

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

**PROJETO DE UM EDIFÍCIO COMERCIAL
EM ESTRUTURAS DE AÇO COM PERFIS
FORMADOS A FRIO**

LUIZA MARIA GONTIJO

Índice

1.	INTRODUÇÃO.....	4
2.	OBJETIVOS.....	4
3.	CARACTERÍSTICAS DO EDIFÍCIO.....	5
4.	SISTEMAS ESTRUTURAIS.....	6
4.1.	PLANO DE VIGAS E TERÇAS.....	6
4.2.	ELEVAÇÕES.....	8
4.3.	ISOMÉTRICA.....	10
5.	MATERIAIS.....	10
5.1.	ESTRUTURA.....	10
5.2.	COMPLEMENTARES.....	10
6.	NORMAS ADOTADAS.....	10
7.	AÇÕES.....	11
7.1.	DISTRIBUIÇÃO DOS CARREGAMENTOS.....	11
7.2.	CARGAS DEVIDO AO VENTO (CV) – NBR 6123.....	15
7.2.1.	<i>Vento CV0 – NBR 6123</i>	17
7.2.2.	<i>Vento CV90 – NBR 6123</i>	17
7.2.3.	<i>Força Nocional (FHE)</i>	19
8.	COMBINAÇÕES DE CARGAS.....	20
9.	CRITÉRIOS DE REDUÇÃO DAS CARGAS ACIDENTAIS (NBR 6120).....	20
10.	VIBRAÇÃO – ANEXO L (NBR 8800).....	21
11.	DESLOCAMENTOS MÁXIMOS (NBR 8800 ANEXO C).....	21
12.	CLASSIFICAÇÃO DA ESTRUTURA QUANTO À DESLOCABILIDADE.....	21
13.	DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS BIAPOIADAS.....	21
13.1.	MOMENTO COM BASE NO INÍCIO DO ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA.....	22
13.2.	MOMENTO CALCULADO COM BASE NA FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO (FLT).....	29
13.3.	MOMENTO CALCULADO PARA A FLAMBAGEM POR DISTORÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	37
13.4.	CONCLUSÃO:.....	39
14.	ESTUDO DA ESTRUTURA COMO PÓRTICOS.....	39
14.1.	ESFORÇOS SOLICITANTES DE CALCULO.....	41
15.	DIMENSIONAMENTO DOS PILARES DO PÓRTICO.....	41
15.1.	COMPRESSÃO.....	42
15.1.1.	<i>Determinação de N_c, R_d com base na flambagem da barra por flexão, torção ou flexo-torção</i>	42
15.1.2.	<i>Determinação de N_c, R_d com base na flambagem por distorção da seção transversal</i>	45
15.1.3.	<i>Conclusão</i>	46
15.2.	FLEXÃO.....	46
15.2.1.	<i>Momento Calculado com Base no Início do escoamento</i>	46
15.2.2.	<i>Momento Calculado com Base na Flambagem Lateral com Torção (FLT)</i>	52
15.2.3.	<i>Verificação da Flambagem por Distorção</i>	60
15.2.4.	<i>Conclusão</i>	60
15.3.	BARRA SUBMETIDA À FLEXÃO COMPOSTA.....	60
16.	DIMENSIONAMENTO DA VIGA DO PÓRTICO.....	61
16.1.	MOMENTO COM BASE NO INÍCIO DO ESCOAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA.....	61
16.2.	MOMENTO CALCULADO COM BASE NA FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO (FLT).....	67

16.3.	MOMENTO CALCULADO PARA A FLAMBAGEM POR DISTORÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL..	75
16.4.	CONCLUSÃO.....	75
17.	CONCLUSÃO FINAL	76

1. Introdução

Atualmente, a utilização de perfis formados a frio vem assumindo um papel muito importante no mercado de trabalho. As empresas utilizam cada vez mais este tipo de material devido a sua fácil adaptação geométrica e custo baixo.

Os perfis formados a frio são eficientemente utilizados em galpões, coberturas, mezaninos e edifícios de pequeno porte e podem ser projetados para cada aplicação específica com dimensões adequadas às necessidades de projetos de elementos estruturais leves, tais como terças, montantes de treliças, travamento, dentre outros.

A maleabilidade das chapas finas de aço permite a fabricação de grande variedade de seções transversais, desde a mais simples cantoneira, eficiente para trabalhar à tração, até os perfis formados a frio duplos (seção-caixão), que devido à boa rigidez à torção (eliminando travamentos), menor área exposta (reduzindo a área de pintura) e menor área de estagnação de líquidos ou detritos (reduzindo a probabilidade de corrosão) oferecem soluções econômicas.

2. Objetivos

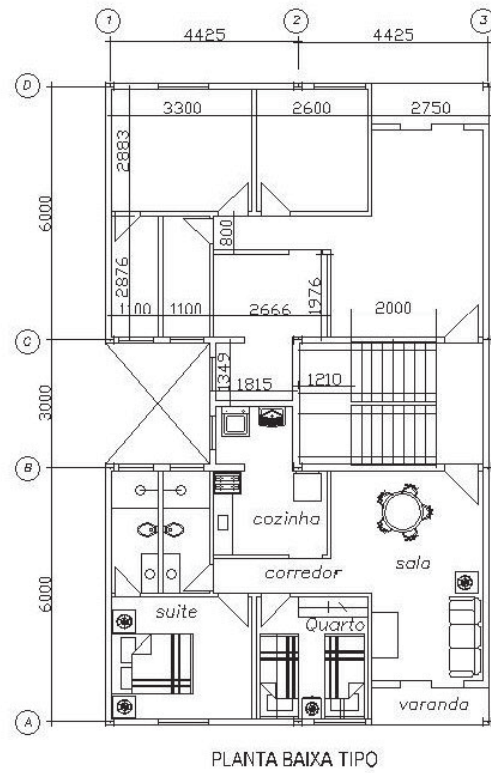
Este trabalho tem como objetivo verificar se os perfis formados a frio escolhidos possuem seção suficiente para resistirem aos esforços que serão submetidos.

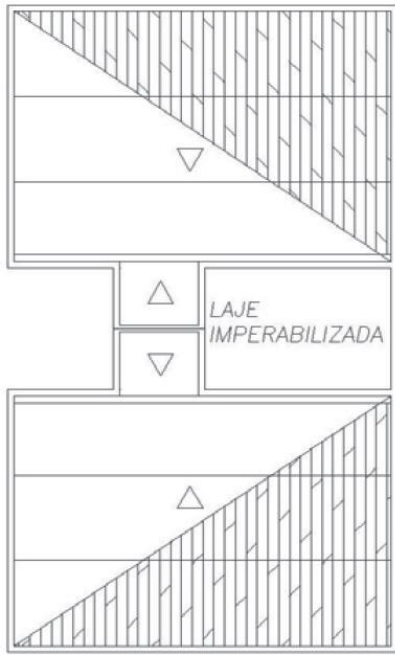
Serão calculados os esforços provenientes do carregamento imposto a um prédio residencial de pequeno porte com arquitetura convencional.

Esta verificação tem como objetivo principal demonstrar como é feito o cálculo manual do dimensionamento de estruturas como pilares e vigas em perfil formado a frio. O cálculo manual será auxiliado pelos resultados complementares do programa gratuito CUFSM 3.12. Para efeito demonstrativo, visto que o cálculo se repete a cada novo perfil e/ou esforço submetido, serão calculadas apenas uma viga biapoiada, uma viga com carregamento de pórtico e um pilar.

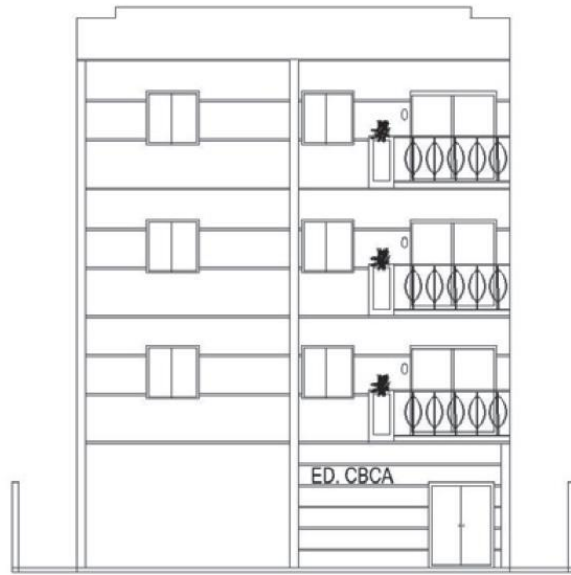
O roteiro seguido neste trabalho se encontra nas notas de aula da presente matéria e as seções a serem utilizadas neste dimensionamento foram sugeridas pelo professor.

3. Características do Edifício





PLANTA DE COBERTURA



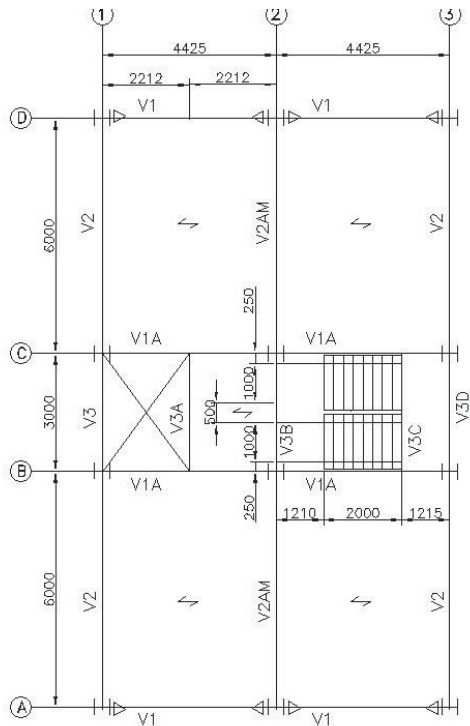
FACHADA

Dados Gerais	
Comprimento	15 m
Largura	9 m
Altura	12 m
Pé-direito	3 m
Número de pavimentos	4
Terreno	12x30
Área total Estruturada	526,5 m ²

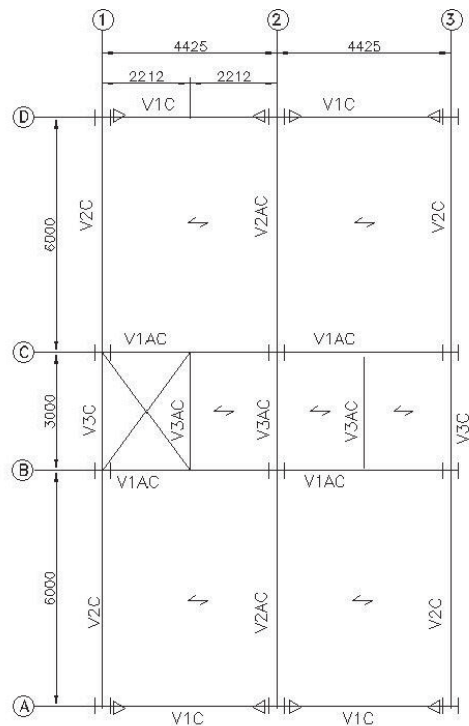
4. Sistemas Estruturais

- Transversal: quadros rígidos nas filas A, B, C e D.
- Longitudinal: contraventamento verticais entre as filas B e C nos eixos 1 e 3.

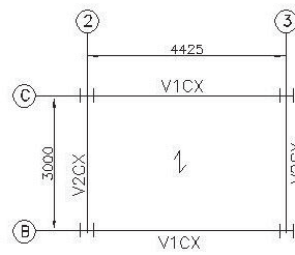
4.1. Plano de Vigas e Terças



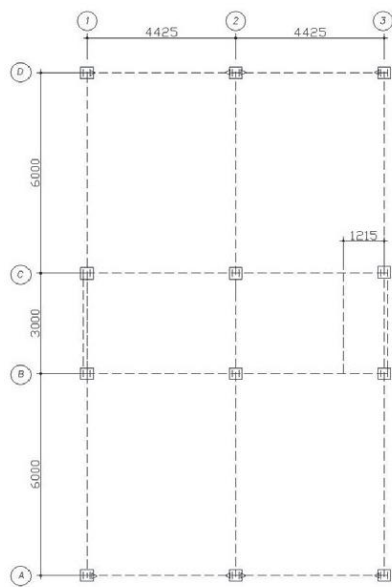
PLANO DAS VIGAS
EL.+3000 @ +9000



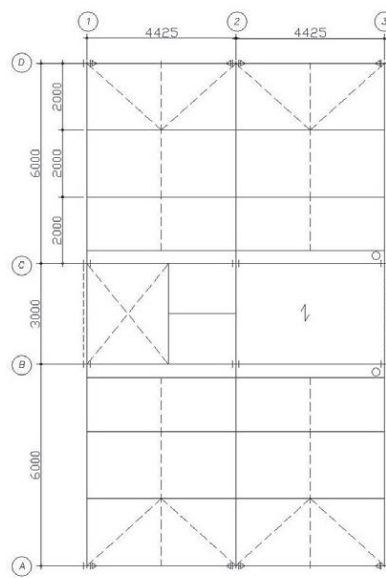
PLANO DAS VIGAS
EL.+12000



PLANO DA CX. D'ÁGUA
EL. +13.500

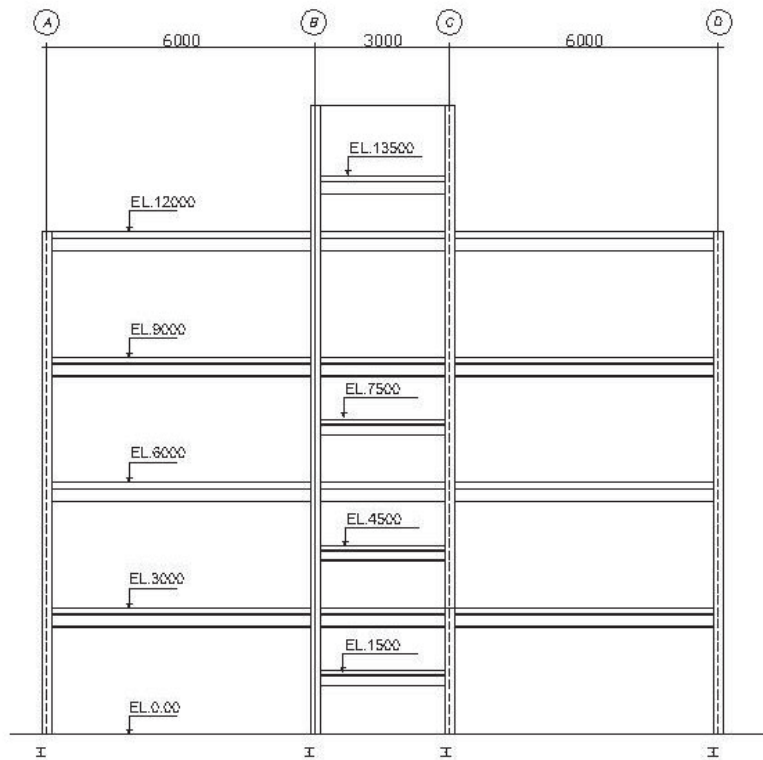


PLANO DAS BASES

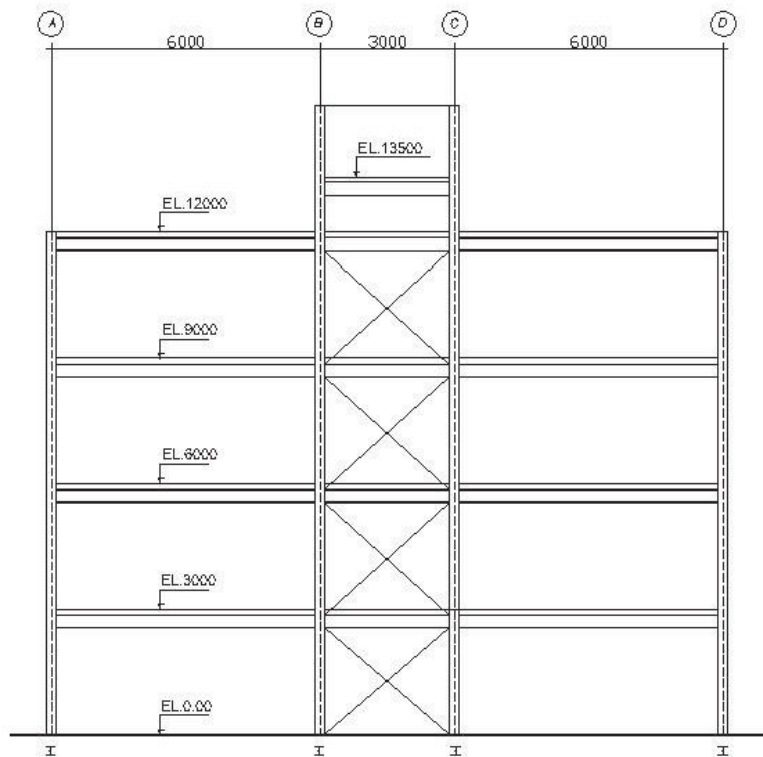


PLANO DAS TERÇAS

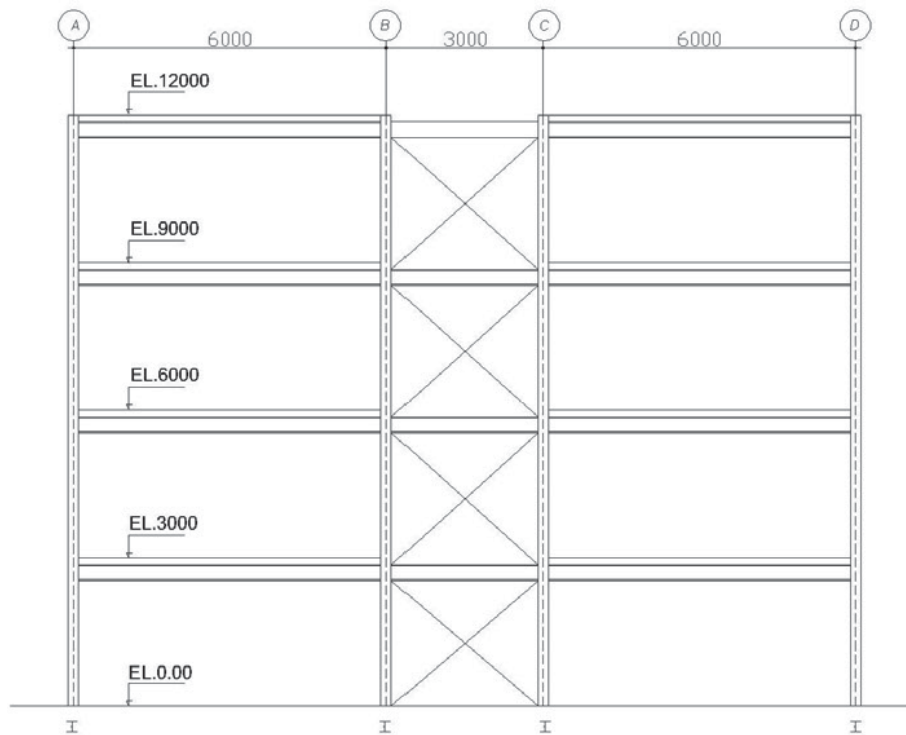
4.2. Elevações



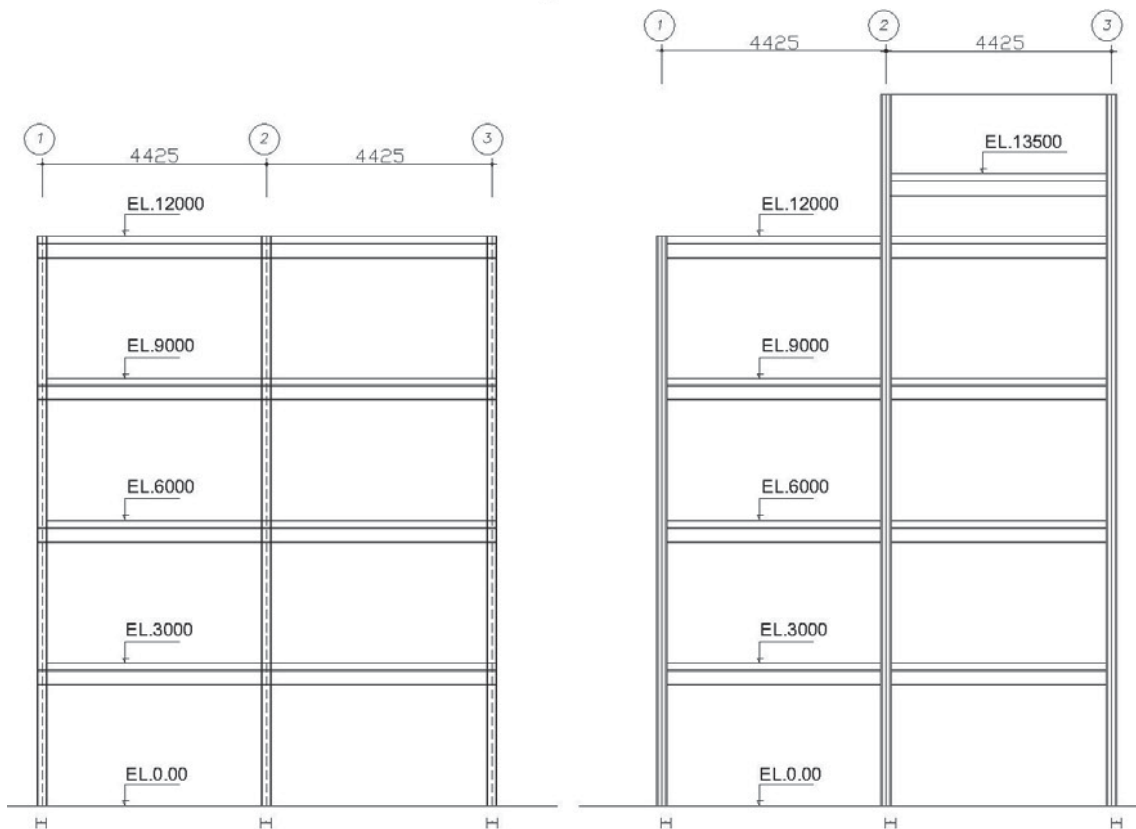
ELEVAÇÃO EIXO 2



ELEVAÇÃO EIXO 3



ELEVAÇÃO EIXO 1



ELEVAÇÃO FILAS A e D

ELEVAÇÃO FILAS B e C

4.3. Isométrica



5. Materiais

5.1. Estrutura

Materiais	Fy (kN/cm ²)	Fu (kN/cm ²)
Vigas	23	45
Pilares	23	40
Placa de base	25	40
Chapa de ligação	25	40
Chumbadores	-	48,5
Solda-eletrodo E70XX	-	41,5
Conector ASTM A325 D=19mm	57	82,5
Concreto Laje Fck > 20MPa	-	-

5.2. Complementares

Materiais	kN/cm ²
Concreto armado	25
Aço	78,5
Tipo de concreto celular	5,0
Argamassa cimento + cal + areia	21
Gesso	12,5

6. Normas Adotadas

Normas Brasileiras

- NBR 6120:1980 – Cargas para cálculo de estruturas e edificações
- NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações
- NBR14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

7. Ações

7.1. Distribuição dos carregamentos

Nota: **P** = parede; **LCP** = reação da laje na vida devido a CP; **LCA** = reação da laje na viga devido CA; **R** = reação final CP+CA

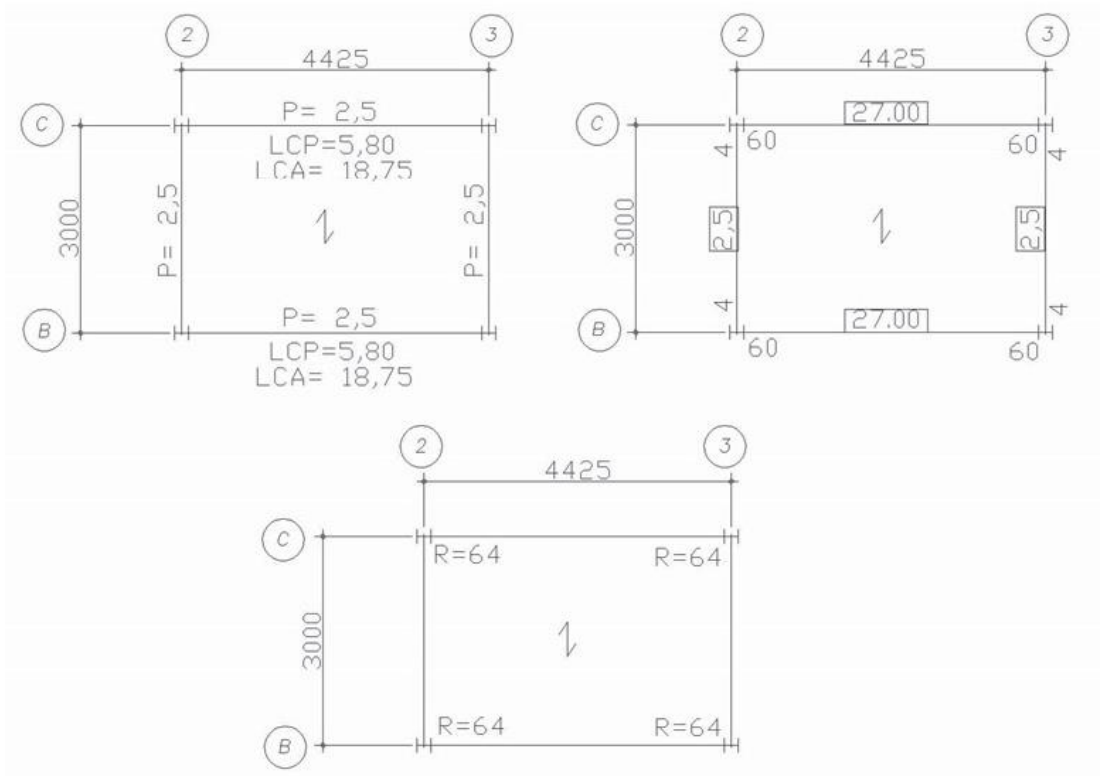
a) EL. 13500

Ações Permanentes Diretas (CP)

- Laje maciça de $t_c=12$ cm – Caixa d'água → $3,00$ kN/m²
- Paredes externas(12cm+3cm revest) → $1,25$ kN/m² (concreto celular)
- Parede tipo e CXD (H=2,00m) → $2,50$ kN/m
- Impermeabilização laje CXD → $0,50$ kN/m²

Ações Variáveis (CA)

- Cobertura (forro sem acesso) → $0,50$ kN/m²
- Caixa d'água → $12,00$ kN/m²



b) EL. 12000

Ações Permanentes Diretas (CP)

- Laje maciça de $t_c=10$ cm $\rightarrow 2,50$ kN/m²
- Forro de gesso $\rightarrow 0,15$ kN/m²
- Paredes externas(12cm+3cm revest) $\rightarrow 1,25$ kN/m² (concreto celular)
- Parede cobertura (H=1,35m) $\rightarrow 1,70$ kN/m
- Telhado + terça + tirante $\rightarrow 0,15$ kN/m²

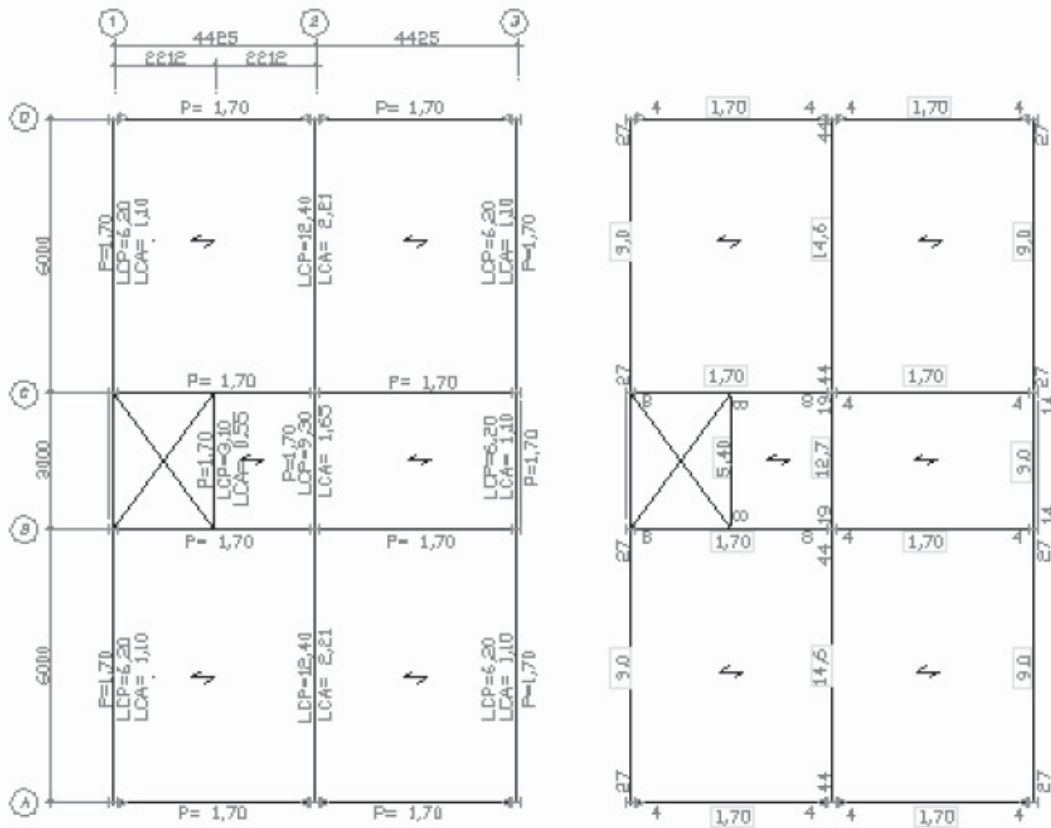
Ações Variáveis (CA)

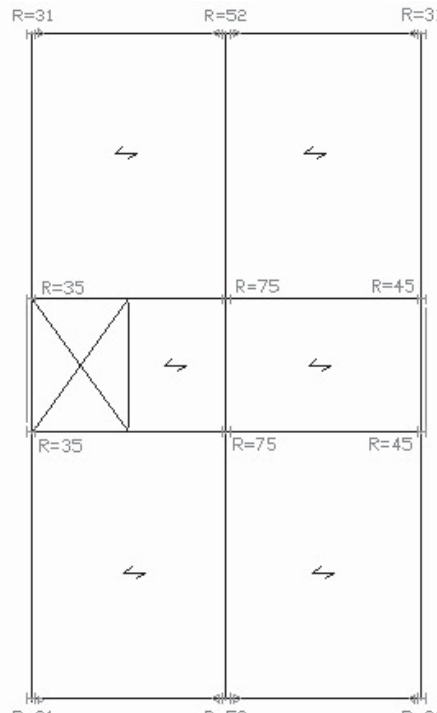
- Cobertura (forro sem acesso) $\rightarrow 0,50$ kN/m²

Eixo 1 e 3 – LCP = $(2,5+0,15+0,15) \times 2,212 = 6,20$ kN/m

LCA = $0,5 \times 2,212 = 1,106 = 1,1$ kN/m

Eixo 2 - LCP = $2 \times 6,20 = 12,40$ kN/m e LCA = $2 \times 1,106 = 2,21$ kN/m





c) EL. 3000 a 9000

Ações Permanentes Diretas (CP)

- Laje maciça de $t_c=10$ cm $\rightarrow 2,50$ kN/m²
- Paredes internas em "Dry Wall" $\rightarrow 0,30$ kN/m²
- Revestimento piso $\rightarrow 0,50$ kN/m²
- Forro gesso $\rightarrow 0,15$ kN/m²
- Paredes externas (12cm+3cm revest) $\rightarrow 1,25$ kN/m² (concreto celular)
- Parede andar tipo (H=2,70) $\rightarrow 3,40$ kN/m
- Degrau + corrimão + estrutura escada + laje patamar $\rightarrow 2,50$ kN/m²
- Corredor e hall $\rightarrow 3,00$ kN/m²

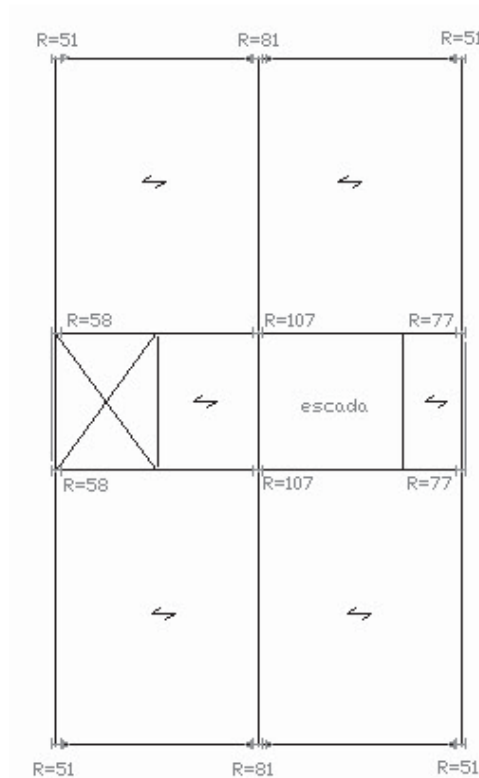
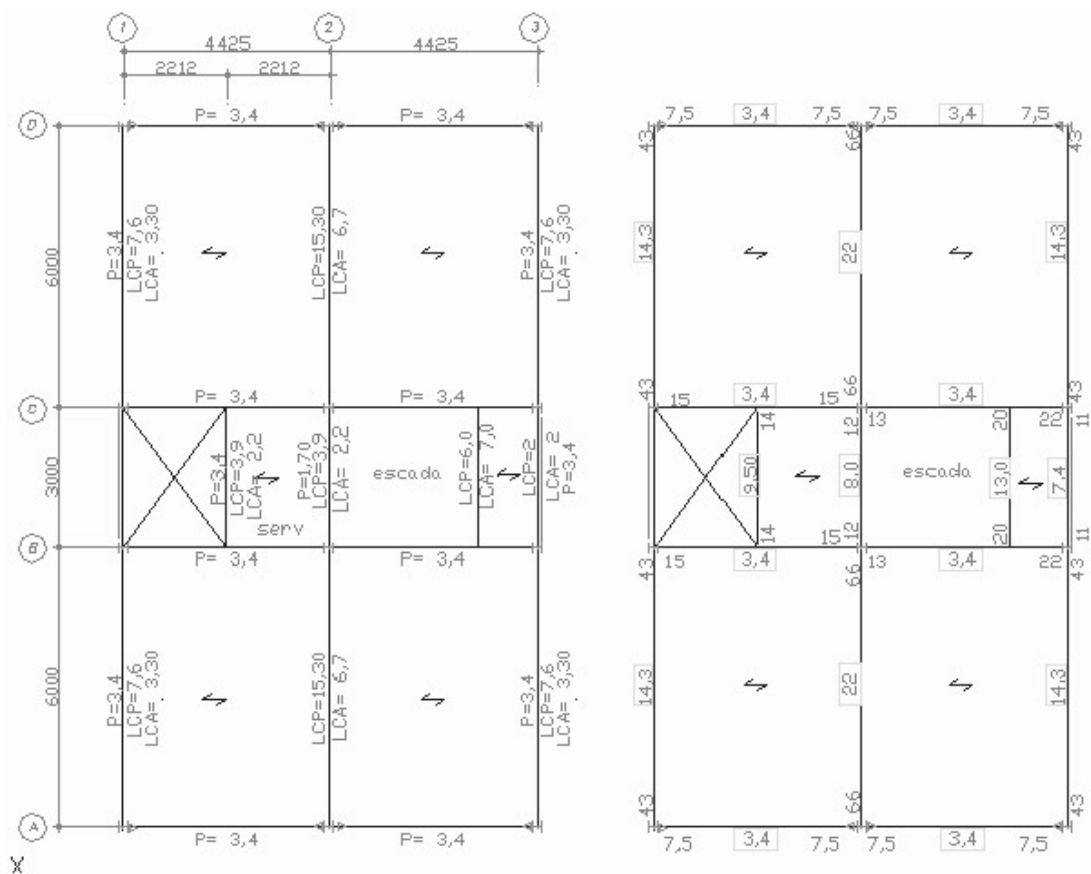
Ações Variáveis (CA)

- Piso tipo (apartamentos) $\rightarrow 1,50$ kN/m²
- Área de serviço $\rightarrow 2,00$ kN/m²
- Escadas / hall / corredor $\rightarrow 3,00$ kN/m²

Eixo 1 e 3 – LCP = $(2,5+0,30+0,50) \times 2,212 = 7,63$ kN/m

LCA = $1,50 \times 2,212 = 3,32 = 3,3$ kN/m

Eixo 2 - LCP = $2 \times 7,63 = 15,30$ kN/m; LCA = $2 \times 3,32 = 6,64 = 6,70$ kN/m



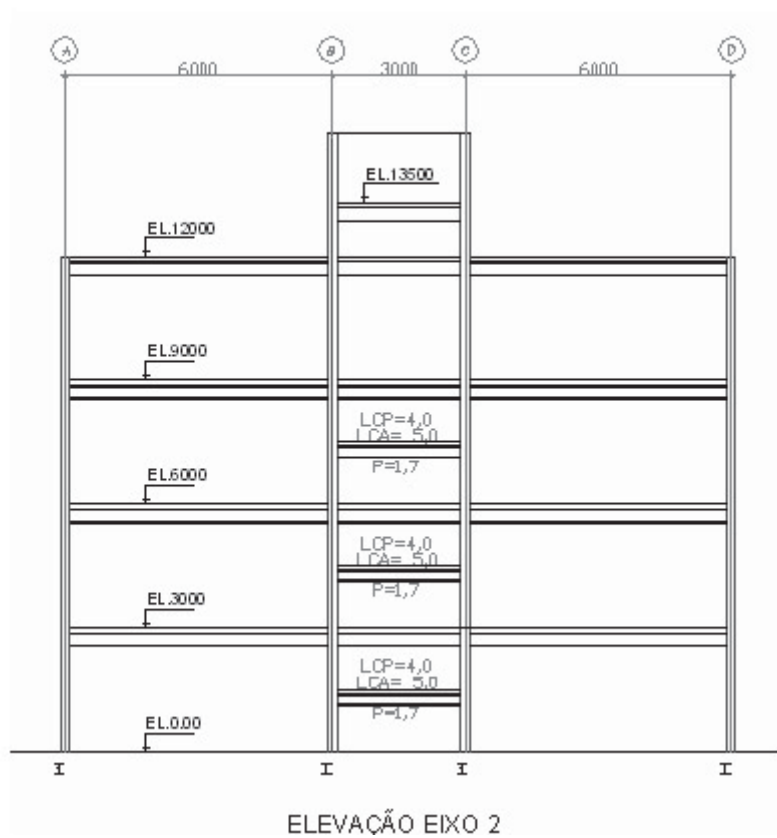
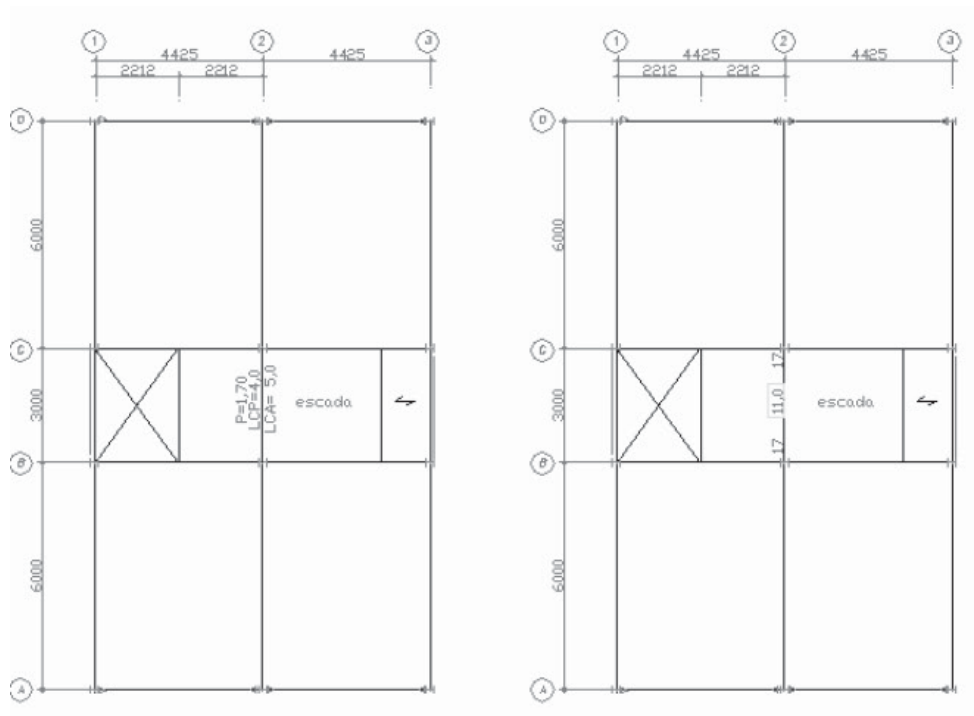
d) EL. 1500, 4500 e 7500

Ações Permanentes Diretas (CP)

- Degrau + corrimão + estrutura escada + laje patamar → 2,50 kN/m²

Ações Variáveis (CA)

- Escadas → 3,00 kN/m²



7.2. Cargas devido ao vento (CV) – NBR 6123

Velocidade básica do vento (local – Nordeste) $V_0 = 30\text{m/s}$

$S_1 = 1,0$ (terreno plano) – Fator de rugosidade

$S_2 = \text{NBR 6123 Tabela 2 CAT IV – Classe A}$

$$S_2 = b \times F_r \times (Z/10)^P$$

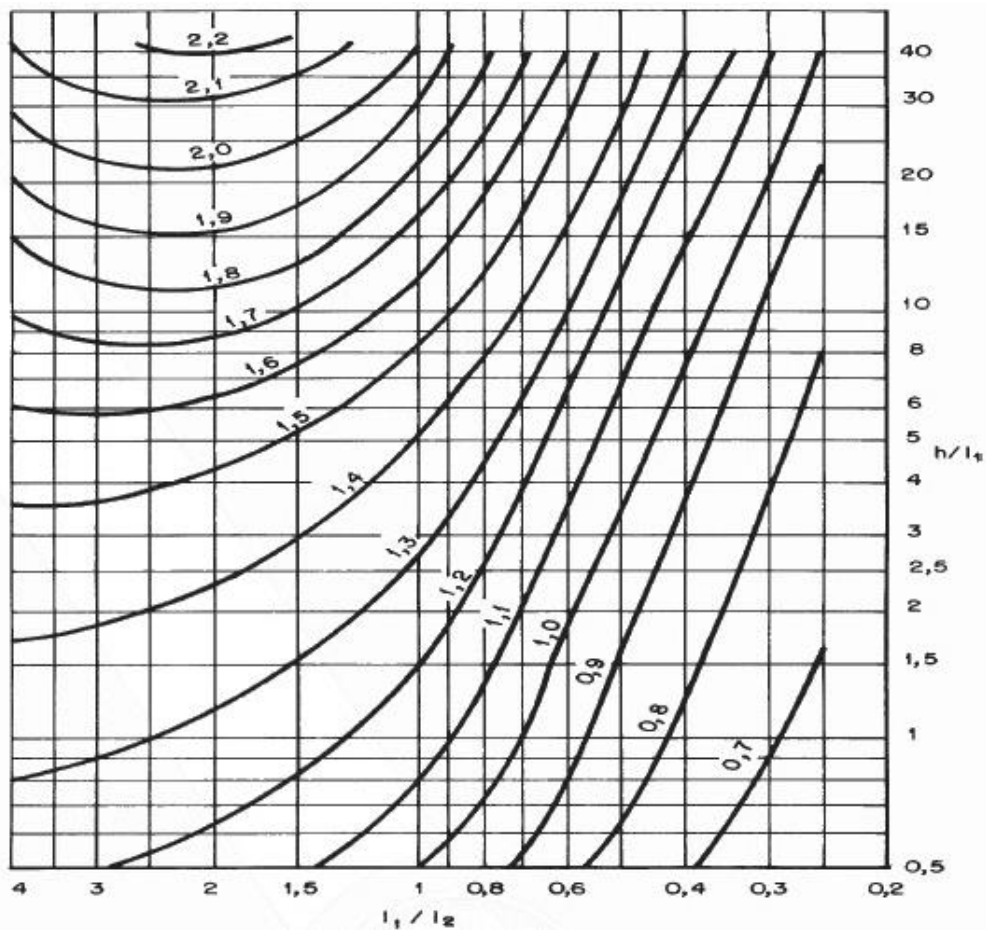
Elevação(Z) (m)	b	F_r	P	S_2
3	0,85	0,98	0,125	0,72
6	0,85	0,98	0,125	0,78
9	0,85	0,98	0,125	0,82
12	0,85	0,98	0,125	0,85

$S_3 = 1,0$ – Fator estático

$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$ (velocidade característica)

$q_k = 0,613 \times V_k^2$ (pressão dinâmica) N/m^2

h(m)	V_0	S_1	S_2	S_3	$V_k(\text{m/s})$	$q_k(\text{N/m}^2)$	$q_k(\text{kN/m}^2)$
3	30	1	0,72	1	21,6	286,00	0,29
6	30	1	0,78	1	23,4	335,65	0,34
9	30	1	0,82	1	24,6	370,96	0,37
12	30	1	0,85	1	25,5	398,60	0,40





7.2.1. Vento CV0 – NBR 6123

$a=15\text{m}$; $b=9\text{m}$; $H=12\text{m}$

$L_1 / L_2 = 9,0/15,0 = 0,60$; $H/ L_1 = 12,0/9,0 = 1,33$

Olhando no gráfico teremos $C_a = 0,95$

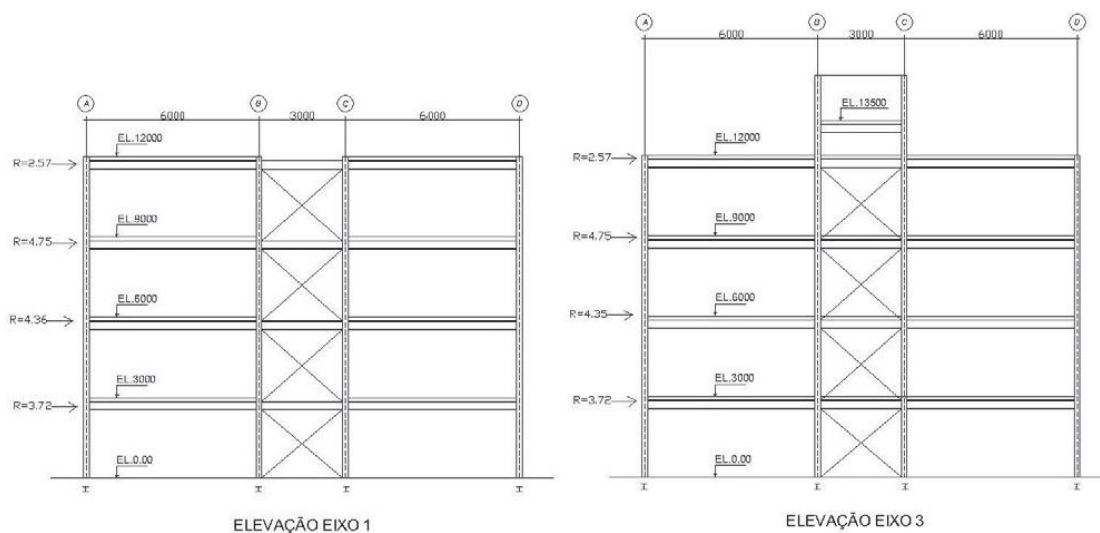
Força de arrasto (vento)

$$F_a = C_a \times q_k \times A_e$$

C_a – Coeficiente de arrasto; q_k – pressão dinâmica do vento ; A_e – Área de influência do vento

Resumo do vento CV0 (cargas aplicadas nos nós)

h	$q_k(\text{kN/m}^2)$	C_a	$A_e(\text{m}^2)$	$F_a(\text{kN})$	$1/2F_a(\text{kN})$
3	0,29	0,95	27	7,44	3,72
6	0,34	0,95	27	8,72	4,36
9	0,37	0,95	27	9,49	4,75
12	0,4	0,95	13,5	5,13	2,57
13,5	0,4	0,95	6,6	2,51	1,25



7.2.2. Vento CV90 – NBR 6123

$a=15\text{m}$; $b=9\text{m}$; $H=12\text{m}$

$L_1 / L_2 = 15,0/9,0 = 1,67$; $H/ L_1 = 12,0/15,0 = 0,80$

Olhando no gráfico teremos $C_a = 1,20$

Força de arrasto (vento)

$$F_a = C_a \times q_k \times A_e$$

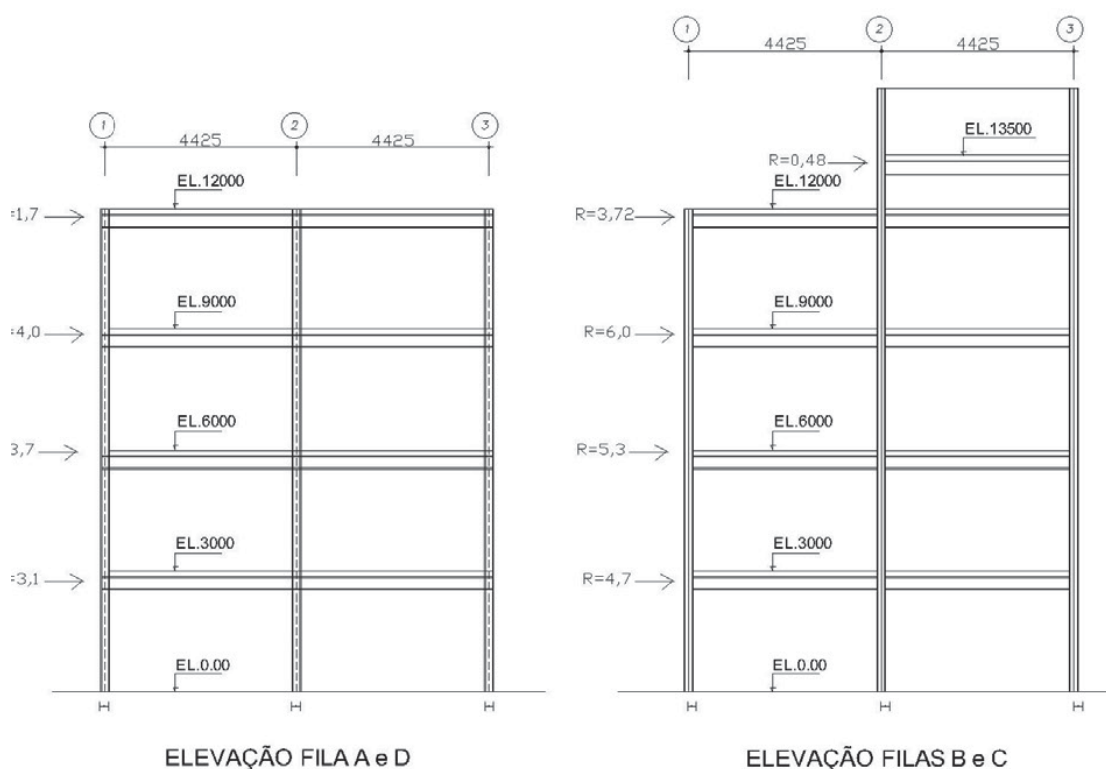
Resumo do vento CV90 (cargas aplicadas nos nós)

Filas A e D

h	$q_k(kN/m^2)$	C_a	$A_{e1}(m^2)$	$F_a(kN)$
3	0,29	1,2	9	3,13
6	0,34	1,2	9	3,67
9	0,37	1,2	9	4,00
12	0,4	1,2	3,5	1,68

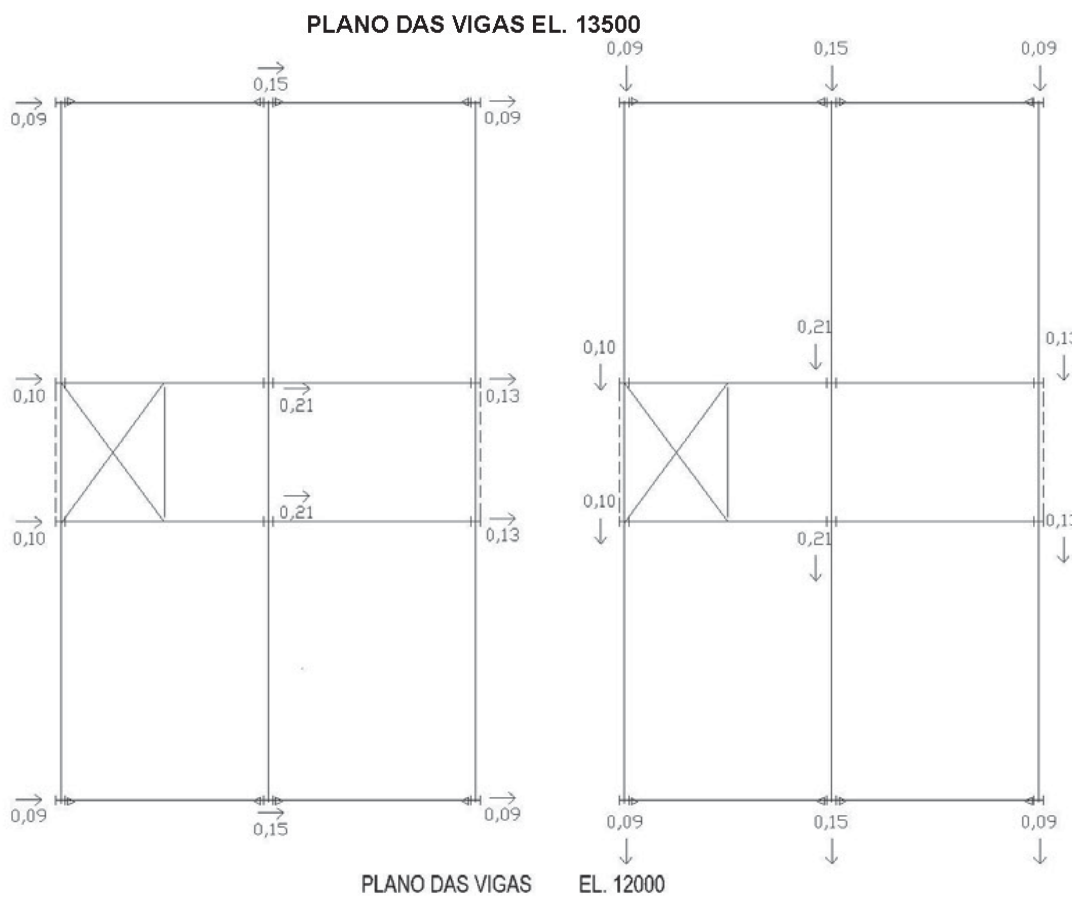
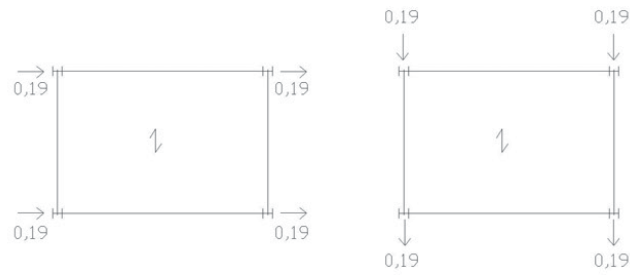
Filas B e C

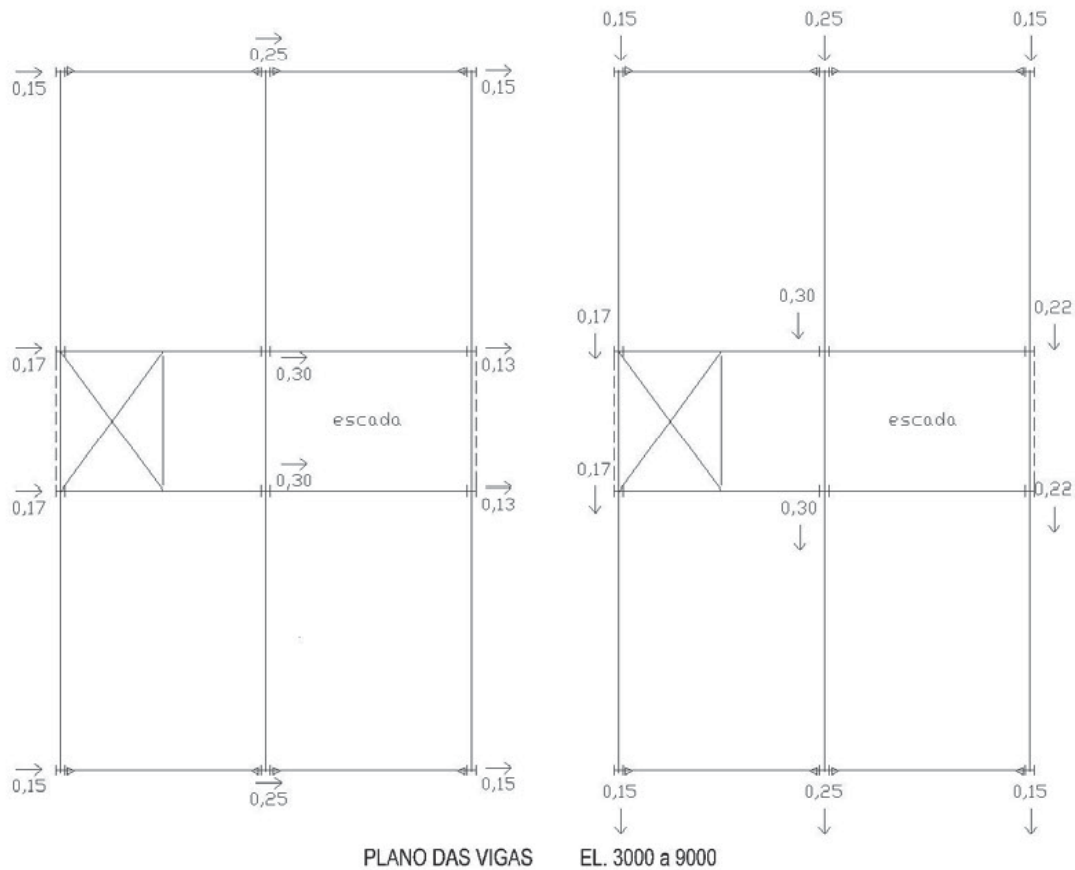
h	$q_k(kN/m^2)$	C_a	$A_{e2}(m^2)$	$F_a(kN)$
3	0,29	1,2	13,5	4,70
6	0,34	1,2	13,5	5,51
9	0,37	1,2	13,5	5,99
12	0,4	1,2	7,87	3,78
13,5	0,4	1,2	1,125	0,54



7.2.3. Força Nocional (FHE)

- 0,3% das ações gravitacionais (CP+CA) devem ser aplicadas nas duas direções (item 4.9.7.1 NBR 8800)





8. Combinações de cargas

Para o projeto estrutural dos membros da estrutura os valores dos coeficientes de ponderação foram obtidos conforme tabela 1 e 2 da NBR 8800. As combinações utilizadas são:

- Combinações últimas normais

Combinação 1 - $1,4 CP + 1,4 CA + FHE 0$

Combinação 2 - $1,4 CP + 1,4 CA + FHE 90$

Combinação 3 - $1,4 CP + 1,4 CA + (1,4 \times 0,6 = 0,84) CV0$

Combinação 4 - $1,4 CP + 1,4 CA + (1,4 \times 0,6 = 0,84) CV90$

Combinação 5 - $1,4 CP + 1,4 CV0 + (1,4 \times 0,5 = 0,70) CA$

Combinação 6 - $1,4 CP + 1,4 CV90 + (1,4 \times 0,5 = 0,70) CA$

- Combinações de serviço

Combinação 7 - $CP + CV0$

Combinação 8 - $CP + CV90$

9. Critérios de redução das cargas acidentais (NBR 6120)

Como o prédio tem apenas 4 pavimentos não é permitido a redução das cargas acidentais.

10. Vibração – Anexo L (NBR 8800)

A NBR 8800 determina que para o piso de residência que a frequência natural não pode ser inferior a 4 Hz. Fica excluído da verificação se $\delta_{cp} < 20\text{mm}$.

11. Deslocamentos máximos (NBR 8800 anexo C)

Edifícios de dois ou mais pavimentos (δ)

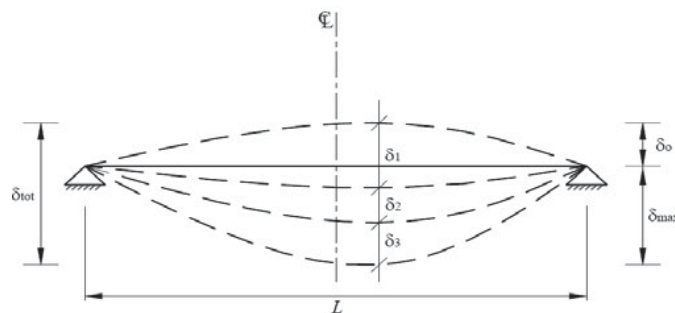
- Deslocamento do topo dos pilares até a base $h/400$
- Deslocamento entre pavimentos $h/500$
- Deformação de vigas sem paredes $L/350$
- Deformação de vigas com paredes 15mm

- Deformação total: $\delta_{tot} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$

δ_1 = deslocamento devido a CP

δ_2 = deslocamento devido a CP longa duração

δ_3 = deslocamento devido as seções variáveis



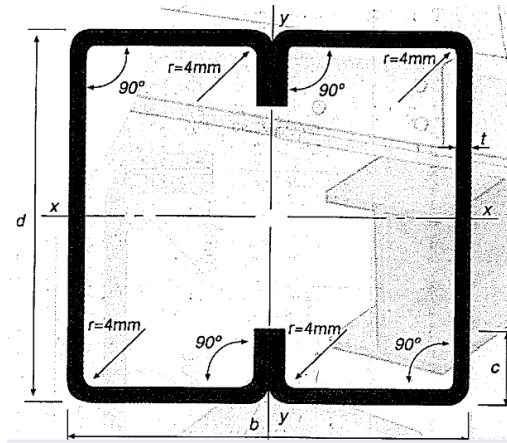
12. Classificação da estrutura quanto à deslocabilidade

O prédio foi rodado no programa SAP200 e verificado a sua deslocabilidade. De acordo com o análise feita o prédio possui pequena deslocabilidade e os momentos indicados no item de calculo via pórtico já levam em consideração o coeficiente B_2 .

13. Dimensionamento das Vigas Biapoiadas

➤ Vigas a serem dimensionadas

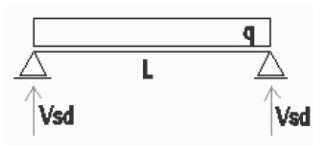
- Concreto: $F_{ck} = 20\text{Mpa}$; Peso Próprio = 25kN/m^3 .
- Aço do Perfil: Tensão de Escoamento = 230 MPa ; Módulo de Elasticidade = 200.000 MPa .
- Viga: CX 300x85x25x2,65



- Propriedades: $d=300\text{mm}$; $b=170\text{mm}$; $c=25\text{mm}$; $t=2,65\text{mm}$; $\text{Massa}=20,81\text{kg/m}$; $A_g=26,51\text{cm}^2$; $I_x=3454\text{cm}^4$; $W_x=230,3\text{cm}^3$; $r_x=11,41\text{cm}$; $I_y=1293,1\text{cm}^4$; $W_y=152,1\text{cm}^3$; $r_y=6,98\text{cm}$; $J=2824,8\text{cm}^4$; $C_w=9943,4\text{cm}^6$.

❖ **Viga V2CX da Elevação 13500**

- Comprimentos de Flambagem: $K_xL_x = 3000\text{mm}$; $K_yL_y = 3000\text{mm}$; $K_zL_z = 3000\text{mm}$;
- Esforço Solicitante:



$$Q_{CP}=2,50+0,179=2,68\text{kN/m}$$

$$Q_{CA}=0\text{kN/m}$$

$$1,4Q_{CP}+1,4Q_{CA} = 1,4 \times 2,68 = 3,75\text{kN/m}$$

$$Q_{TOTAL} = 3,75\text{kN/m}$$

$$M_{sd} = \frac{3,75 \times 3,0^2}{8} = 4,22\text{kN.m} = 422\text{kN.cm}$$

$$V_{sd} = \frac{3,75 \times 3,0}{2} = 5,63\text{kN}$$

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomando como o menor valor calculado com base: no início do escoamento da seção efetiva, na flambagem lateral com torção (FLT) e na flambagem por distorção da seção transversal.

13.1. Momento com base no início do escoamento da seção efetiva

Neste procedimento o momento fletor resistente de cálculo é determinado com base na resistência ao escoamento do aço, f_y , e no módulo resistente elástico da seção efetiva, W_{ef} , quando uma fibra extrema tracionada ou uma comprimida, ou ambas, atingem f_y .

▪ **Método da Largura Efetiva**

Verificação do flange comprimido (elemento 2)

$$b = [85 - 4 \times (2,65 - 0,036)] \div 10 = 7,454 \text{ cm (comprimento do elemento)}$$

$$t = (2,65 - 0,036) \div 10 = 0,2614 \text{ cm (espessura do elemento)}$$

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{E}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,454}{0,2614}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{20000}{23}}\right]} = 1,552$$

$$\lambda_{po} \geq 0,673$$

Para o enrijecedor (elemento 3) de um perfil Cx, que tem 2 dobras em ângulo reto, a dimensão plana do elemento é dada por:

$$d = (25 \div 10) - 2 \times 0,2614 = 1,977 \text{ cm}$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{1,977^3 \times 0,2614}{12} = 0,1684 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 399 t^4 (0,487 \lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,2614^4 \times (0,487 \times 1,552 - 0,328)^3$$

$$I_a = 0,1459 \text{ cm}^4$$

$$I_a \leq t^4 (56 \lambda_{po} + 5) = 0,2614^4 \times (56 \times 1,552 + 5) = 0,429 \text{ cm}^4$$

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

$$n = (0,582 - 0,122 \times 1,552) = 0,393 \geq 1/3$$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{7,454} = 0,335$$

$$0,25 < \frac{D}{b} \leq 0,8$$

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,1684}{0,1459} = 1,154 \geq 1,0 \rightarrow \frac{I_s}{I_a} = 1,0$$

Cálculo do coeficiente de flambagem local, k:

$$k = (4,82 - 5 D/b)(I_s/I_a)^n + 0,43 \leq 4$$

$$k = (4,82 - 5 \times 0,335)(1,0)^{0,393} + 0,43 = 3,575 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,575$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,454}{0,2614}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{3,575 \times 20000}{23}}\right]} = 0,538$$

Como $\lambda_p \leq 0,673$, não haverá flambagem local, logo:

$$b_{ef} = 7,454 \text{ cm}$$

Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3)

$$d_{ef} = [25 - 2 \times (2,65 - 0,036)] \div 10 = 1,977 \text{ cm}$$

$$t = (2,65 - 0,036) \div 10 = 0,2614 \text{ cm}$$

$$k = 0,43, \text{ conforme caso "a" da tabela 6 da norma NBR 14762:2010.}$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95\sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{1,977}{0,2614}}{\left[0,95\sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{23}}\right]} = 0,412$$

Como $\lambda_p < 0,673$, não haverá flambagem local.

$$d_{ef} = 1,977cm \text{ (largura efetiva do enrijecedor de borda)}$$

$$d_{ef} = d_s = 1,977 \text{ (largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda)}$$

Verificação da Alma (elemento 1)

Nesta etapa, a posição da Linha Neutra da Seção Efetiva (LNC) é determinada considerando-se um processo iterativo, conseguindo-se a convergência quando a posição da LNC de uma interação não diferenciar mais do que 5% da posição da LNC da interação anterior.

Os cálculos das propriedades da seção efetiva do perfil são realizados empregando-se o “método linear” isto é, todo o material é admitido como concentrado na linha média da seção (linha esqueleto) e os elementos são tratados – isoladamente - como linhas retas (parte plana) ou curvas (dobras). Os valores assim obtidos são multiplicados pela espessura t , de maneira a obter as propriedades geométricas desejadas.

O teorema do Eixo Paralelo é utilizado para os cálculos do momento de inércia da seção efetiva.

Primeira interação: considerando a alma totalmente efetiva.

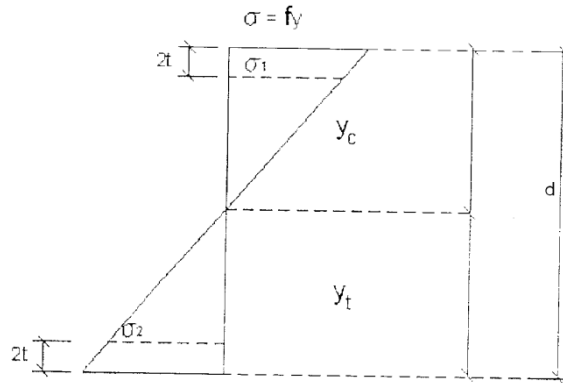
$$b = [300 - 4 \times (2,65 - 0,036)] \div 10 = 28,954cm \text{ (comprimento do elemento)}$$

$$t = (2,65 - 0,036) \div 10 = 0,2614cm \text{ (espessura do elemento)}$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	7,454	0,131	0,974
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168
Enrijecedor Superior	1,977	1,511	2,988
Alma	28,954	15,000	434,316
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300
Soma	50,280	-	754,186

$$y_{cg} = \frac{754,186}{50,280} = 15cm$$

$$y_t = 30 - 15 = 15cm$$



$$\sigma_1 = \frac{f_y(y_{cg} - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (15,0 - 2 \times 0,2614)}{15,0} = 22,20 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{f_y(y_t - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (15 - 2 \times 0,2614)}{15} = -20,20 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-20,20}{20,20} = -1,0 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

Para o cálculo do coeficiente de flambagem local k ver caso "d" da tabela 5 da Norma NBR14762.

$$k = 4 + 2(1 - \psi)^3 + 2(1 - \psi)$$

$$k = 4 + 2(1 + 1)^3 + 2(1 + 1) = 24$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{\bar{t}}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{28,954}{0,2614}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{24 \times 20000}{20,20}}\right]} = 0,76$$

Como $\lambda_p \geq 0,673$, poderá ocorrer flambagem local na mesa superior do perfil. Portanto deve ser calculada a largura efetiva deste elemento, b_{ef} , conforme segue:

$$b_{ef} = b_c \frac{1}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \leq b_c$$

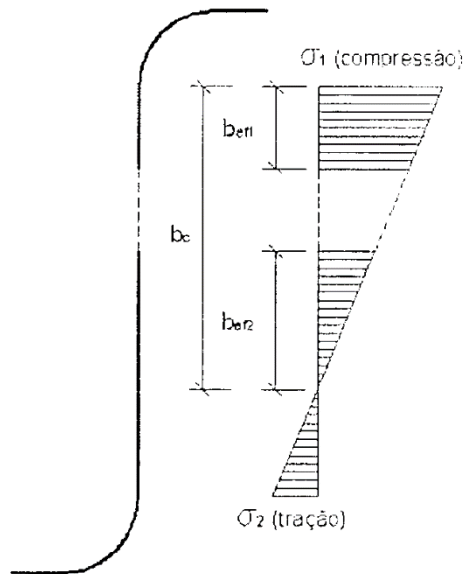
$$b_c = 15,0 - 2 \times 0,2614 = 14,477 \text{ cm}$$

$$b_{ef} = \frac{14,477}{0,76} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,76}\right) = 13,53 \text{ cm} \leq b_c = 14,477 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{b_{ef}}{(3 - \psi)} = \frac{13,53}{(3 + 1)} = 3,38 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5b_{ef} = 0,5 \times 13,53 = 6,765 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,38 + 6,765 = 10,149 \text{ cm} \leq b_c = 14,477 \text{ cm}$$



Segunda interação: considerando a alma não totalmente efetiva.

A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = (b_{ef1} + b_{ef2}) - b_c = 10,149 - 14,94 = -4,33\text{cm}$$

$$y_{inef} = y_{cg} - (b_{ef2} - b_{inef}/2) = 15 - (6,765 + 4,33/2) = 6,07\text{cm}$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	6,971	0,131	0,911
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168
Enrijecedor Superior	0,809	0,927	0,750
Elemento Inefetivo da Alma	-4,33	6,07	-26,28
Alma	28,954	15,000	434,316
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300
Soma	45,70	-	726,18

$$y_{cg} = \frac{726,18}{45,70} = 15,89\text{cm}$$

$$y_t = 30 - 15,89 = 14,11\text{cm}$$

O eixo neutro mudou de 15,46cm para 16,77cm, resultando em uma diferença de 5,94%. Isto torna necessária a execução de mais interações.

❖ Terceira interação

$$\sigma_1 = \frac{23 \times (15,89 - 2 \times 0,2614)}{15,89} = 22,24\text{kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{23 \times (14,11 - 2 \times 0,2614)}{15,89} = -19,67 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{-19,67}{22,24} = -0,88 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

$$k = 4 + 2(1 + 0,88)^3 + 2(1 + 0,88) = 21,05$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{28,954}{0,2614}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{21,05 \times 20000}{22,24}}\right]} = 0,847$$

Como $\lambda_p \geq 0,673$, poderá ocorrer flambagem local na mesa superior do perfil. Portanto deve ser calculada a largura efetiva deste elemento, b_{ef} , conforme segue:

$$b_c = 15,89 - 2 \times 0,2614 = 15,37 \text{ cm}$$

$$b_{ef} = \frac{15,37}{0,847} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,847}\right) = 13,43 \text{ cm} \leq b_c = 15,37 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{13,43}{(3 + 0,88)} = 3,46 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5 \times 13,43 = 6,715 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,46 + 6,715 = 10,175 \text{ cm} \leq b_c = 15,37 \text{ cm}$$

$$b_{inef} = 10,175 - 15,37 = -5,195 \text{ cm}$$

$$y_{inef} = 15,89 - (6,715 + 5,195/2) = 6,58 \text{ cm}$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	6,971	0,131	0,911
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168
Enrijecedor Superior	0,809	0,927	0,750
Elemento Inefetivo da Alma	-5,195	6,58	-34,18
Alma	28,954	15,000	434,316
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300
Soma	45,10	-	720,10

$$y_{cg} = \frac{720,10}{45,10} = 15,97 \text{ cm}$$

O eixo neutro mudou de 15,89cm para 15,97cm, resultando em uma diferença de 0,503%. Logo a convergência é obtida ao final dessa interação, obtendo-se:

$$y_{cg} = 15,97 \text{ cm}$$

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)	L.y² (cm³)	I'_x (cm³)
Flange Superior	6,971	0,131	0,911	0,119	-
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168	0,046	0,0090
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168	0,046	0,0090
Enrijecedor Superior	0,809	0,927	0,750	0,695	0,0441
Elemento Inefetivo da Alma	-5,18	7,29	-53,25	-388,193	-32,5515
Alma	28,954	15,000	434,316	6514,740	2022,7605
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644	6649,931	-
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328	1604,728	0,6439
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300	544,004	0,0090
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300	544,004	0,0090
Soma	45,096	-	720,10	15637,808	2012,561

$$I_{x'} = \Sigma Ly^2 + \Sigma I'_x - [(y_{cg})^2 \Sigma L] = 15637,808 + 2012,561 - [(15,97^2) \times 45,096]$$

$$I_{x'} = 6151,889 \text{ cm}^4$$

$$I_x = I_{x'} \times t = 6151,889 \times 0,2614 = 1608,10 \text{ cm}^4$$

$I_{x'}$ é o momento de inércia da seção efetiva do perfil considerando-se o método linear.

I_x é o momento de inércia da seção efetiva do perfil.

O módulo de resistência elástico da seção em relação à fibra comprimida é calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme segue:

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{1608,10}{15,97} = 100,708 \text{ cm}^3$$

Sendo assim, o momento fletor resistente calculado com base no início do escoamento da seção efetiva é:

$$M_{rd} = \frac{W_{ef} f_y}{1,1} = \frac{100,708 \times 23}{1,1} = 2105,700 \text{ kN.cm}$$

▪ Método da Seção Efetiva

Para o cálculo do momento fletor resistente de cálculo com base no início do escoamento, tem-se pelo Método da Seção Efetiva que:

$$t_r = 0,018 \text{ mm}$$

$$b_f = b - 2t_r = 85 - 2 \times 0,018 = 84,964 \text{ mm}$$

$$b_w = d - 2t_r = 300 - 2 \times 0,018 = 299,964 \text{ mm}$$

$$D = c - 2t_r = 25 - 2 \times 0,018 = 24,964 \text{ mm}$$

Onde b_f , b_w e D são as dimensões nominais dos elementos que compõem o perfil e t_r é a espessura da camada de proteção que reveste o aço em cada face da chapa.

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{84,964}{299,964} = 0,2832$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{24,964}{299,964} = 0,0832$$

Com base na tabela 13 (caso "b") da Norma NBR 14762:2010, tem-se para o valor do coeficiente de flambagem local da seção completa k_l em barra sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia que:

$$k_l = 29,75$$

O momento fletor de flambagem local elástica pode ser calculado por:

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

$$M_l = 29,75 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1 - 0,30^2)(29,9964/0,2614)^2} \times 115,10 = 4700,85 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W f_y}{M_l}} = \sqrt{\frac{115,10 \times 23}{4700,85}} = 0,750$$

$$\lambda_p \geq 0,673$$

$$W_{ef} = \frac{W}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) = \frac{115,10}{0,750} \left(1 - \frac{0,22}{0,750}\right) = 108,39 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Para 1 Ue}$$

$$W_{ef} = 216,77 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Para seção composta de 2 Ue}$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{216,77 \times 23}{1,1} = 4533,5 \text{ kN.cm}$$

13.2. Momento calculado com base na flambagem lateral com torção (FLT)

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

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

Onde, $W_{c,ef}$ é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida calculada com base no método da largura efetiva, adotando $\sigma = \chi_{FLT} f_y$, ou no método da seção efetiva.

▪ Método da Largura Efetiva

Obtido o valor de σ , procedem-se os cálculos de forma análoga a do item anterior, utilizando-se o processo iterativo para a determinação da posição LNe da seção efetiva e das propriedades geométricas correspondentes.

Verificação do Flange Comprimido (Elemento 2)

Para barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica sujeitas a flexão em torno do eixo de simetria (eixo x) e, de acordo com as prescrições apresentadas no item 4.5.1.2 do livro texto “Steel Framing Engenharia” (pg. 50), tem-se:

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

M_e é o momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico.

Para perfil duplamente simétrico, tem-se:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 3454}{(300)^2} = 7575,47 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 5480,77}{(300)^2} = 12020,67 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left\{ GJ + \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(k_z L_z)^2} \right] \right\} = \frac{1}{18,36^2} \left\{ 7700 \times 895,15 + \left[\frac{\pi^2 \times 20000 \times 9943,2}{(300)^2} \right] \right\}$$

$$N_{ez} = 20512,24 \text{ kN}$$

$$C_b = 1,0$$

$$M_e = 1,0 \times 18,36 \times (12020,67 \times 20512,24)^{0,5} = 288299,29 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W_c f_y}{M_e}} = \sqrt{\frac{230,20 \times 23}{288299,28}} = 0,136$$

Como $\lambda_p = 0,136 \leq 0,6$ $\chi_{FLT} = 1,0$ (χ_{FLT} é o fator de redução associado a flambagem lateral com torção da barra). A tensão de compressão relacionada ao momento crítico de flambagem lateral com torção é:

$$\sigma = \chi_{FTL} f_y = 1,0 \times 23 = 23 \text{ kN/cm}^2$$

Considerando-se esta tensão aplicada ao elemento 2, tem-se:

$$b = [85 - 4 \times (2,65 - 0,036)] \div 10 = 7,454 \text{ cm (comprimento do elemento)}$$

$$t = (2,65 - 0,036) \div 10 = 0,2614 \text{ cm (espessura do elemento)}$$

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right]} = \frac{\frac{7,454}{0,2614}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{20000}{23}} \right]} = 1,552$$

$$\lambda_{po} \geq 0,673$$

Para o enrijecedor (elemento 3) de um perfil Cx, que tem 2 dobras em ângulo reto, a dimensão plana do elemento é dada por:

$$d = (25 \div 10) - 2 \times 0,2614 = 1,977 \text{ cm}$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{1,977^3 \times 0,2614}{12} = 0,1684 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 399 t^4 (0,487 \lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,2614^4 \times (0,487 \times 1,552 - 0,328)^3$$

$$I_a = 0,1459 \text{ cm}^4$$

$$I_a \leq t^4 (56 \lambda_{po} + 5) = 0,2614^4 \times (56 \times 1,552 + 5) = 0,429 \text{ cm}^4$$

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

$$n = (0,582 - 0,122 \times 1,552) = 0,393 \geq 1/3$$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{7,454} = 0,335$$

$$0,25 < \frac{D}{b} \leq 0,8$$

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,1684}{0,1459} = 1,154 \geq 1,0 \rightarrow \frac{I_s}{I_a} = 1,0$$

Cálculo do coeficiente de flambagem local, k:

$$k = (4,82 - 5 D/b)(I_s/I_a)^n + 0,43 \leq 4$$

$$k = (4,82 - 5 \times 0,335)(1,0)^{0,393} + 0,43 = 3,575 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,575$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,454}{0,2614}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{3,575 \times 20000}{23}}\right]} = 0,538$$

Como $\lambda_p \leq 0,673$, não haverá flambagem local, logo:

$$b_{ef} = 7,454 \text{ cm}$$

Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3)

$$d_{ef} = [25 - 2 \times (2,65 - 0,036)] \div 10 = 1,977 \text{ cm}$$

$$t = (2,65 - 0,036) \div 10 = 0,2614 \text{ cm}$$

$k = 0,43$, conforme caso "a" da tabela 6 da norma NBR 14762:2010.

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{1,977}{0,2614}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{23}}\right]} = 0,412$$

Como $\lambda_p < 0,673$, não haverá flambagem local.

$$d_{ef} = 1,977 \text{ cm} \text{ (largura efetiva do enrijecedor de borda)}$$

$$d_{ef} = d_s = 1,977 \text{ (largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda)}$$

- Verificação da Alma (elemento 1)

Primeira interação: considerando a alma totalmente efetiva.

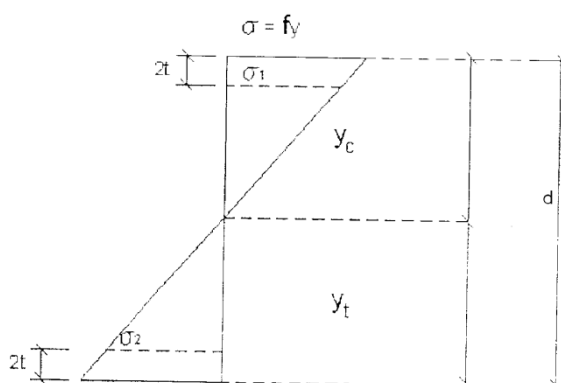
$$b = [300 - 4 \times (2,65 - 0,036)] \div 10 = 28,954\text{cm} \text{ (comprimento do elemento)}$$

$$t = (2,65 - 0,036) \div 10 = 0,2614\text{cm} \text{ (espessura do elemento)}$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	7,454	0,131	0,974
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168
Enrijecedor Superior	1,977	1,511	2,988
Alma	28,954	15,000	434,316
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300
Soma	50,280	-	754,186

$$y_{cg} = \frac{754,186}{50,280} = 15\text{cm}$$

$$y_t = 30 - 15 = 15\text{cm}$$



$$\sigma_1 = \frac{f_y(y_{cg} - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (15,0 - 2 \times 0,2614)}{15,0} = 22,20\text{kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{f_y(y_t - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (15 - 2 \times 0,2614)}{15} = -20,20\text{kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-20,20}{20,20} = -1,0 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

Para o cálculo do coeficiente de flambagem local k ver caso "d" da tabela 5 da Norma NBR14762.

$$k = 4 + 2(1 - \psi)^3 + 2(1 - \psi)$$

$$k = 4 + 2(1 + 1)^3 + 2(1 + 1) = 24$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{28,954}{0,2614}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{24 \times 20000}{20,20}}\right]} = 0,76$$

Como $\lambda_p \geq 0,673$, poderá ocorrer flambagem local na mesa superior do perfil. Portanto deve ser calculada a largura efetiva deste elemento, b_{ef} , conforme segue:

$$b_{ef} = b_c \frac{1}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \leq b_c$$

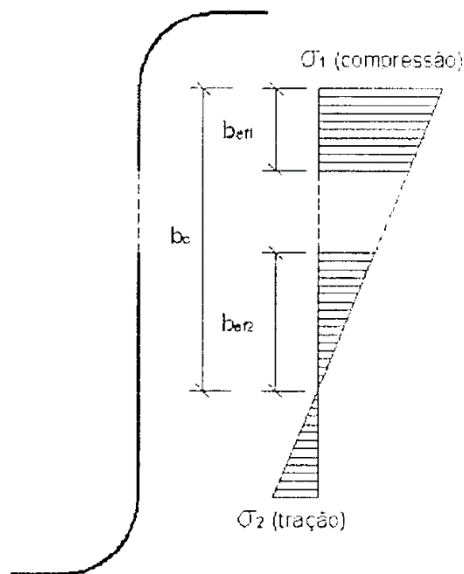
$$b_c = 15,0 - 2 \times 0,2614 = 14,477 \text{ cm}$$

$$b_{ef} = \frac{14,477}{0,76} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,76}\right) = 13,53 \text{ cm} \leq b_c = 14,477 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{b_{ef}}{(3 - \psi)} = \frac{13,53}{(3 + 1)} = 3,38 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5 b_{ef} = 0,5 \times 13,53 = 6,765 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,38 + 6,765 = 10,149 \text{ cm} \leq b_c = 14,477 \text{ cm}$$



Segunda interação: considerando a alma não totalmente efetiva.

A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = (b_{ef1} + b_{ef2}) - b_c = 10,149 - 14,94 = -4,33 \text{ cm}$$

$$y_{inef} = y_{cg} - (b_{ef2} - b_{inef}/2) = 15 - (6,765 + 4,33/2) = 6,07 \text{ cm}$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	6,971	0,131	0,911
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168
Enrijecedor Superior	0,809	0,927	0,750
Elemento Inefetivo da Alma	-4,33	6,07	-26,28
Alma	28,954	15,000	434,316
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300
Soma	45,70	-	726,18

$$y_{cg} = \frac{726,18}{45,70} = 15,89cm$$

$$y_t = 30 - 15,89 = 14,11cm$$

O eixo neutro mudou de 15,46cm para 16,77cm, resultando em uma diferença de 5,94%. Isto torna necessária a execução de mais interações.

❖ Terceira interação

$$\sigma_1 = \frac{23 \times (15,89 - 2 \times 0,2614)}{15,89} = 22,24kN/cm^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{23 \times (14,11 - 2 \times 0,2614)}{15,89} = -19,67kN/cm^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{-19,67}{22,24} = -0,88 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

$$k = 4 + 2(1 + 0,88)^3 + 2(1 + 0,88) = 21,05$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{\bar{t}}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{28,954}{0,2614}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{21,05 \times 20000}{22,24}}\right]} = 0,847$$

Como $\lambda_p \geq 0,673$, poderá ocorrer flambagem local na mesa superior do perfil. Portanto deve ser calculada a largura efetiva deste elemento, b_{ef} , conforme segue:

$$b_c = 15,89 - 2 \times 0,2614 = 15,37cm$$

$$b_{ef} = \frac{15,37}{0,847} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,847}\right) = 13,43cm \leq b_c = 15,37cm$$

$$b_{ef1} = \frac{13,43}{(3 + 0,88)} = 3,46cm$$

$$b_{ef2} = 0,5 \times 13,43 = 6,715cm$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,46 + 6,715 = 10,175cm \leq b_c = 15,37cm$$

$$b_{inef} = 10,175 - 15,37 = -5,195cm$$

$$y_{inef} = 15,89 - (6,715 + 5,195/2) = 6,58cm$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	6,971	0,131	0,911
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168
Enrijecedor Superior	0,809	0,927	0,750
Elemento Inefetivo da Alma	-5,195	6,58	-34,18
Alma	28,954	15,000	434,316
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300
Soma	45,10	-	720,10

$$y_{cg} = \frac{720,10}{45,10} = 15,97cm$$

O eixo neutro mudou de 15,89cm para 15,97cm, resultando em uma diferença de 0,503%. Logo a convergência é obtida ao final dessa interação, obtendo-se:

$$y_{cg} = 15,97cm$$

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)	L.y² (cm³)	I'x (cm³)
Flange Superior	6,971	0,131	0,911	0,119	-
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168	0,046	0,0090
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168	0,046	0,0090
Enrijecedor Superior	0,809	0,927	0,750	0,695	0,0441
Elemento Inefetivo da Alma	-5,18	7,29	-53,25	-388,193	-32,5515
Alma	28,954	15,000	434,316	6514,740	2022,7605
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644	6649,931	-
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328	1604,728	0,6439
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300	544,004	0,0090
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300	544,004	0,0090
Soma	45,096	-	720,10	15637,808	2012,561

$$I_{x'} = \Sigma Ly^2 + \Sigma I'_x - [(y_{cg})^2 \Sigma L] = 15637,808 + 2012,561 - [(15,97^2) \times 45,096]$$

$$I_{x'} = 6151,889cm^4$$

$$I_x = I_{x'} \times t = 6151,889 \times 0,2614 = 1608,10cm^4$$

$I_{x'}$ é o momento de inércia da seção efetiva do perfil considerando-se o método linear.

I_x é o momento de inércia da seção efetiva do perfil.

O módulo de resistência elástico da seção em relação à fibra comprimida é calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme segue:

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{1608,10}{15,97} = 100,708 \text{ cm}^3$$

Sendo assim, o momento fletor resistente calculado com base no início do escoamento da seção efetiva é:

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{1,1} = \frac{100,708 \times 23}{1,1} = 2105,700 \text{ kN.cm}$$

▪ Método da Seção Efetiva

Para o cálculo do momento fletor resistente de cálculo com base na flambagem lateral com torção, tem-se pelo Método da Seção Efetiva que:

$$\begin{aligned} \chi_{FLT} &= 1,0 \rightarrow (\text{calculado no item anterior}) \\ t_r &= 0,018 \text{ mm} \\ b_f &= b - 2t_r = 85 - 2 \times 0,018 = 84,964 \text{ mm} \\ b_w &= d - 2t_r = 300 - 2 \times 0,018 = 299,964 \text{ mm} \\ D &= c - 2t_r = 25 - 2 \times 0,018 = 24,964 \text{ mm} \\ \eta &= \frac{b_f}{b_w} = \frac{84,964}{299,964} = 0,2832 \\ \mu &= \frac{D}{b_w} = \frac{24,964}{299,964} = 0,0832 \end{aligned}$$

Com base na tabela 13 (caso "b") da Norma NBR 14762:2010, tem-se para o valor do coeficiente de flambagem local da seção completa k_l em barra sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia que:

$$k_l = 29,75$$

O momento fletor de flambagem local elástica pode ser calculado por:

$$\begin{aligned} M_l &= k_l \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) (b_w/t)^2} W_c \\ M_l &= 29,75 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1 - 0,30^2) (29,9964/0,2614)^2} \times 115,10 = 4700,85 \text{ kN.cm} \\ \lambda_p &= \sqrt{\frac{W f_y}{M_l}} = \sqrt{\frac{115,10 \times 23}{4700,85}} = 0,750 \end{aligned}$$

$$\lambda_p \geq 0,673$$

$$\begin{aligned} W_{ef} &= \frac{W}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) = \frac{115,10}{0,750} \left(1 - \frac{0,22}{0,750}\right) = 108,39 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Para 1 Ue} \\ W_{ef} &= 216,77 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Para seção composta de 2 Ue} \end{aligned}$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{216,77 \times 23}{1,1} = 4533,5 \text{ kN.cm}$$

13.3. Momento calculado para a flambagem por distorção da seção transversal

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

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

Onde:

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

$$\chi_{dist} = 1 \rightarrow (\text{para } \chi_{dist} \leq 0,673)$$

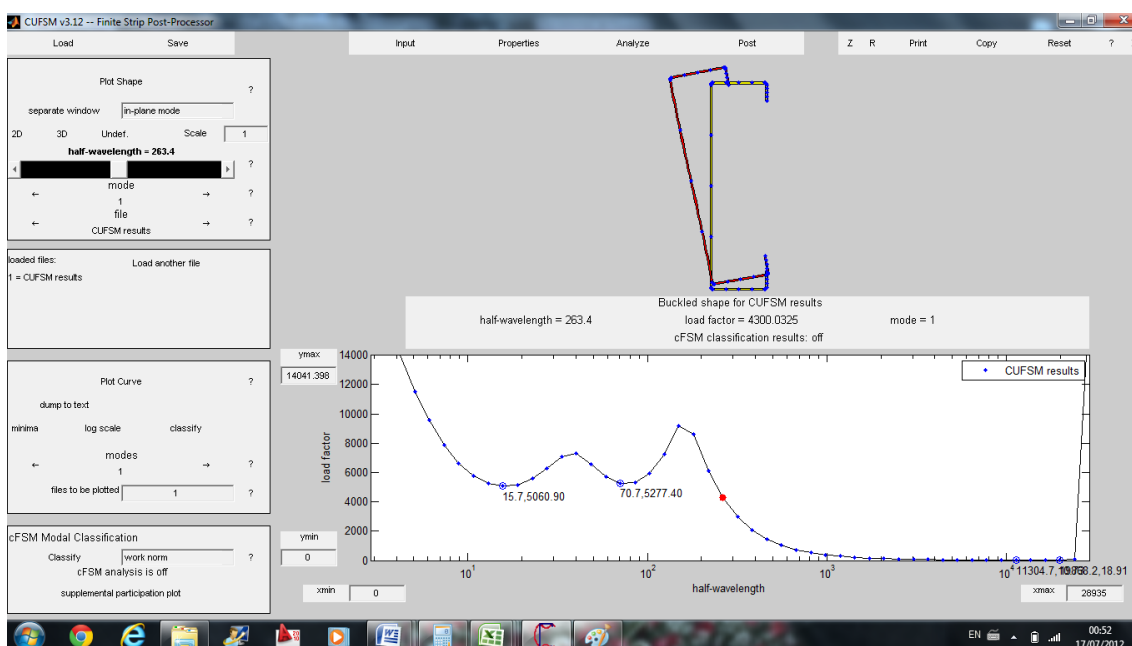
$$\chi_{dist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}}\right) \frac{1}{\lambda_{dist}} \rightarrow (\text{para } \chi_{dist} > 0,673)$$

λ_{dist} é o índice de esbeltez reduzido a flambagem distorcional, dado por:

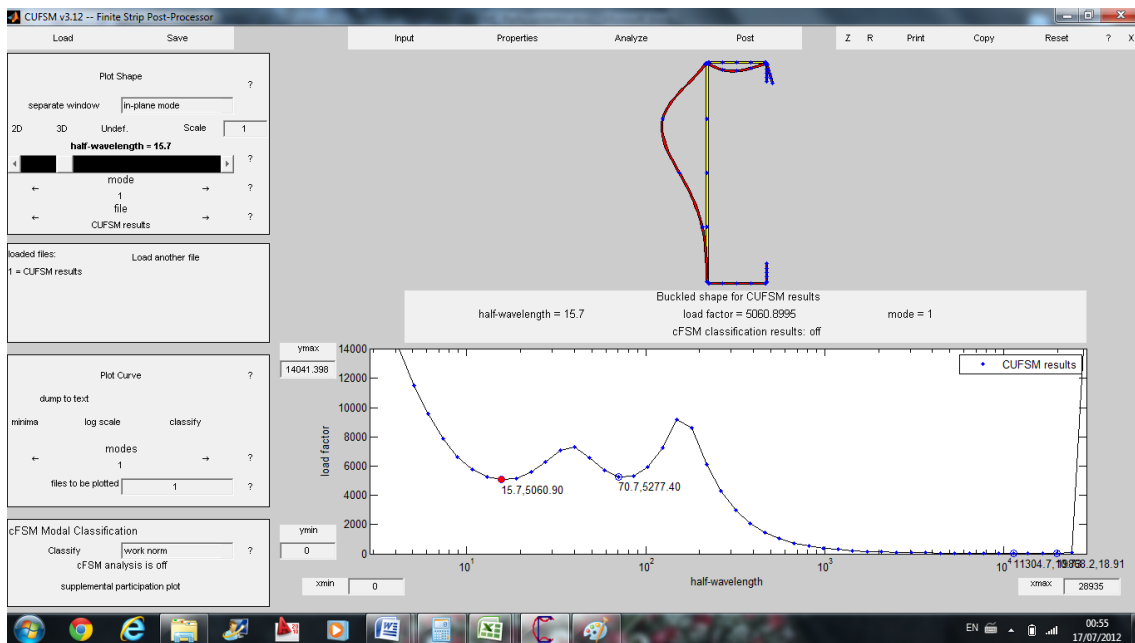
$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{W f_y}{M_{dist}}}$$

M_{dist} é o momento fletor de flambagem distorcional, que deve ser calculado com base na análise de estabilidade elástica.

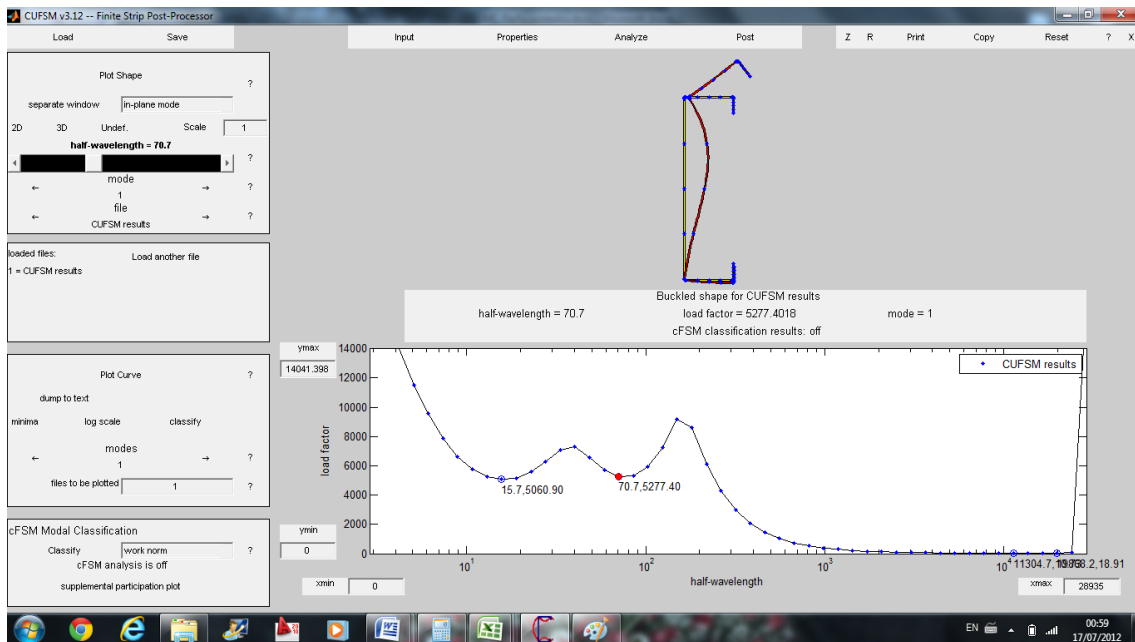
O cálculo do momento fletor de flambagem distorcional será feito através do programa gratuito, baseado no Método das faixas Finitas, CUFSM 3.12.



O primeiro ponto de mínimo do gráfico representa a forma deformada do perfil relacionada à flambagem local, obtendo-se $M_l = 5060,9kn.cm$ para o comprimento de meia onda de 15,7cm.



O segundo ponto de mínimo do gráfico representa a forma deformada do perfil relacionada à flambagem distorcional, obtendo-se $M_{dist} = 5277,4kn.cm$ para o comprimento de meia onda de 70,7cm.



Desta forma, tem-se:

$$M_{dist} = 5277,4kN.cm$$

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{230,20 \times 23}{5277,4}} = 1,002 \rightarrow \lambda_{dist} > 0,673$$

$$\chi_{dist} = \left(1 - \frac{0,22}{1,002}\right) \frac{1}{1,002} = 0,779$$

$$M_{Rd} = \frac{0,779 \times 230,30 \times 23}{1,10} = 3750,60kN, cm$$

13.4. Conclusão:

O momento resistente de calculo é o menor dos momentos determinados com base no inicio do escoamento, na flambagem lateral com torção e na flambagem por distorção da seção transversal.

Para a determinação do momento de calculo com base no inicio do escoamento e na flambagem lateral com torção foram utilizados o Método da Largura Efetiva e o Método da Seção Efetiva. A ABNT NBR 14672:2010 permite a adoção de qualquer um destes dois métodos. Neste trabalho serão considerados os seguintes valores:

$$M_{Rd} = 2105,700kN.cm \rightarrow (MLE \text{ para Inicio do Escoamento e FLT})$$

Para a flambagem distorcional da seção obteve-se:

$$M_{Rd} = 3750,60kN.cm$$

Logo o momento resistente de calculo será:

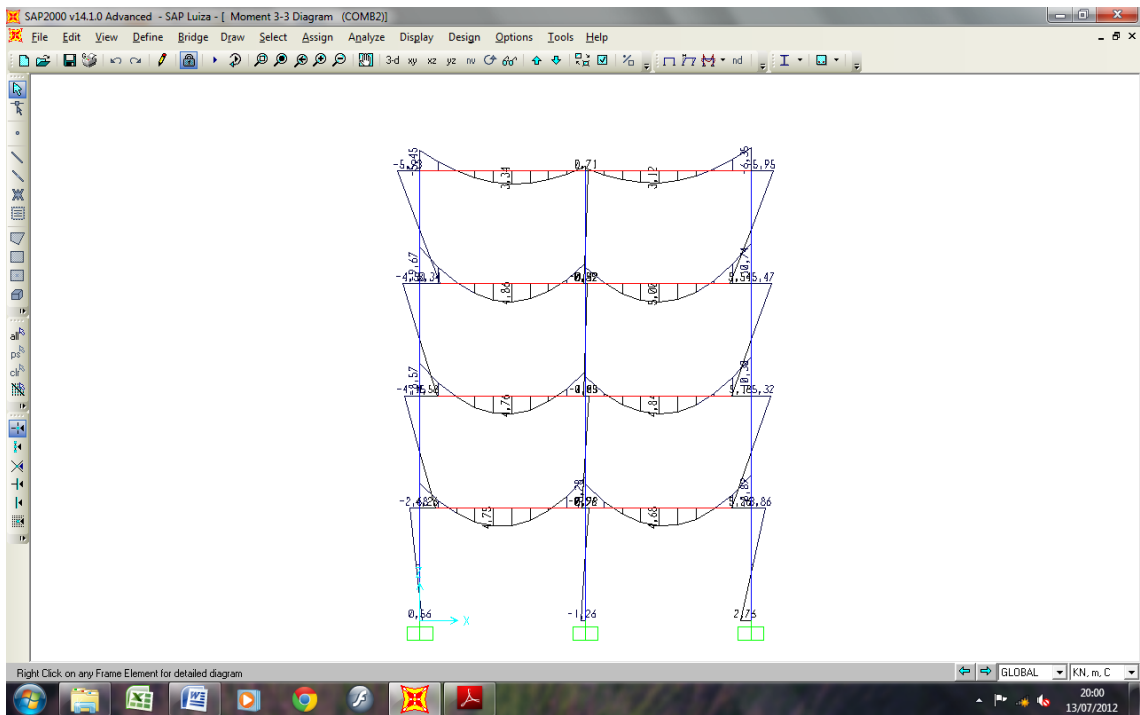
$$M_{Rd} = 2105,700kN.cm$$

Como o momento solicitante de calculo é menor do que o momento resistente de calculo ($M_{Sd} = 422kN.cm < M_{Rd} = 2105,700kN.cm$) o perfil esta apto a ser utilizado nesta viga.

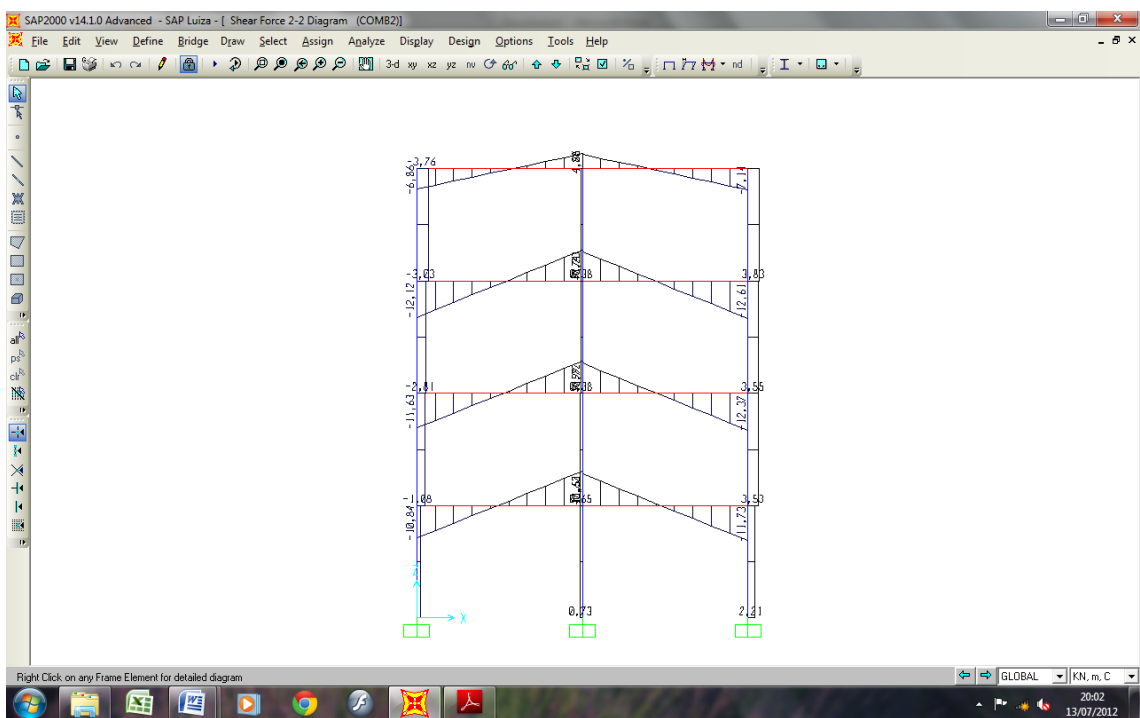
14. Estudo da Estrutura como Pórticos

Vamos mostrar apenas os diagramas da combinação 2 para as Filas A e D. Os valores usados para o dimensionamento foram obtidos através dos diagramas apresentados abaixo:

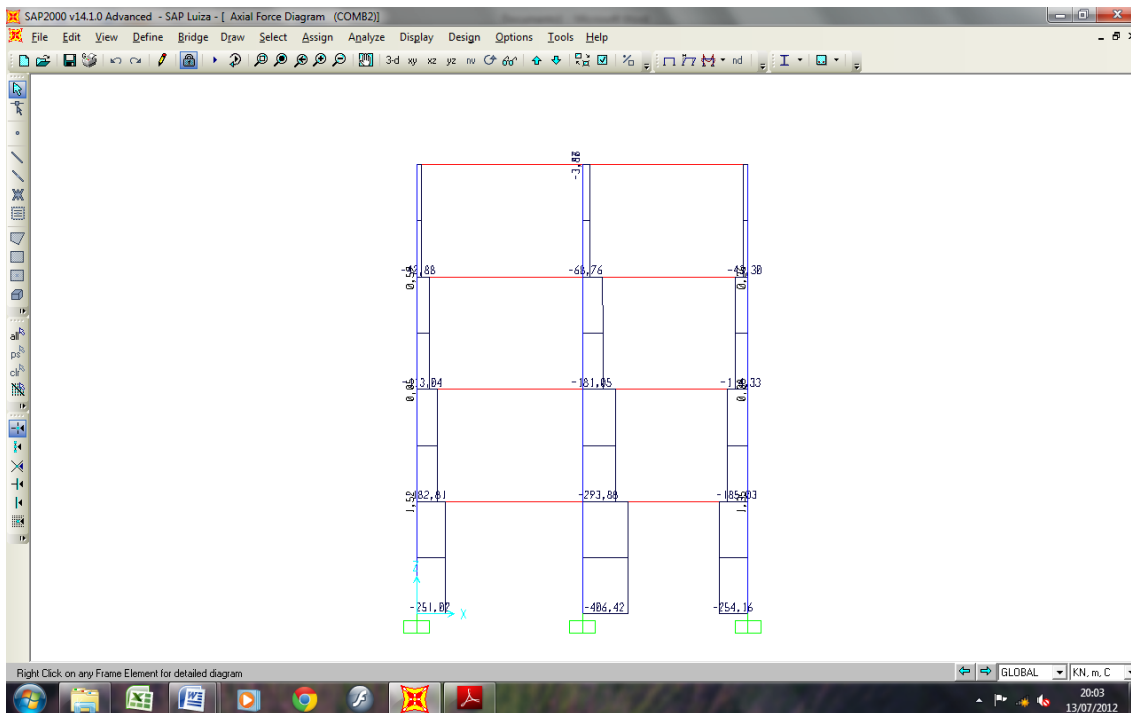
- Momento Solicitante (M_{Sd})



- Cortante Solicitante (V_{sd})



- Força Normal Solicitante (N_{sd})



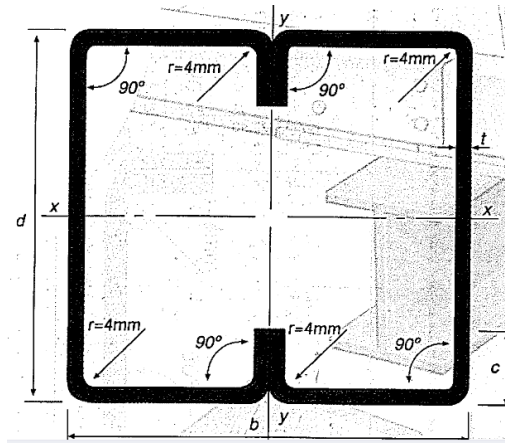
14.1. Esforços Solicitantes de Cálculo

O quadro abaixo representa os esforços nas colunas de acordo com os diagramas obtidos no programa SAP2000. Ele representa apenas os valores máximos que devem ser usados na verificação das colunas para diversos carregamentos. Vamos dimensionar apenas as vigas e colunas do pórtico Fila A e D.

Combinação	Coluna central			Coluna de extremidade			Viga			
	N (KN)	M (KN.m)	V (KN)	N (KN)	M (KN.m)	V (KN)	N (KN)	M (KN.m)	V (KN)	Deformação cm
Comb. 2	406,42	0,92	0,73	254,16	2,76	1,08	-1,52	8,89	8,89	0,1165
Comb. 4	406,41	8,96	5,15	260,99	9,35	5,53	-0,29	15,56	14,55	0,1455
Comb. 6	362,05	15,03	8,64	243,59	14,48	8,11	1	20,57	16,68	0,1786

15. Dimensionamento dos Pilares do Pórtico

- Concreto: $F_{ck} = 20\text{MPa}$; Peso Próprio = 25kN/m^3 .
- Aço do Perfil: Tensão de Escoamento = 230MPa ; Módulo de Elasticidade = 200.000MPa .
- Pilar: CX 300x85x25x2,25



- **Propriedades:** $d=300\text{mm}$; $b=170\text{mm}$; $c=25\text{mm}$; $t=2,25\text{mm}$; $\text{Massa}=17,74\text{kg/m}$; $A_g=22,60\text{cm}^2$; $I_x=2956,3\text{cm}^4$; $W_x=197,10\text{cm}^3$; $r_x=11,44\text{cm}$; $I_y=1105,4\text{cm}^4$; $W_y=130,0\text{cm}^3$; $r_y=6,99\text{cm}$; $J=2412,1\text{cm}^4$; $C_w=8491,2\text{cm}^6$.

15.1. Compressão

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como o menor valor calculado com base na flambagem da barra por flexão, torção ou flexo-torção, e na flambagem por distorção da seção transversal.

15.1.1. Determinação de $N_{c,Rd}$ com base na flambagem da barra por flexão, torção ou flexo-torção

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ de vê ser calculada por:

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma \rightarrow \text{para } \gamma = 1,2$$

▪ Método da Largura Efetiva

I. Determinação da tensão $\sigma = \chi f_y$ a ser aplicada na seção transversal do perfil

A força normal de flambagem elástica N_e de um perfil com seção duplamente simétrico deve ser considerada o menor valor dentre N_{ex} , N_{ey} e N_{ez} .

Força Normal de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 2956,4}{(300)^2} = 6484,11\text{kN}$$

Força Normal de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 1105,4}{(300)^2} = 2424,41\text{kN}$$

Força Normal de flambagem global elástica por torção:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left\{ GJ + \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(k_z L_z)^2} \right] \right\} = \frac{1}{13,41^2} \left\{ 7700 \times 2412,10 + \left[\frac{\pi^2 \times 20000 \times 8491,2}{(300)^2} \right] \right\}$$

$$N_{ez} = 103386,47kN$$

Força Normal de flambagem global elástica por flexo-torção:

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \left[1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right]} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez} \left[1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right\}$$

$$N_{exz} = \frac{6484,11 + 103386,47}{2[1 - (0)^2]} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \times 6484,11 \times 103386,47[1 - (0)^2]}{(6484,11 \times 103386,47)^2}} \right\}$$

$$N_{exz} = 42348,61kN$$

Logo a força normal de flambagem elástica é: $N_e = 2424,41kN$.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Af_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{22,60 \times 23}{2424,41}} = 0,463$$

Onde λ_0 é o índice de esbelteza reduzido da barra associado à flambagem global.

$$\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658\lambda_0^2$$

$$\chi = 0,658^{0,463^2} = 0,914$$

χ é o fator de redução associado a flambagem global da barra.

$$\sigma = \chi f_y = 0,914 \times 23 = 21,03kN/cm^2$$

II. Determinação da área efetiva A_{ef}

Verificação da Alma (Elemento 1)

$$b = [300 - 4 \times (2,25 - 0,036)] \div 10 = 29,114cm \text{ (comprimento do elemento)}$$

$$t = (2,25 - 0,036) \div 10 = 0,2214cm \text{ (espessura do elemento)}$$

$$k = 4 \rightarrow \text{caso "a" da tabela 5 da Norma NBR14762: 2010}$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95\sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{29,114}{0,2214}}{\left[0,95\sqrt{\frac{4 \times 20000}{21,03}}\right]} = 2,24$$

Como $\lambda_p > 0,673$, o perfil está apto a haver flambagem local no elemento 1.

$$b_{ef} = \frac{29,114}{2,24} \times \left(1 - \frac{0,22}{2,24}\right) = 11,72cm \leq b = 29,114cm$$

$$b_{ef} = 11,72cm$$

Verificação da Alma (Elemento 2)

$$b = [85 - 4 \times (2,25 - 0,036)] \div 10 = 7,614cm \text{ (comprimento do elemento)}$$

$$t = (2,25 - 0,036) \div 10 = 0,2214cm \text{ (espessura do elemento)}$$

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623\sqrt{\frac{E}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,614}{0,2214}}{\left[0,623\sqrt{\frac{20000}{21,03}}\right]} = 1,79$$

Como $\lambda_p > 0,673$, tem-se:

$$d = (25 \div 10) - 2 \times 0,2214 = 2,057cm$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{2,057^3 \times 0,22614}{12} = 0,1606cm^4$$

$$I_a = 399t^4(0,487\lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,2214^4 \times (0,487 \times 1,79 - 0,328)^3$$

$$I_a = 0,1541cm^4$$

$$I_a \leq t^4(56\lambda_{po} + 5) = 0,2214^4 \times (56 \times 1,79 + 5) = 0,253cm^4$$

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

$$n = (0,582 - 0,122 \times 1,79) = 0,364 \geq 1/3$$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{7,614} = 0,328$$

$$0,25 < \frac{D}{b} \leq 0,8$$

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,1606}{0,1541} = 1,04 ; \text{ como } \frac{I_s}{I_a} > 1 \rightarrow \frac{I_s}{I_a} = 1$$

Cálculo do coeficiente de flambagem local, k:

$$k = (4,82 - 5D/b)(I_s/I_a)^n + 0,43 \leq 4$$

$$k = (4,82 - 5 \times 0,328)(1)^{0,361} + 0,43 = 3,18 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,18$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95\sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,614}{0,2214}}{\left[0,95\sqrt{\frac{3,18 \times 20000}{21,03}}\right]} = 0,658$$

Como $\lambda_p \leq 0,673$, não haverá flambagem local, logo:

$$b_{ef} = 7,614cm$$

Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3)

$$d_{ef} = [25 - 2 \times (2,25 - 0,036)] \div 10 = 2,057cm$$

$$t = (2,25 - 0,036) \div 10 = 0,2214cm$$

$k = 0,43$, conforme caso "a" da tabela 6 da norma NBR 14762:2010.

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{2,057}{0,2214}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{21,03}}\right]} = 0,484$$

Como $\lambda_p < 0,673$, não haverá flambagem local.

$$d_{ef} = d_s = 2,057 \text{ (largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda)}$$

$$A_{ef} = A_g - A_{inef}$$

$$A_{inef} = (29,114 - 11,72) \times 0,2214 = 3,85cm^2$$

$$A_{ef} = 22,60 - 3,85 = 11,75cm^2$$

III. Determinação de $N_{c,Rd}$

$$N_{c,Rd} = \frac{0,914 \times 11,75 \times 23}{1,2} = 205,84kN$$

▪ Método da Largura Efetiva

$\chi = 0,932 \rightarrow$ calculado no item anterior

$$t_r = 0,018mm$$

$$b_f = b - 2t_r = 85 - 2 \times 0,018 = 84,964mm$$

$$b_w = d - 2t_r = 300 - 2 \times 0,018 = 299,964mm$$

$$D = c - 2t_r = 25 - 2 \times 0,018 = 24,964mm$$

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{84,964}{299,964} = 0,2832$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{24,964}{299,964} = 0,0832$$

Como $\mu = 0,0832$, não satisfaz a situação $0,1 \leq \mu \leq 0,3$, o método de calculo "Largura Efetiva" não pode ser aplicado.

15.1.2. Determinação de $N_{c,Rd}$ com base na flambagem por distorção da seção transversal

A tabela 11 da Norma NBR14762:2010 apresenta os valores mínimos da relação D/b_w de seções do tipo U enrijecido submetido a compressão centrada para dispensar a verificação da flambagem por distorção.

Para o perfil em questão, tem-se:

$$\begin{aligned}t_r &= 0,018mm \\b_f &= 85 - 2 \times 0,018 = 84,964mm \\b_w &= 300 - 2 \times 0,018 = 299,964mm \\D &= 25 - 2 \times 0,018 = 24,964mm \\t &= 2,25 - 2 \times 0,018 = 2,214mm \\b_f/b_w &= 84,964/299,964 = 0,283 \\b_w/t &= 299,964/2,214 = 135,485 \\D/b_w &= 24,964/299,964 = 0,083\end{aligned}$$

De acordo a tabela, o valor mínimo para a relação $D/b_w \geq 0,35$. Dessa forma pode-se concluir que fica dispensada a verificação da flambagem por distorção, por não corresponder esta ao modo crítico do perfil quando submetido à compressão centrada.

15.1.3. Conclusão

A força normal de compressão resistente de calculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como o menor valor calculado com base na flambagem da barra por flexão, torção ou flexo-torção, e na flambagem por distorção da seção transversal.

Para a flambagem da barra por flexão, torção ou flexo-torção foi utilizada apenas o Método da Largura Efetiva, já que o Método da Seção Efetiva não pode ser aplicado. Neste caso o valor de $N_{c,Rd} = 205,84kN$.

Uma vez que a flambagem por distorção da seção transversal não caracteriza o modo crítico do perfil, tem-se que $N_{c,Rd} = 205,84kN$, que corresponde a flambagem da barra por flexão.

15.2. Flexão

O momento fletor resistente de calculo M_{Rd} deve ser tomado como o menor valor calculado com base: no início do escoamento, na flambagem lateral com torção (FLT) ou na verificação da flambagem por distorção.

15.2.1. Momento Calculado com Base no Início do Escoamento

- Método da Largura Efetiva

Verificação do flange comprimido (elemento 2)

$$\begin{aligned}b &= [85 - 4 \times (2,25 - 0,036)] \div 10 = 7,614cm \text{ (comprimento do elemento)} \\t &= (2,25 - 0,036) \div 10 = 0,2214cm \text{ (espessura do elemento)}\end{aligned}$$

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623\sqrt{\frac{E}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,614}{0,2214}}{\left[0,623\sqrt{\frac{20000}{23}}\right]} = 1,87$$

Como $\lambda_p > 0,673$, tem-se:

$$d = (25 \div 10) - 2 \times 0,2214 = 2,057 \text{ cm}$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{2,057^3 \times 0,2214}{12} = 0,1606 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 399t^4(0,487\lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,2214^4 \times (0,487 \times 1,87 - 0,328)^3$$

$$I_a = 0,1906 \text{ cm}^4$$

$$I_a \leq t^4(56\lambda_{po} + 5) = 0,2214^4 \times (56 \times 1,87 + 5) = 0,264 \text{ cm}^4$$

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

$$n = (0,582 - 0,122 \times 1,87) = 0,354 \geq 1/3$$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{7,614} = 0,328$$

$$0,25 < \frac{D}{b} \leq 0,8$$

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,1606}{0,1906} = 0,843$$

Cálculo do coeficiente de flambagem local, k:

$$k = (4,82 - 5 D/b)(I_s/I_a)^n + 0,43 \leq 4$$

$$k = (4,82 - 5 \times 0,328)(0,843)^{0,354} + 0,43 = 3,423 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,423$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95\sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,614}{0,2214}}{\left[0,95\sqrt{\frac{3,423 \times 20000}{23}}\right]} = 0,663$$

Como $\lambda_p \leq 0,673$, não haverá flambagem local, logo:

$$b_{ef} = 7,614 \text{ cm}$$

Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3)

$$d_{ef} = [25 - 2 \times (2,25 - 0,036)] \div 10 = 1,977 \text{ cm}$$

$$t = (2,25 - 0,036) \div 10 = 0,2214 \text{ cm}$$

$k = 0,43$, conforme caso "a" da tabela 6 da norma NBR 14762:2010.

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95\sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{2,057}{0,2214}}{\left[0,95\sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{23}}\right]} = 0,506$$

Como $\lambda_p < 0,673$, não haverá flambagem local.

$$d_{ef} = 2,057cm \text{ (largura efetiva do enrijecedor de borda)}$$

$$d_s = (I_s/I_a) \times d_{ef} = 0,843 \times 2,057 = 1,734 \leq d_{ef} = 2,057$$

$$d_s = 1,734 \text{ (largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda)}$$

Verificação da Alma (elemento 1)

Nesta etapa, a posição da Linha Neutra da Seção Efetiva (LNC) é determinada considerando-se um processo iterativo, conseguindo-se a convergência quando a posição da LNC de uma interação não diferenciar mais do que 5% da posição da LNC da interação anterior.

Os cálculos das propriedades da seção efetiva do perfil são realizados empregando-se o “método linear” isto é, todo o material é admitido como concentrado na linha média da seção (linha esqueleto) e os elementos são tratados – isoladamente - como linhas retas (parte plana) ou curvas (dobras). Os valores assim obtidos são multiplicados pela espessura t , de maneira a obter as propriedades geométricas desejadas.

O teorema do Eixo Paralelo é utilizado para os cálculos do momento de inércia da seção efetiva.

Primeira interação: considerando a alma totalmente efetiva.

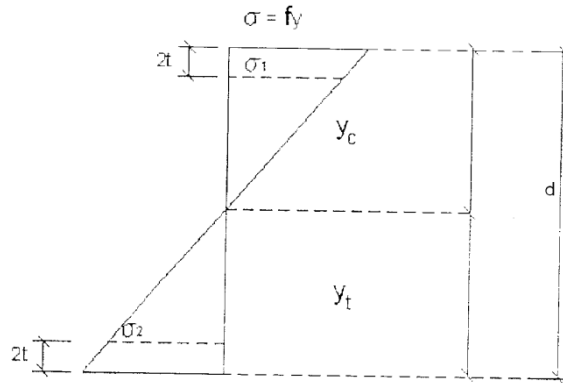
$$b = [300 - 4 \times (2,25 - 0,036)] \div 10 = 29,114cm \text{ (comprimento do elemento)}$$

$$t = (2,25 - 0,036) \div 10 = 0,2214cm \text{ (espessura do elemento)}$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	7,614	0,111	0,843
Canto Superior Esquerdo	0,521	0,231	0,121
Canto Superior Direito	0,521	0,231	0,121
Enrijecedor Superior	1,733	1,309	2,270
Alma	29,114	15,000	436,716
Flange Inferior	7,614	29,888	227,575
Enrijecedor Inferior	2,057	28,529	58,689
Canto Inferior Esquerdo	0,521	29,769	15,521
Canto Inferior Direito	0,521	29,769	15,521
Soma	50,219	-	757,377

$$y_{cg} = \frac{757,377}{50,219} = 15,08cm$$

$$y_t = 30 - 15,08 = 14,92cm$$



$$\sigma_1 = \frac{f_y(y_{cg} - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (15,08 - 2 \times 0,2214)}{15,08} = 22,32 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{f_y(y_t - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (14,92 - 2 \times 0,2214)}{15,08} = -22,08 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-22,08}{22,32} = -0,989 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

Para o cálculo do coeficiente de flambagem local k ver caso "d" da tabela 5 da Norma NBR14762.

$$k = 4 + 2(1 - \psi)^3 + 2(1 - \psi)$$

$$k = 4 + 2(1 + 0,989)^3 + 2(1 + 0,989) = 23,71$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{29,114}{0,2214}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{23,71 \times 20000}{22,32}}\right]} = 0,95$$

Como $\lambda_p \geq 0,673$, poderá ocorrer flambagem local na mesa superior do perfil. Portanto deve ser calculada a largura efetiva deste elemento, b_{ef} , conforme segue:

$$b_{ef} = b_c \frac{1}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \leq b_c$$

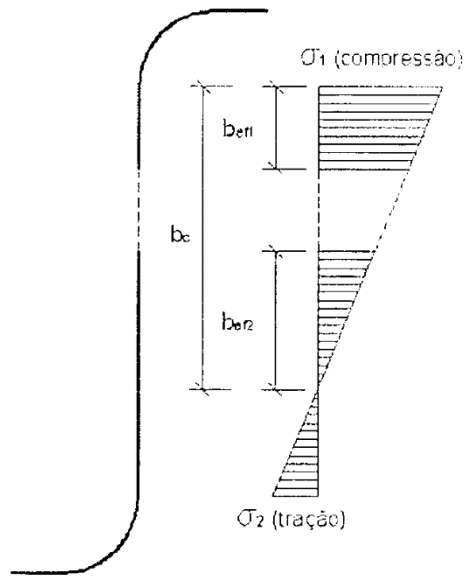
$$b_c = 15,08 - 2 \times 0,2214 = 14,64 \text{ cm}$$

$$b_{ef} = \frac{14,64}{0,95} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,95}\right) = 11,84 \text{ cm} \leq b_c = 14,64 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{b_{ef}}{(3 - \psi)} = \frac{11,84}{(3 + 0,989)} = 2,97 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5b_{ef} = 0,5 \times 11,84 = 5,92 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 2,97 + 5,92 = 8,89 \text{ cm} \leq b_c = 14,64 \text{ cm}$$



Segunda interação: considerando a alma não totalmente efetiva.

A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = (b_{ef1} + b_{ef2}) - b_c = 8,89 - 14,64 = -5,75 \text{ cm}$$

$$y_{inef} = y_{cg} - (b_{ef2} - b_{inef}/2) = 15,08 - (5,92 + 5,75/2) = 6,29 \text{ cm}$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	7,614	0,111	0,843
Canto Superior Esquerdo	0,521	0,231	0,121
Canto Superior Direito	0,521	0,231	0,121
Enrijecedor Superior	1,733	1,309	2,270
Elemento Inefetivo da Alma	-5,75	6,29	-36,168
Alma	29,114	15,000	436,716
Flange Inferior	7,614	29,888	227,575
Enrijecedor Inferior	2,057	28,529	58,689
Canto Inferior Esquerdo	0,521	29,769	15,521
Canto Inferior Direito	0,521	29,769	15,521
Soma	44,47	-	721,25

$$y_{cg} = \frac{721,25}{44,47} = 16,22 \text{ cm}$$

$$y_t = 30 - 16,22 = 13,78 \text{ cm}$$

O eixo neutro mudou de 15,08cm para 16,22cm, resultando em uma diferença de 7,56%. Isto torna necessária a execução de mais interações.

Terceira interação

$$\sigma_1 = \frac{23 \times (16,22 - 2 \times 0,2214)}{16,22} = 22,37 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{23 \times (13,78 - 2 \times 0,2214)}{16,22} = -18,92 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{-18,92}{22,37} = -0,846 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

$$k = 4 + 2(1 + 0,846)^3 + 2(1 + 0,846) = 20,26$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{29,114}{0,2214}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{20,26 \times 20000}{22,37}}\right]} = 1,03$$

Como $\lambda_p \geq 0,673$, poderá ocorrer flambagem local na mesa superior do perfil. Portanto deve ser calculada a largura efetiva deste elemento, b_{ef} , conforme segue:

$$b_c = 16,22 - 2 \times 0,2214 = 15,78 \text{ cm}$$

$$b_{ef} = \frac{15,78}{1,03} \times \left(1 - \frac{0,22}{1,03}\right) = 12,06 \text{ cm} \leq b_c = 15,78 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{12,06}{(3 + 0,846)} = 3,14 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5 \times 12,06 = 6,03 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,14 + 6,03 = 9,17 \text{ cm} \leq b_c = 15,78 \text{ cm}$$

$$b_{inef} = 9,17 - 15,78 = -6,61 \text{ cm}$$

$$y_{inef} = 16,22 - (6,03 + 6,61/2) = 6,88 \text{ cm}$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	7,614	0,111	0,843
Canto Superior Esquerdo	0,521	0,231	0,121
Canto Superior Direito	0,521	0,231	0,121
Enrijecedor Superior	1,733	1,309	2,270
Elemento Inefetivo da Alma	-6,61	6,88	-45,477
Alma	29,114	15,000	436,716
Flange Inferior	7,614	29,888	227,575
Enrijecedor Inferior	2,057	28,529	58,689
Canto Inferior Esquerdo	0,521	29,769	15,521
Canto Inferior Direito	0,521	29,769	15,521
Soma	43,61	-	711,87

$$y_{cg} = \frac{711,87}{43,61} = 16,32 \text{ cm}$$

O eixo neutro mudou de 16,22cm para 16,32cm, resultando em uma diferença de 0,65%. Logo a convergência é obtida ao final dessa interação, obtendo-se:

$$y_{cg} = 16,32 \text{ cm}$$

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)	L.y² (cm³)	I'x (cm³)
Flange Superior	7,614	0,111	0,843	0,093	-
Canto Superior Esquerdo	0,521	0,231	0,121	0,028	0,0002
Canto Superior Direito	0,521	0,231	0,121	0,028	0,0002
Enrijecedor Superior	1,733	1,309	2,270	2,972	0,434
Elemento Inefetivo da Alma	-6,70	16,33	-109,425	-1787,339	-25,055
Alma	29,114	15,000	436,716	6550,740	2056,564
Flange Inferior	7,614	29,888	227,575	6801,659	-
Enrijecedor Inferior	2,057	28,529	58,689	1674,316	0,726
Canto Inferior Esquerdo	0,521	29,769	15,521	462,051	0,0002
Canto Inferior Direito	0,521	29,769	15,521	462,051	0,0002
Soma	43,520	-	647,952	14166,599	2032,670

$$I_{x'} = 4588,236 \text{ cm}^4$$

$$I_x = I_{x'} \times t = 4588,236 \times 0,2214 = 1015,835 \text{ cm}^4$$

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{1015,835}{16,32} = 62,192 \text{ cm}^3$$

Sendo assim, o momento fletor resistente calculado com base no início do escoamento da seção efetiva é:

$$M_{rd} = \frac{W_{eff} f_y}{1,1} = \frac{62,192 \times 23}{1,1} = 1300,4 \text{ kN.cm}$$

▪ Método da Seção Efetiva

Para o cálculo do momento fletor resistente de cálculo com base no início do escoamento, tem-se pelo Método da Seção Efetiva que:

$$t_r = 0,018 \text{ mm}$$

$$b_f = b - 2t_r = 85 - 2 \times 0,018 = 84,964 \text{ mm}$$

$$b_w = d - 2t_r = 300 - 2 \times 0,018 = 299,964 \text{ mm}$$

$$D = c - 2t_r = 25 - 2 \times 0,018 = 24,964 \text{ mm}$$

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{84,964}{299,964} = 0,2832$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{24,964}{299,964} = 0,0832$$

Como $\mu = 0,0832$, não satisfaz a situação $0,1 \leq \mu \leq 0,3$, o método de cálculo "Largura Efetiva" não pode ser aplicado.

15.2.2. Momento Calculado com Base na Flambagem Lateral com Torção (FLT)

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

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

▪ **Método da Largura Efetiva**

Obtido o valor de σ , procedem-se os cálculos de forma análoga a do item anterior, utilizando-se o processo iterativo para a determinação da posição LNe da seção efetiva e das propriedades geométricas correspondentes.

Verificação do Flange Comprimido (Elemento 2)

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

Para perfil duplamente simétrico, tem-se:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 2956,40}{(300)^2} = 6484,11 kN$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 1105,40}{(300)^2} = 2424,41 kN$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left\{ GJ + \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(k_z L_z)^2} \right] \right\} = \frac{1}{13,41^2} \left\{ 7700 \times 2412,10 + \left[\frac{\pi^2 \times 20000 \times 8491,2}{(300)^2} \right] \right\}$$

$$N_{ez} = 103386,47 kN$$

$$C_b = 1,0$$

$$M_e = 1,0 \times 13,41 \times (2424,41 \times 20477,28)^{0,5} = 212250,95 kN.cm$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W_c f_y}{M_e}} = \sqrt{\frac{230,20 \times 23}{195290,54}} = 0,158$$

Como $\lambda_p = 0,158 \leq 0,6$ $\chi_{FLT} = 1,0$. A tensão de compressão relacionada ao momento crítico de flambagem lateral com torção é:

$$\sigma = \chi_{FTL} f_y = 1,0 \times 23 = 23 kN/cm^2$$

Considerando-se esta tensão aplicada ao elemento 2, tem-se:

$$b = [85 - 4 \times (2,65 - 0,036)] \div 10 = 7,454 cm \text{ (comprimento do elemento)}$$

$$t = (2,65 - 0,036) \div 10 = 0,2614 cm \text{ (espessura do elemento)}$$

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right]} = \frac{\frac{7,614}{0,2214}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{20000}{23}} \right]} = 1,87$$

$$\lambda_{po} \geq 0,673$$

Para o enrijecedor (elemento 3) de um perfil Cx, que tem 2 dobras em ângulo reto, a dimensão plana do elemento é dada por:

$$d = (25 \div 10) - 2 \times 0,2214 = 2,057 \text{ cm}$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{2,057^3 \times 0,2214}{12} = 0,1606 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 399 t^4 (0,487 \lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,2214^4 \times (0,487 \times 1,87 - 0,328)^3$$

$$I_a = 0,1897 \text{ cm}^4$$

$$I_a \leq t^4 (56 \lambda_{po} + 5) = 0,2214^4 \times (56 \times 1,87 + 5) = 0,264 \text{ cm}^4$$

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

$$n = (0,582 - 0,122 \times 1,87) = 0,354 \geq 1/3$$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{7,614} = 0,328$$

$$0,25 < \frac{D}{b} \leq 0,8$$

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,1684}{0,1897} = 0,888$$

Cálculo do coeficiente de flambagem local, k:

$$k = (4,82 - 5 D/b)(I_s/I_a)^n + 0,43 \leq 4$$

$$k = (4,82 - 5 \times 0,328)(0,888)^{0,354} + 0,43 = 3,479 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,479$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,614}{0,2214}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{3,479 \times 20000}{23}}\right]} = 0,658$$

Como $\lambda_p \leq 0,673$, não haverá flambagem local, logo:

$$b_{ef} = 7,614 \text{ cm}$$

Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3)

$$d_{ef} = [25 - 2 \times (2,25 - 0,036)] \div 10 = 2,057 \text{ cm}$$

$$t = (2,25 - 0,036) \div 10 = 0,2214 \text{ cm}$$

$k = 0,43$, conforme caso "a" da tabela 6 da norma NBR 14762:2010.

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{2,057}{0,2214}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{23}}\right]} = 0,506$$

Como $\lambda_p < 0,673$, não haverá flambagem local.

$$d_{ef} = 2,057 \text{ cm} \quad (\text{largura efetiva do enrijecedor de borda})$$

$$d_s = \frac{I_s}{I_a} d_{ef} \leq d_{ef} = 2,057 \rightarrow d_s = 0,888 \times 2,057 = 1,827 \text{ cm}$$

$d_s = 1,827cm$ (largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda)

Verificação da Alma (elemento 1)

Primeira interação: considerando a alma totalmente efetiva.

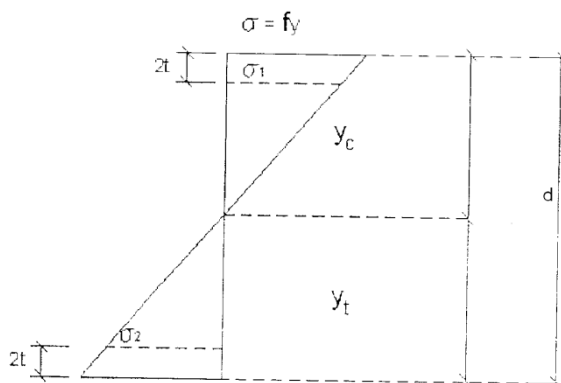
$b = [300 - 4 \times (2,25 - 0,036)] \div 10 = 29,114cm$ (comprimento do elemento)

$t = (2,25 - 0,036) \div 10 = 0,2214cm$ (espessura do elemento)

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	7,614	0,111	0,843
Canto Superior Esquerdo	0,521	0,231	0,121
Canto Superior Direito	0,521	0,231	0,121
Enrijecedor Superior	1,827	1,356	2,478
Alma	29,114	15,000	436,716
Flange Inferior	7,614	29,888	227,575
Enrijecedor Inferior	1,827	28,529	52,122
Canto Inferior Esquerdo	0,521	29,769	15,521
Canto Inferior Direito	0,521	29,769	15,521
Soma	50,083	-	751,018

$$y_{cg} = \frac{751,018}{50,083} = 15cm$$

$$y_t = 30 - 15 = 15cm$$



$$\sigma_1 = \frac{f_y(y_{cg} - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (15,0 - 2 \times 0,2214)}{15,0} = 22,32kN/cm^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{f_y(y_t - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (15 - 2 \times 0,2214)}{15} = -22,32kN/cm^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-22,32}{22,32} = -1,0 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

Para o cálculo do coeficiente de flambagem local k ver caso "d" da tabela 5 da Norma NBR14762.

$$k = 4 + 2(1 - \psi)^3 + 2(1 - \psi)$$

$$k = 4 + 2(1 + 1)^3 + 2(1 + 1) = 24$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{29,114}{0,2214}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{24 \times 20000}{22,32}}\right]} = 0,944$$

Como $\lambda_p \geq 0,673$, poderá ocorrer flambagem local na mesa superior do perfil. Portanto deve ser calculada a largura efetiva deste elemento, b_{ef} , conforme segue:

$$b_{ef} = b_c \frac{1}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \leq b_c$$

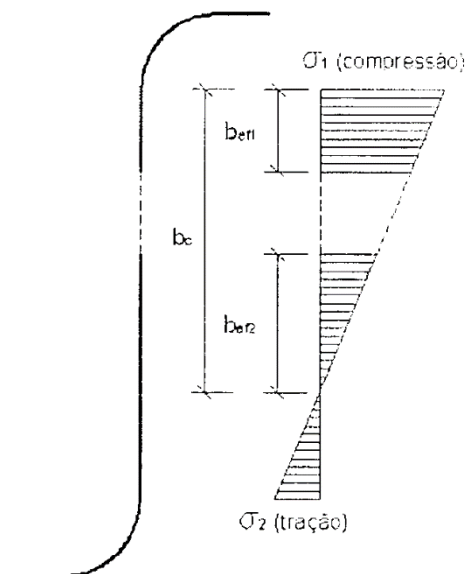
$$b_c = 15,0 - 2 \times 0,2214 = 14,557 \text{ cm}$$

$$b_{ef} = \frac{14,557}{0,944} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,944}\right) = 11,83 \text{ cm} \leq b_c = 14,557 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{b_{ef}}{(3 - \psi)} = \frac{11,83}{(3 + 1)} = 2,96 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5b_{ef} = 0,5 \times 11,83 = 5,915 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 2,96 + 5,915 = 8,875 \text{ cm} \leq b_c = 14,557 \text{ cm}$$



Segunda interação: considerando a alma não totalmente efetiva.

A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = (b_{ef1} + b_{ef2}) - b_c = 8,875 - 14,557 = -5,682 \text{ cm}$$

$$y_{inef} = y_{cg} - (b_{ef2} - b_{inef}/2) = 15 - (5,915 + 5,682/2) = 6,244 \text{ cm}$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	7,614	0,111	0,843
Canto Superior Esquerdo	0,521	0,231	0,121
Canto Superior Direito	0,521	0,231	0,121
Enrijecedor Superior	1,827	1,356	2,478
Elemento Inefetivo da Alma	-5,682	6,244	-35,478
Alma	29,114	15,000	436,716
Flange Inferior	7,614	29,888	227,575
Enrijecedor Inferior	1,827	28,529	52,122
Canto Inferior Esquerdo	0,521	29,769	15,521
Canto Inferior Direito	0,521	29,769	15,521
Soma	44,40	-	715,55

$$y_{cg} = \frac{715,55}{44,40} = 16,12cm$$

$$y_t = 30 - 16,11 = 13,88cm$$

O eixo neutro mudou de 15,00 cm para 16,12cm, resultando em uma diferença de 7,40%. Isto torna necessária a execução de mais interações.

Terceira interação

$$\sigma_1 = \frac{23 \times (16,12 - 2 \times 0,2214)}{16,12} = 22,37kN/cm^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{23 \times (13,88 - 2 \times 0,2214)}{16,12} = -19,18kN/cm^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{-19,18}{22,37} = -0,86 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

$$k = 4 + 2(1 + 0,86)^3 + 2(1 + 0,86) = 20,53$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{29,114}{0,2214}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{20,53 \times 20000}{22,37}}\right]} = 1,02$$

Como $\lambda_p \geq 0,673$, poderá ocorrer flambagem local na mesa superior do perfil. Portanto deve ser calculada a largura efetiva deste elemento, b_{ef} , conforme segue:

$$b_c = 16,12 - 2 \times 0,2214 = 15,68cm$$

$$b_{ef} = \frac{15,68}{1,02} \times \left(1 - \frac{0,22}{1,02}\right) = 12,04cm \leq b_c = 15,68cm$$

$$b_{ef1} = \frac{12,04}{(3 + 0,86)} = 3,12cm$$

$$b_{ef2} = 0,5 \times 12,04 = 6,02cm$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,12 + 6,02 = 9,14cm \leq b_c = 15,68cm$$

$$b_{inef} = 9,14 - 15,68 = -6,54cm$$

$$y_{inef} = 16,12 - (6,02 + 6,54/2) = 6,83cm$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	7,614	0,111	0,843
Canto Superior Esquerdo	0,521	0,231	0,121
Canto Superior Direito	0,521	0,231	0,121
Enrijecedor Superior	1,827	1,356	2,478
Elemento Inefetivo da Alma	-6,54	6,83	-44,62
Alma	29,114	15,000	436,716
Flange Inferior	7,614	29,888	227,575
Enrijecedor Inferior	1,827	28,529	52,122
Canto Inferior Esquerdo	0,521	29,769	15,521
Canto Inferior Direito	0,521	29,769	15,521
Soma	43,55	-	706,39

$$y_{cg} = \frac{706,39}{43,55} = 16,22cm$$

O eixo neutro mudou de 16,12cm para 16,22cm, resultando em uma diferença de 0,62%. Logo a convergência é obtida ao final dessa interação, obtendo-se:

$$y_{cg} = 16,22cm$$

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)	L.y² (cm³)	I'x (cm³)
Flange Superior	7,614	0,111	0,843	0,093	-
Canto Superior Esquerdo	0,521	0,231	0,121	0,028	0,0002
Canto Superior Direito	0,521	0,231	0,121	0,028	0,0002
Enrijecedor Superior	1,827	1,356	2,478	3,361	0,508
Elemento Inefetivo da Alma	-6,62	16,23	-107,446	-1743,872	-24,178
Alma	29,114	15,000	436,716	6550,740	2056,564
Flange Inferior	7,614	29,888	227,575	6801,659	-
Enrijecedor Inferior	1,827	28,529	52,122	1486,961	0,726
Canto Inferior Esquerdo	0,521	29,769	15,521	462,051	0,0002
Canto Inferior Direito	0,521	29,769	15,521	462,051	0,0002
Soma	43,463	-	720,10	14023,10	2033,62

$$I_{x'} = 4607,912cm^4$$

$$I_x = I_{x'} \times t = 4607,912 \times 0,2214 = 1020,192cm^4$$

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{1020,192}{16,22} = 62,858cm^3$$

Sendo assim, o momento fletor resistente calculado com base no início do escoamento da seção efetiva é:

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{1,1} = \frac{62,858 \times 23}{1,1} = 1341,3kN.cm$$

▪ **Método da Seção Efetiva**

Para o cálculo do momento fletor resistente de cálculo com base na flambagem lateral com torção, tem-se pelo Método da Seção Efetiva que:

$$\chi_{FLT} = 1,0 \rightarrow (\text{calculado no item anterior})$$

$$t_r = 0,018\text{mm}$$

$$b_f = b - 2t_r = 85 - 2 \times 0,018 = 84,964\text{mm}$$

$$b_w = d - 2t_r = 300 - 2 \times 0,018 = 299,964\text{mm}$$

$$D = c - 2t_r = 25 - 2 \times 0,018 = 24,964\text{mm}$$

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{84,964}{299,964} = 0,2832$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{24,964}{299,964} = 0,0832$$

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{84,964}{299,964} = 0,2832$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{24,964}{299,964} = 0,0832$$

Com base na tabela 13 (caso "b") da Norma NBR 14762:2010, tem-se para o valor do coeficiente de flambagem local da seção completa k_l em barra sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia que:

$$k_l = 29,75$$

O momento fletor de flambagem local elástica pode ser calculado por:

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

$$M_l = 29,75 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1 - 0,30^2)(29,9964/0,2214)^2} \times 98,5 = 2885,67\text{kN.cm}$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W f_y}{M_l}} = \sqrt{\frac{98,5 \times 23}{2885,67}} = 0,886$$

$$\lambda_p \geq 0,673$$

$$W_{ef} = \frac{W}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) = \frac{98,5}{0,886} \left(1 - \frac{0,22}{0,886}\right) = 83,569\text{cm}^3 \rightarrow \text{Para 1 Ue}$$

$$W_{ef} = 167,137\text{cm}^3 \rightarrow \text{Para seção composta de 2 Ue}$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{167,137 \times 23}{1,1} = 3494,69\text{kN.cm}$$

15.2.3. Verificação da Flambagem por Distorção

Com o objetivo de simplificar o dimensionamento, no item 9.8.2.3 da norma NBR 14762:2010 são apresentadas algumas informações uteis para que seja dispensadas as verificações da flambagem por distorção.

A tabela 14 da referida norma apresenta os valores mínimos da relação D/b_w de seções do tipo U enrijecido e Z enrijecido submetidos à flexão simples em torno do eixo de maior inércia para dispensar a verificação da flambagem por distorção.

Para o perfil em questão tem-se:

$$t_r = 0,018mm$$

$$b_f = 85 - 2 \times 0,018 = 84,964mm$$

$$b_w = 300 - 2 \times 0,018 = 299,964mm$$

$$D = 25 - 2 \times 0,018 = 24,964mm$$

$$t = 2,25 - 2 \times 0,018 = 2,214mm$$

$$b_f/b_w = 84,964/299,964 = 0,283$$

$$b_w/t = 299,964/2,214 = 135,485$$

$$D/b_w = 24,964/299,964 = 0,083$$

Analisando as relações obtidas, pode-se concluir que fica dispensada a verificação da flambagem por distorção, por não corresponder esta ao modo crítico do perfil quando submetido à flexão.

15.2.4. Conclusão

O momento resistente de calculo é o menor dos momentos determinados com base no inicio do escoamento, ou para a flambagem lateral com torção, uma vez que a flambagem por distorção da seção transversal não caracteriza o modo crítico do perfil.

Para a determinação do momento resistente de calculo com base no inicio de escoamento e na flambagem lateral com torção foram utilizados os Métodos da Largura Efetiva e da Seção Efetiva. Neste trabalho serão considerados os valores:

$$M_{Rd} = 1300,4kN.cm(\text{inicio do escoamento}) < M_{Rd} = 1341,3kN.cm(FLT)$$

Logo:

$$M_{Rd} = 1300,4kN.cm$$

15.3. Barra Submetida à Flexão Composta

A força normal solicitante de calculo e o momento fletor solicitante de calculo devem satisfazer a seguinte equação de interação:

$$\frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

Para o pilar central do pórtico, com base na combinação 2 de esforços, tem-se:

$$\begin{aligned} N_{c,Sd} &= 406,42kN \\ M_{x,Sd} &= 0,92kN.m = 92kN.cm \\ M_{y,Sd} &= 0 \\ N_{c,Rd} &= 205,84 \\ M_{x,Rd} &= 1300,4kN.cm \end{aligned}$$

$$\frac{406,42}{205,84} + \frac{92}{1300,4} = 2,05 > 1,0 \rightarrow \text{NAO OK!!!}$$

Para o pilar da extremidade do pórtico, com base na combinação 2 de esforços, tem-se:

$$\begin{aligned} N_{c,Sd} &= 254,16kN \\ M_{x,Sd} &= 2,76kN.m = 276kN.cm \\ M_{y,Sd} &= 0 \\ N_{c,Rd} &= 205,84 \\ M_{x,Rd} &= 1300,4kN.cm \end{aligned}$$

$$\frac{254,16}{205,84} + \frac{276}{1300,4} = 1,45 > 1,0 \rightarrow \text{NAO OK!!!}$$

16. Dimensionamento da Viga do Pórtico



$$\begin{aligned} M_{Sd} &= 8,89kN.m \\ V_{Sd} &= 8,89kN \\ N_{Sd} &= -1,52kN \end{aligned}$$

16.1. Momento com base no início do escoamento da seção efetiva

Neste procedimento o momento fletor resistente de cálculo é determinado com base na resistência ao escoamento do aço, f_y , e no módulo resistente elástico da seção efetiva, W_{ef} , quando uma fibra extrema tracionada ou uma comprimida, ou ambas, atingem f_y .

- **Método da Largura Efetiva**

Verificação do flange comprimido (elemento 2)

$$b = [85 - 4 \times (2,65 - 0,036)] \div 10 = 7,454cm \text{ (comprimento do elemento)}$$

$$t = (2,65 - 0,036) \div 10 = 0,2614 \text{ cm (espessura do elemento)}$$

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623\sqrt{\frac{E}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,454}{0,2614}}{\left[0,623\sqrt{\frac{20000}{23}}\right]} = 1,552$$

$$\lambda_{po} \geq 0,673$$

Para o enrijecedor (elemento 3) de um perfil Cx, que tem 2 dobras em ângulo reto, a dimensão plana do elemento é dada por:

$$d = (25 \div 10) - 2 \times 0,2614 = 1,977 \text{ cm}$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{1,977^3 \times 0,2614}{12} = 0,1684 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 399t^4(0,487\lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,2614^4 \times (0,487 \times 1,552 - 0,328)^3$$

$$I_a = 0,1459 \text{ cm}^4$$

$$I_a \leq t^4(56\lambda_{po} + 5) = 0,2614^4 \times (56 \times 1,552 + 5) = 0,429 \text{ cm}^4$$

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

$$n = (0,582 - 0,122 \times 1,552) = 0,393 \geq 1/3$$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{7,454} = 0,335$$

$$0,25 < \frac{D}{b} \leq 0,8$$

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,1684}{0,1459} = 1,154 \geq 1,0 \rightarrow \frac{I_s}{I_a} = 1,0$$

Cálculo do coeficiente de flambagem local, k:

$$k = (4,82 - 5 D/b)(I_s/I_a)^n + 0,43 \leq 4$$

$$k = (4,82 - 5 \times 0,335)(1,0)^{0,393} + 0,43 = 3,575 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,575$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95\sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,454}{0,2614}}{\left[0,95\sqrt{\frac{3,575 \times 20000}{23}}\right]} = 0,538$$

Como $\lambda_p \leq 0,673$, não haverá flambagem local, logo:

$$b_{ef} = 7,454 \text{ cm}$$

Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3)

$$d_{ef} = [25 - 2 \times (2,65 - 0,036)] \div 10 = 1,977 \text{ cm}$$

$$t = (2,65 - 0,036) \div 10 = 0,2614 \text{ cm}$$

$k = 0,43$, conforme caso "a" da tabela 6 da norma NBR 14762:2010.

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95\sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{1,977}{0,2614}}{\left[0,95\sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{23}}\right]} = 0,412$$

Como $\lambda_p < 0,673$, não haverá flambagem local.

$$d_{ef} = 1,977\text{cm} \text{ (largura efetiva do enrijecedor de borda)}$$

$$d_{ef} = d_s = 1,977 \text{ (largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda)}$$

Verificação da Alma (elemento 1)

Primeira interação: considerando a alma totalmente efetiva.

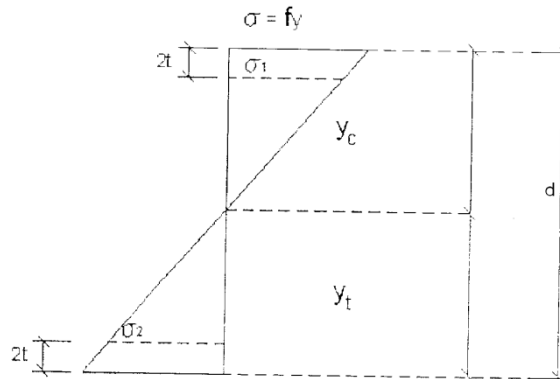
$$b = [300 - 4 \times (2,65 - 0,036)] \div 10 = 28,954\text{cm} \text{ (comprimento do elemento)}$$

$$t = (2,65 - 0,036) \div 10 = 0,2614\text{cm} \text{ (espessura do elemento)}$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	7,454	0,131	0,974
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168
Enrijecedor Superior	1,977	1,511	2,988
Alma	28,954	15,000	434,316
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300
Soma	50,280	-	754,186

$$y_{cg} = \frac{754,186}{50,280} = 15\text{cm}$$

$$y_t = 30 - 15 = 15\text{cm}$$



$$\sigma_1 = \frac{f_y(y_{cg} - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (15,0 - 2 \times 0,2614)}{15,0} = 22,20\text{kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{f_y(y_t - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (15 - 2 \times 0,2614)}{15} = -20,20\text{kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-20,20}{20,20} = -1,0 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

Para o cálculo do coeficiente de flambagem local k ver caso "d" da tabela 5 da Norma NBR14762.

$$k = 4 + 2(1 - \psi)^3 + 2(1 - \psi)$$

$$k = 4 + 2(1 + 1)^3 + 2(1 + 1) = 24$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{\bar{t}}}{\left[0,95\sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{28,954}{0,2614}}{\left[0,95\sqrt{\frac{24 \times 20000}{20,20}}\right]} = 0,76$$

Como $\lambda_p \geq 0,673$, poderá ocorrer flambagem local na mesa superior do perfil. Portanto deve ser calculada a largura efetiva deste elemento, b_{ef} , conforme segue:

$$b_{ef} = b_c \frac{1}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \leq b_c$$

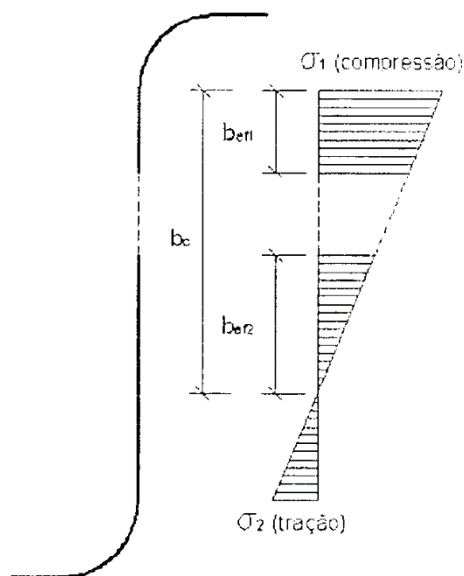
$$b_c = 15,0 - 2 \times 0,2614 = 14,477 \text{ cm}$$

$$b_{ef} = \frac{14,477}{0,76} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,76}\right) = 13,53 \text{ cm} \leq b_c = 14,477 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{b_{ef}}{(3 - \psi)} = \frac{13,53}{(3 + 1)} = 3,38 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5b_{ef} = 0,5 \times 13,53 = 6,765 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,38 + 6,765 = 10,149 \text{ cm} \leq b_c = 14,477 \text{ cm}$$



Segunda interação: considerando a alma não totalmente efetiva.

A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = (b_{ef1} + b_{ef2}) - b_c = 10,149 - 14,94 = -4,33 \text{ cm}$$

$$y_{inef} = y_{cg} - (b_{ef2} - b_{inef}/2) = 15 - (6,765 + 4,33/2) = 6,07 \text{ cm}$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	7,454	0,131	0,974
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168
Enrijecedor Superior	1,977	1,511	2,988
Elemento Inefetivo da Alma	-4,33	6,07	-26,28
Alma	28,954	15,000	434,316
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300
Soma	45,70	-	726,18

$$y_{cg} = \frac{726,18}{45,70} = 15,89cm$$

$$y_t = 30 - 15,89 = 14,11cm$$

O eixo neutro mudou de 15,46cm para 16,77cm, resultando em uma diferença de 5,94%. Isto torna necessária a execução de mais interações.

Terceira interação

$$\sigma_1 = \frac{23 \times (15,89 - 2 \times 0,2614)}{15,89} = 22,24kN/cm^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{23 \times (14,11 - 2 \times 0,2614)}{15,89} = -19,67kN/cm^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{-19,67}{22,24} = -0,88 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

$$k = 4 + 2(1 + 0,88)^3 + 2(1 + 0,88) = 21,05$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{28,954}{0,2614}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{21,05 \times 20000}{22,24}}\right]} = 0,847$$

Como $\lambda_p \geq 0,673$, poderá ocorrer flambagem local na mesa superior do perfil. Portanto deve ser calculada a largura efetiva deste elemento, b_{ef} , conforme segue:

$$b_c = 15,89 - 2 \times 0,2614 = 15,37cm$$

$$b_{ef} = \frac{15,37}{0,847} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,847}\right) = 13,43cm \leq b_c = 15,37cm$$

$$b_{ef1} = \frac{13,43}{(3 + 0,88)} = 3,46cm$$

$$b_{ef2} = 0,5 \times 13,43 = 6,715cm$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,46 + 6,715 = 10,175cm \leq b_c = 15,37cm$$

$$b_{inef} = 10,175 - 15,37 = -5,195cm$$

$$y_{inef} = 15,89 - (6,715 + 5,195/2) = 6,58cm$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	6,971	0,131	0,911
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168
Enrijecedor Superior	0,809	0,927	0,750
Elemento Inefetivo da Alma	-5,195	6,58	-34,18
Alma	28,954	15,000	434,316
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300
Soma	45,10	-	720,10

$$y_{cg} = \frac{720,10}{45,10} = 15,97cm$$

O eixo neutro mudou de 15,89cm para 15,97cm, resultando em uma diferença de 0,503%. Logo a convergência é obtida ao final dessa interação, obtendo-se:

$$y_{cg} = 15,97cm$$

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)	L.y² (cm³)	I'x (cm³)
Flange Superior	6,971	0,131	0,911	0,119	-
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168	0,046	0,0090
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168	0,046	0,0090
Enrijecedor Superior	0,809	0,927	0,750	0,695	0,0441
Elemento Inefetivo da Alma	-5,18	7,29	-53,25	-388,193	-32,5515
Alma	28,954	15,000	434,316	6514,740	2022,7605
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644	6649,931	-
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328	1604,728	0,6439
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300	544,004	0,0090
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300	544,004	0,0090
Soma	45,096	-	720,10	15637,808	2012,561

$$I_{x'} = \Sigma Ly^2 + \Sigma I'_x - [(y_{cg})^2 \Sigma L] = 15637,808 + 2012,561 - [(15,97^2) \times 45,096]$$

$$I_{x'} = 6151,889cm^4$$

$$I_x = I_{x'} \times t = 6151,889 \times 0,2614 = 1608,10cm^4$$

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{1608,10}{15,97} = 100,708cm^3$$

Sendo assim, o momento fletor resistente calculado com base no início do escoamento da seção efetiva é:

$$M_{rd} = \frac{W_{eff} f_y}{1,1} = \frac{100,708 \times 23}{1,1} = 2105,700 \text{ kN.cm}$$

▪ Método da Seção Efetiva

Para o cálculo do momento fletor resistente de cálculo com base no início do escoamento, tem-se pelo Método da Seção Efetiva que:

$$t_r = 0,018 \text{ mm}$$

$$b_f = b - 2t_r = 85 - 2 \times 0,018 = 84,964 \text{ mm}$$

$$b_w = d - 2t_r = 300 - 2 \times 0,018 = 299,964 \text{ mm}$$

$$D = c - 2t_r = 25 - 2 \times 0,018 = 24,964 \text{ mm}$$

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{84,964}{299,964} = 0,2832$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{24,964}{299,964} = 0,0832$$

Com base na tabela 13 (caso "b") da Norma NBR 14762:2010, tem-se para o valor do coeficiente de flambagem local da seção completa k_l em barra sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia que:

$$k_l = 29,75$$

O momento fletor de flambagem local elástica pode ser calculado por:

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

$$M_l = 29,75 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1 - 0,30^2)(29,9964/0,2614)^2} \times 115,10 = 4700,85 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W f_y}{M_l}} = \sqrt{\frac{115,10 \times 23}{4700,85}} = 0,750$$

$$\lambda_p \geq 0,673$$

$$W_{ef} = \frac{W}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) = \frac{115,10}{0,750} \left(1 - \frac{0,22}{0,750}\right) = 108,39 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Para 1 Ue}$$

$$W_{ef} = 216,77 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Para seção composta de 2 Ue}$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{216,77 \times 23}{1,1} = 4533,5 \text{ kN.cm}$$

16.2. Momento calculado com base na flambagem lateral com torção (FLT)

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

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

▪ **Método da Largura Efetiva**

Obtido o valor de σ , procedem-se os cálculos de forma análoga a do item anterior, utilizando-se o processo iterativo para a determinação da posição LNe da seção efetiva e das propriedades geométricas correspondentes.

Verificação do Flange Comprimido (Elemento 2)

Para perfil duplamente simétrico, tem-se:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 3454}{(442,5)^2} = 3481,97kN$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 5480,77}{(442,5)^2} = 5525,16kN$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left\{ GJ + \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(k_z L_z)^2} \right] \right\} = \frac{1}{18,36^2} \left\{ 7700 \times 895,15 + \left[\frac{\pi^2 \times 20000 \times 9943,2}{(442,5)^2} \right] \right\}$$

$$N_{ez} = 20477,28kN$$

$$C_b = 1,0$$

$$M_e = 1,0 \times 18,36 \times (5525,16 \times 20477,28)^{0,5} = 195290,54kN.cm$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W_c f_y}{M_e}} = \sqrt{\frac{230,20 \times 23}{195290,54}} = 0,165$$

Como $\lambda_p = 0,165 \leq 0,6$ $\chi_{FLT} = 1,0$. A tensão de compressão relacionada ao momento crítico de flambagem lateral com torção é:

$$\sigma = \chi_{FTL} f_y = 1,0 \times 23 = 23kN/cm^2$$

Considerando-se esta tensão aplicada ao elemento 2, tem-se:

$$b = [85 - 4 \times (2,65 - 0,036)] \div 10 = 7,454cm \text{ (comprimento do elemento)}$$

$$t = (2,65 - 0,036) \div 10 = 0,2614cm \text{ (espessura do elemento)}$$

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right]} = \frac{\frac{7,454}{0,2614}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{20000}{23}} \right]} = 1,552$$

$$\lambda_{po} \geq 0,673$$

Para o enrijecedor (elemento 3) de um perfil Cx, que tem 2 dobras em ângulo reto, a dimensão plana do elemento é dada por:

$$d = (25 \div 10) - 2 \times 0,2614 = 1,977 \text{ cm}$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{1,977^3 \times 0,2614}{12} = 0,1684 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 399 t^4 (0,487 \lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,2614^4 \times (0,487 \times 1,552 - 0,328)^3$$

$$I_a = 0,1459 \text{ cm}^4$$

$$I_a \leq t^4 (56 \lambda_{po} + 5) = 0,2614^4 \times (56 \times 1,552 + 5) = 0,429 \text{ cm}^4$$

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

$$n = (0,582 - 0,122 \times 1,552) = 0,393 \geq 1/3$$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{7,454} = 0,335$$

$$0,25 < \frac{D}{b} \leq 0,8$$

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,1684}{0,1459} = 1,154 \geq 1,0 \rightarrow \frac{I_s}{I_a} = 1,0$$

Cálculo do coeficiente de flambagem local, k:

$$k = (4,82 - 5 D/b)(I_s/I_a)^n + 0,43 \leq 4$$

$$k = (4,82 - 5 \times 0,335)(1,0)^{0,393} + 0,43 = 3,575 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,575$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,454}{0,2614}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{3,575 \times 20000}{23}}\right]} = 0,538$$

Como $\lambda_p \leq 0,673$, não haverá flambagem local, logo:

$$b_{ef} = 7,454 \text{ cm}$$

Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3)

$$d_{ef} = [25 - 2 \times (2,65 - 0,036)] \div 10 = 1,977 \text{ cm}$$

$$t = (2,65 - 0,036) \div 10 = 0,2614 \text{ cm}$$

$k = 0,43$, conforme caso "a" da tabela 6 da norma NBR 14762:2010.

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{1,977}{0,2614}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{23}}\right]} = 0,412$$

Como $\lambda_p < 0,673$, não haverá flambagem local.

$$d_{ef} = 1,977 \text{ cm} \quad (\text{largura efetiva do enrijecedor de borda})$$

$$d_{ef} = d_s = 1,977 \quad (\text{largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda})$$

Verificação da Alma (elemento 1)

Primeira interação: considerando a alma totalmente efetiva.

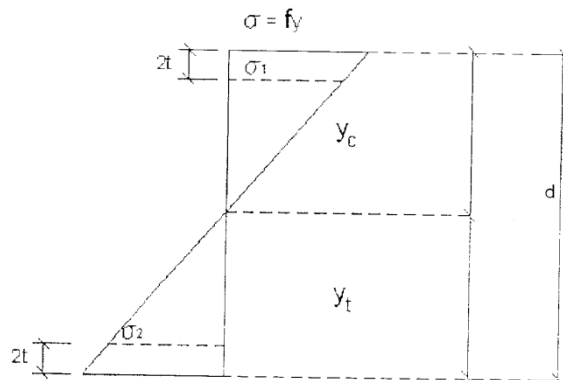
$$b = [300 - 4 \times (2,65 - 0,036)] \div 10 = 28,954 \text{ cm (comprimento do elemento)}$$

$$t = (2,65 - 0,036) \div 10 = 0,2614 \text{ cm (espessura do elemento)}$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	7,454	0,131	0,974
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168
Enrijecedor Superior	1,977	1,511	2,988
Alma	28,954	15,000	434,316
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300
Soma	50,280	-	754,186

$$y_{cg} = \frac{754,186}{50,280} = 15 \text{ cm}$$

$$y_t = 30 - 15 = 15 \text{ cm}$$



$$\sigma_1 = \frac{f_y(y_{cg} - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (15,0 - 2 \times 0,2614)}{15,0} = 22,20 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{f_y(y_t - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (15 - 2 \times 0,2614)}{15} = -20,20 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-20,20}{20,20} = -1,0 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

Para o cálculo do coeficiente de flambagem local k ver caso "d" da tabela 5 da Norma NBR14762.

$$k = 4 + 2(1 - \psi)^3 + 2(1 + \psi)$$

$$k = 4 + 2(1 + 1)^3 + 2(1 + 1) = 24$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{28,954}{0,2614}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{24 \times 20000}{20,20}}\right]} = 0,76$$

Como $\lambda_p \geq 0,673$, poderá ocorrer flambagem local na mesa superior do perfil. Portanto deve ser calculada a largura efetiva deste elemento, b_{ef} , conforme segue:

$$b_{ef} = b_c \frac{1}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \leq b_c$$

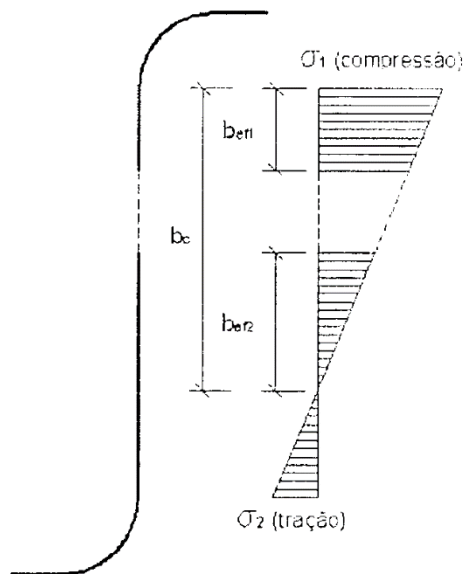
$$b_c = 15,0 - 2 \times 0,2614 = 14,477 \text{ cm}$$

$$b_{ef} = \frac{14,477}{0,76} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,76}\right) = 13,53 \text{ cm} \leq b_c = 14,477 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{b_{ef}}{(3 - \psi)} = \frac{13,53}{(3 + 1)} = 3,38 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5 b_{ef} = 0,5 \times 13,53 = 6,765 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,38 + 6,765 = 10,149 \text{ cm} \leq b_c = 14,477 \text{ cm}$$



Segunda interação: considerando a alma não totalmente efetiva.

A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = (b_{ef1} + b_{ef2}) - b_c = 10,149 - 14,94 = -4,33 \text{ cm}$$

$$y_{inef} = y_{cg} - (b_{ef2} - b_{inef}/2) = 15 - (6,765 + 4,33/2) = 6,07 \text{ cm}$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	6,971	0,131	0,911
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168
Enrijecedor Superior	0,809	0,927	0,750
Elemento Inefetivo da Alma	-4,33	6,07	-26,28
Alma	28,954	15,000	434,316
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300
Soma	45,70	-	726,18

$$y_{cg} = \frac{726,18}{45,70} = 15,89cm$$

$$y_t = 30 - 15,89 = 14,11cm$$

O eixo neutro mudou de 15,46cm para 16,77cm, resultando em uma diferença de 5,94%. Isto torna necessária a execução de mais interações.

❖ Terceira interação

$$\sigma_1 = \frac{23 \times (15,89 - 2 \times 0,2614)}{15,89} = 22,24kN/cm^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{23 \times (14,11 - 2 \times 0,2614)}{15,89} = -19,67kN/cm^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{-19,67}{22,24} = -0,88 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

$$k = 4 + 2(1 + 0,88)^3 + 2(1 + 0,88) = 21,05$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{\bar{t}}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{28,954}{0,2614}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{21,05 \times 20000}{22,24}}\right]} = 0,847$$

Como $\lambda_p \geq 0,673$, poderá ocorrer flambagem local na mesa superior do perfil. Portanto deve ser calculada a largura efetiva deste elemento, b_{ef} , conforme segue:

$$b_c = 15,89 - 2 \times 0,2614 = 15,37cm$$

$$b_{ef} = \frac{15,37}{0,847} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,847}\right) = 13,43cm \leq b_c = 15,37cm$$

$$b_{ef1} = \frac{13,43}{(3 + 0,88)} = 3,46cm$$

$$b_{ef2} = 0,5 \times 13,43 = 6,715cm$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,46 + 6,715 = 10,175cm \leq b_c = 15,37cm$$

$$b_{inef} = 10,175 - 15,37 = -5,195cm$$

$$y_{inef} = 15,89 - (6,715 + 5,195/2) = 6,58cm$$

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)
Flange Superior	6,971	0,131	0,911
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168
Enrijecedor Superior	0,809	0,927	0,750
Elemento Inefetivo da Alma	-5,195	6,58	-34,18
Alma	28,954	15,000	434,316
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300
Soma	45,10	-	720,10

$$y_{cg} = \frac{720,10}{45,10} = 15,97cm$$

O eixo neutro mudou de 15,89cm para 15,97cm, resultando em uma diferença de 0,503%. Logo a convergência é obtida ao final dessa interação, obtendo-se:

$$y_{cg} = 15,97cm$$

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

Elementos Fixos	L (cm)	y (cm)	L.y (cm²)	L.y² (cm³)	I'x (cm³)
Flange Superior	6,971	0,131	0,911	0,119	-
Canto Superior Esquerdo	0,616	0,273	0,168	0,046	0,0090
Canto Superior Direito	0,616	0,273	0,168	0,046	0,0090
Enrijecedor Superior	0,809	0,927	0,750	0,695	0,0441
Elemento Inefetivo da Alma	-5,18	7,29	-53,25	-388,193	-32,5515
Alma	28,954	15,000	434,316	6514,740	2022,7605
Flange Inferior	7,454	29,868	222,644	6649,931	-
Enrijecedor Inferior	1,977	28,489	56,328	1604,728	0,6439
Canto Inferior Esquerdo	0,616	29,727	18,300	544,004	0,0090
Canto Inferior Direito	0,616	29,727	18,300	544,004	0,0090
Soma	45,096	-	720,10	15637,808	2012,561

$$I_{x'} = \Sigma Ly^2 + \Sigma I'_x - [(y_{cg})^2 \Sigma L] = 15637,808 + 2012,561 - [(15,97^2) \times 45,096]$$

$$I_{x'} = 6151,889cm^4$$

$$I_x = I_{x'} \times t = 6151,889 \times 0,2614 = 1608,10cm^4$$

$I_{x'}$ é o momento de inércia da seção efetiva do perfil considerando-se o método linear.

I_x é o momento de inércia da seção efetiva do perfil.

O módulo de resistência elástico da seção em relação à fibra comprimida é calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme segue:

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{1608,10}{15,97} = 100,708 \text{ cm}^3$$

Sendo assim, o momento fletor resistente calculado com base no início do escoamento da seção efetiva é:

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{1,1} = \frac{100,708 \times 23}{1,1} = 2105,700 \text{ kN.cm}$$

▪ Método da Seção Efetiva

Para o cálculo do momento fletor resistente de cálculo com base na flambagem lateral com torção, tem-se pelo Método da Seção Efetiva que:

$$\begin{aligned} \chi_{FLT} &= 1,0 \rightarrow (\text{calculado no item anterior}) \\ t_r &= 0,018 \text{ mm} \\ b_f &= b - 2t_r = 85 - 2 \times 0,018 = 84,964 \text{ mm} \\ b_w &= d - 2t_r = 300 - 2 \times 0,018 = 299,964 \text{ mm} \\ D &= c - 2t_r = 25 - 2 \times 0,018 = 24,964 \text{ mm} \\ \eta &= \frac{b_f}{b_w} = \frac{84,964}{299,964} = 0,2832 \\ \mu &= \frac{D}{b_w} = \frac{24,964}{299,964} = 0,0832 \end{aligned}$$

Com base na tabela 13 (caso "b") da Norma NBR 14762:2010, tem-se para o valor do coeficiente de flambagem local da seção completa k_l em barra sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia que:

$$k_l = 29,75$$

O momento fletor de flambagem local elástica pode ser calculado por:

$$\begin{aligned} M_l &= k_l \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) (b_w/t)^2} W_c \\ M_l &= 29,75 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1 - 0,30^2)(29,9964/0,2614)^2} \times 115,10 = 4700,85 \text{ kN.cm} \\ \lambda_p &= \sqrt{\frac{W f_y}{M_l}} = \sqrt{\frac{115,10 \times 23}{4700,85}} = 0,750 \end{aligned}$$

$$\lambda_p \geq 0,673$$

$$\begin{aligned} W_{ef} &= \frac{W}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) = \frac{115,10}{0,750} \left(1 - \frac{0,22}{0,750}\right) = 108,39 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Para 1 Ue} \\ W_{ef} &= 216,77 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Para seção composta de 2 Ue} \end{aligned}$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{216,77 \times 23}{1,1} = 4533,5 \text{ kN.cm}$$

16.3. Momento calculado para a flambagem por distorção da seção transversal

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

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

O cálculo do momento fletor de flambagem distorcional será feito através do programa gratuito, baseado no Método das faixas Finitas, CUFSM 3.12 e corresponde o mesmo já mostrado no cálculo da viga biapoiada. Portanto o momento é o mesmo:

$$M_{dist} = 5277,4 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{230,20 \times 23}{5277,4}} = 1,002 \rightarrow \lambda_{dist} > 0,673$$

$$\chi_{dist} = \left(1 - \frac{0,22}{1,002}\right) \frac{1}{1,002} = 0,779$$

$$M_{Rd} = \frac{0,779 \times 230,30 \times 23}{1,10} = 3750,60 \text{ kN.cm}$$

16.4. Conclusão

O momento resistente de cálculo é o menor dos momentos determinados com base no início do escoamento, na flambagem lateral com torção e na flambagem por distorção da seção transversal.

Para a determinação do momento de cálculo com base no início do escoamento e na flambagem lateral com torção foram utilizados o Método da Largura Efetiva e o Método da Seção Efetiva. A ABNT NBR 14672:2010 permite a adoção de qualquer um destes dois métodos. Neste trabalho serão considerados os seguintes valores:

$$M_{Rd} = 2105,700 \text{ kN.cm} \rightarrow (\text{MLE para Início do Escoamento e FLT})$$

Para a flambagem distorcional da seção obteve-se:

$$M_{Rd} = 3750,60 \text{ kN.cm}$$

Logo o momento resistente de cálculo será:

$$M_{Rd} = 2105,700 \text{ kN.cm}$$

Como o momento solicitante de cálculo é menor do que o momento resistente de cálculo ($M_{Sd} = 422kN.cm < M_{Rd} = 2105,700kN.cm$) o perfil está apto a ser utilizado nesta viga.

17. Conclusão Final

No presente trabalho, foram dimensionados apenas alguns itens do prédio, visto que os demais são apenas repetições dos processos aqui apresentados. Com base em todos os métodos e normas aqui mostradas é possível dimensionar e verificar qual estrutura em perfil formado a frio.

O perfil adotado para dimensionar as vigas (Cx300x85x25x2,65), após todos os cálculos apresentados, foi considerado um bom perfil para o projeto.

Já o perfil adotado para dimensionar os pilares (Cx300x85x25x2,25) não passou quando verificado a flexão composta, pois a força normal de compressão solicitante de cálculo é bem maior do que a resistente. Dessa forma, para um melhor dimensionamento dos pilares é recomendado a escolha de outro perfil que atenda melhor os esforços solicitantes.