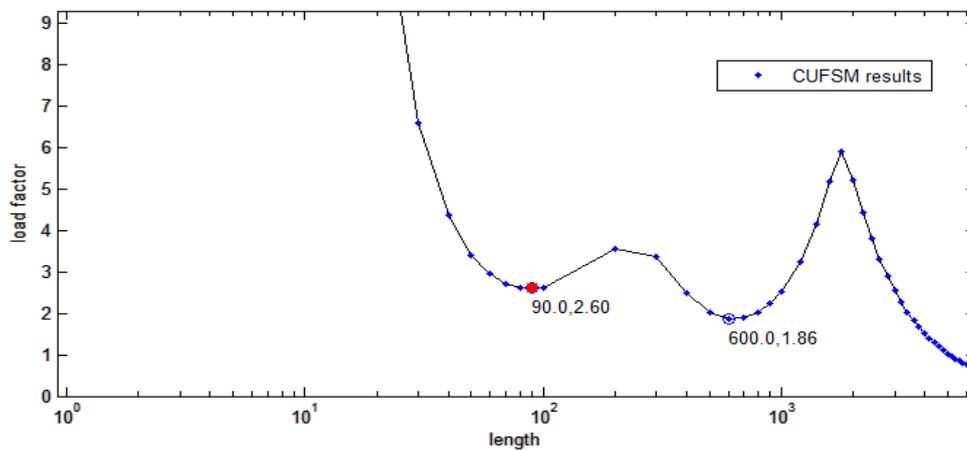


EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 134
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

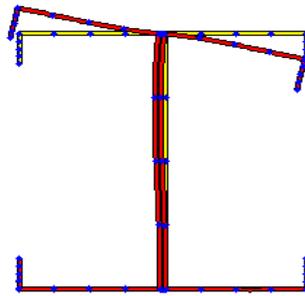
D.2.2.PERFIL ie-200x100x3 - FLEXÃO EM TORNO DO EIXO DE MAIOR INÉRCIA



Buckled shape for CUFSM results
length = 90 load factor = 2.5975 mode = 1
cFSM classification results: off

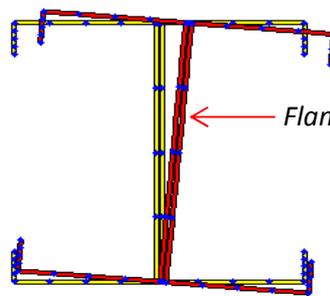
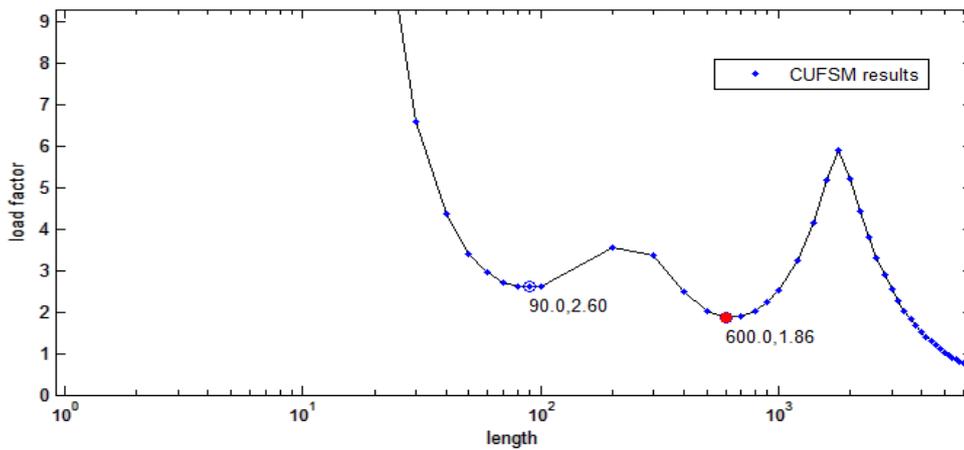


EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL				Rev	0	135
		Data	20/10/15	Elab.	AFFO	Verif.	FCR	



Flambagem distorcional
 $X > 1,0$ indica que está
 acima do regime elástico.

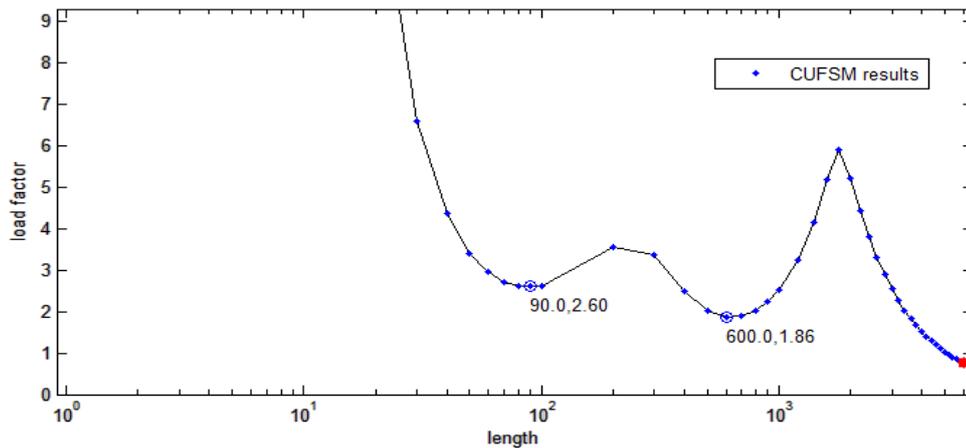
Buckled shape for CUFSM results
 length = 600 load factor = 1.8624 mode = 1
 cFSM classification results: off



Flambagem lateral com torção

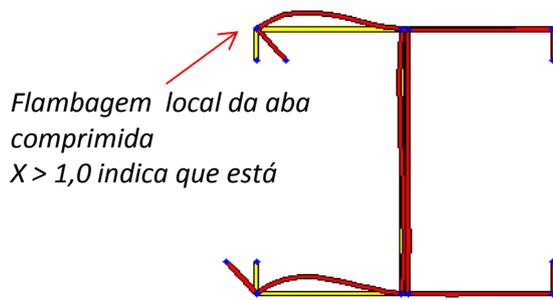
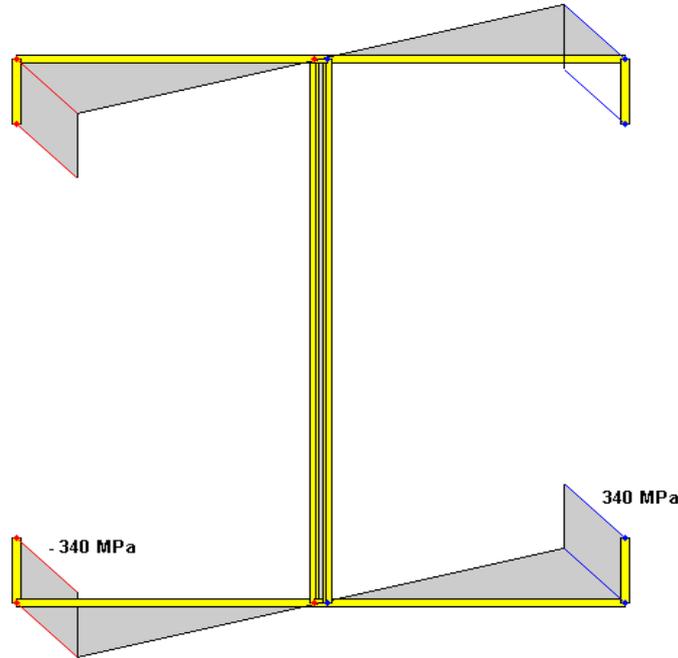
Buckled shape for CUFSM results
 length = 6000 load factor = 0.75983 mode = 1
 cFSM classification results: off

$\chi_{FLT} = 0,76$
 para $L_{FLT} = 6,0m$

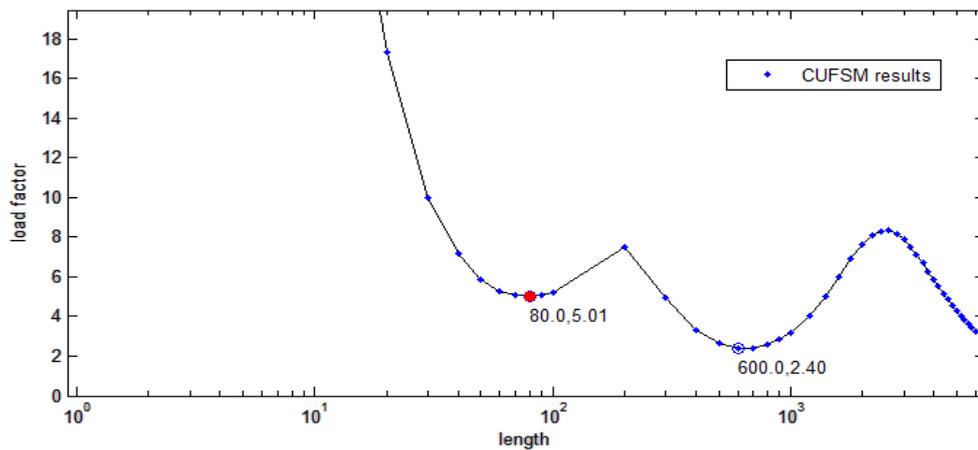


EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha 136
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			

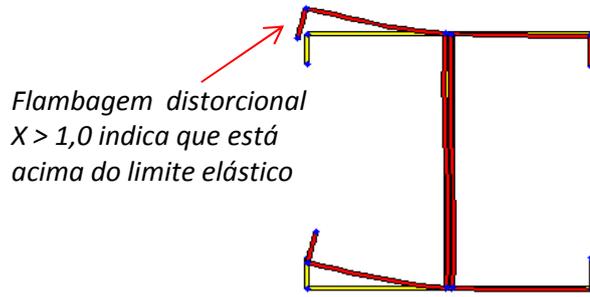
D.2.2.PERFIL ie-200x100x3 - FLEXÃO EM TORNO DO EIXO DE MENOR INÉRCIA



Buckled shape for CUFSM results
length = 80 load factor = 5.0127 mode = 1
cFSM classification results: off

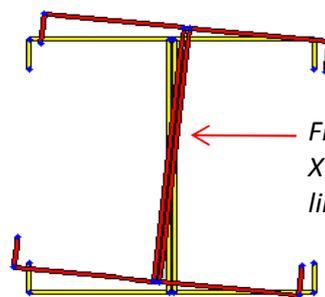
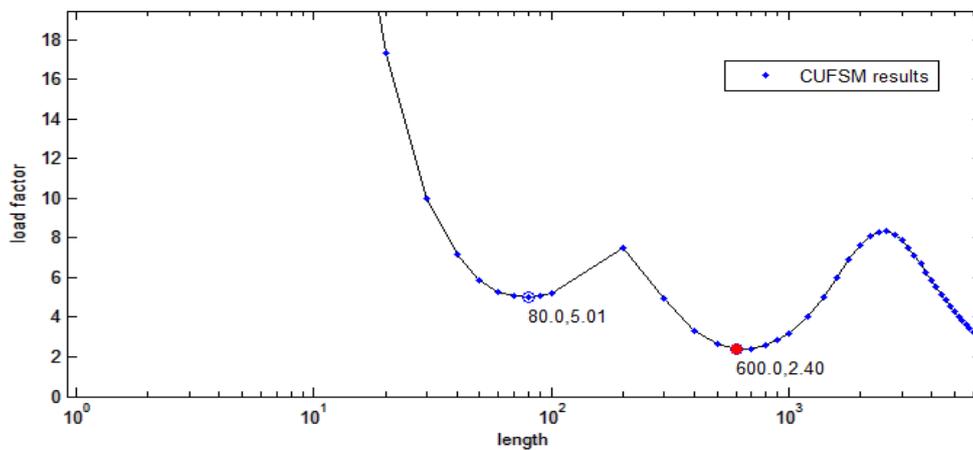


EE - UFMG DEES	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS	Projeto GALPÃO EM PERFIS FORMADOS A FRIO						Folha
		Documento CÁLCULO ESTRUTURAL			Rev 0			137
		Data 20/10/15	Elab. AFFO	Verif. FCR	Aprov. FCR			



*Flambagem distorcional
 $X > 1,0$ indica que está
acima do limite elástico*

Buckled shape for CUFSM results
length = 600 load factor = 2.4041 mode = 1
cFSM classification results: off



*Flambagem lateral com torção
 $X > 1,0$ indica que está acima do
limite elástico*

Buckled shape for CUFSM results
length = 6000 load factor = 3.2465 mode = 1
cFSM classification results: off

