



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia



Especialização em Estruturas

TRABALHO FINAL

CÁLCULO DE UM EDIFÍCIO DE PEQUENO PORTE ESTRUTURADO EM AÇO COM PERFIS FORMADOS A FRIO

Professor: Dr. Francisco Carlos Rodrigues
Aluno: Ibrahim Abdallah Daura Neto

IBRAHIM ABDALLAH DAURA NETO

TRABALHO PRÁTICO:
EDIFÍCIOS DE PEQUENO PORTE
ESTRUTURADOS EM AÇO

Trabalho apresentado à disciplina: Projeto de Estruturas de Aço com Perfis Estruturais Formados a Frio, do Curso de Especialização em Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Professor: Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues

Belo Horizonte
Janeiro de 2013

SUMÁRIO

Sumário	3
1. INTRODUÇÃO	4
2. OBJETIVO	4
3. PROGRAMAS UTILIZADOS	4
4. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO	5
4.1. Características do Edifício	5
4.2. Sistema Estrutural	6
4.2.1. <i>Plano das Vigas e Terças</i>	7
4.2.2. <i>Elevações</i>	8
4.2.3. <i>Isométrica</i>	10
4.3. Materiais	10
4.3.1. <i>Estrutura</i>	10
4.3.2. <i>Complementares</i>	10
4.4. Ações	11
4.4.1. <i>Distribuição dos Carregamentos</i>	11
4.4.2. <i>Cargas Devido ao Vento (CV) – NBR 6123</i>	17
4.4.3. <i>Força Nocial</i>	20
4.5. Combinações de Cargas	22
4.6. Critério de Redução das Cargas Acidentais	22
4.7. Vibração	22
4.8. Deslocamento Máximo	22
5. ESFORÇOS SOLICITANTES DA ESTRUTURA	24
5.1. Viga V2CX da Elevação 13500	24
5.2. Viga V2C da Elevação 12000	25
5.3. Viga V2AM da Elevação 3000 a 9000	26
5.4. Pórtico	27
5.4.1. <i>Vigas do pórtico</i>	29
5.4.2. <i>Pilares do pórtico</i>	29
6. DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DA ESTRUTURA	30
6.1. Calculo dos esforços resistentes das vigas	30
6.1.1. <i>Momento com base no início do escoamento da seção efetiva</i>	30
6.1.2. <i>Momento com base na flambagem lateral com torção (FLT)</i>	37
6.1.3. <i>Momento com base na flambagem por distorção da seção transversal</i>	44
6.2. Calculo dos esforços resistentes dos pilares - Compressão	46
6.2.1. <i>Força normal com base na flambagem por flexão, torção ou flexo-torção</i>	46
6.3. Calculo dos esforços resistentes dos pilares - Flexão	50
6.3.1. <i>Momento com base no início do escoamento da seção efetiva</i>	50
6.3.2. <i>Momento com base na flambagem lateral com torção (FLT)</i>	55
7. CONCLUSÃO	56
Referências Bibliográficas	58

1. INTRODUÇÃO

Os perfis de aço formados a frio representam uma alternativa eficaz e econômica na construção civil, e seu uso está em processo crescente no Brasil. A utilização destes perfis pode ser feita em galpões em geral, edifícios residenciais, como elementos estruturais principais, em vigas e pilares de pórticos, em sistemas “steel frames” e sistemas de vedação de edifícios em geral, com função estrutural ou não.

Em comparação com perfis laminados e soldados, os perfis formados a frio apresentam geralmente menor custo, principalmente devido à maior leveza da estrutura e ao menor custo de fabricação e montagem. Além disso, os perfis formados a frio apresentam a vantagem quanto à escolha da seção transversal, que pode assumir as mais variadas formas geométricas, com fabricação mais simplificada quando comparada à relativa aos perfis soldados e laminados.

2. OBJETIVO

Este trabalho propõe a realização do cálculo de um edifício de pequeno porte com a utilização de perfis formados a frio. O edifício em questão foi escolhido do Manual de Construção em Aço – Edifícios de Pequeno Porte Estruturados em Aço, do Instituto Aço Brasil. Assim, os perfis soldados e laminados do manual serão substituídos por perfis formados a frio, para que possamos ter uma conclusão sobre o uso destes perfis em edifícios semelhantes.

3. PROGRAMAS UTILIZADOS

CUFSM;

SAP 2000, Versão 14;

Microsoft Excel.

4. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

4.1. Características do Edifício

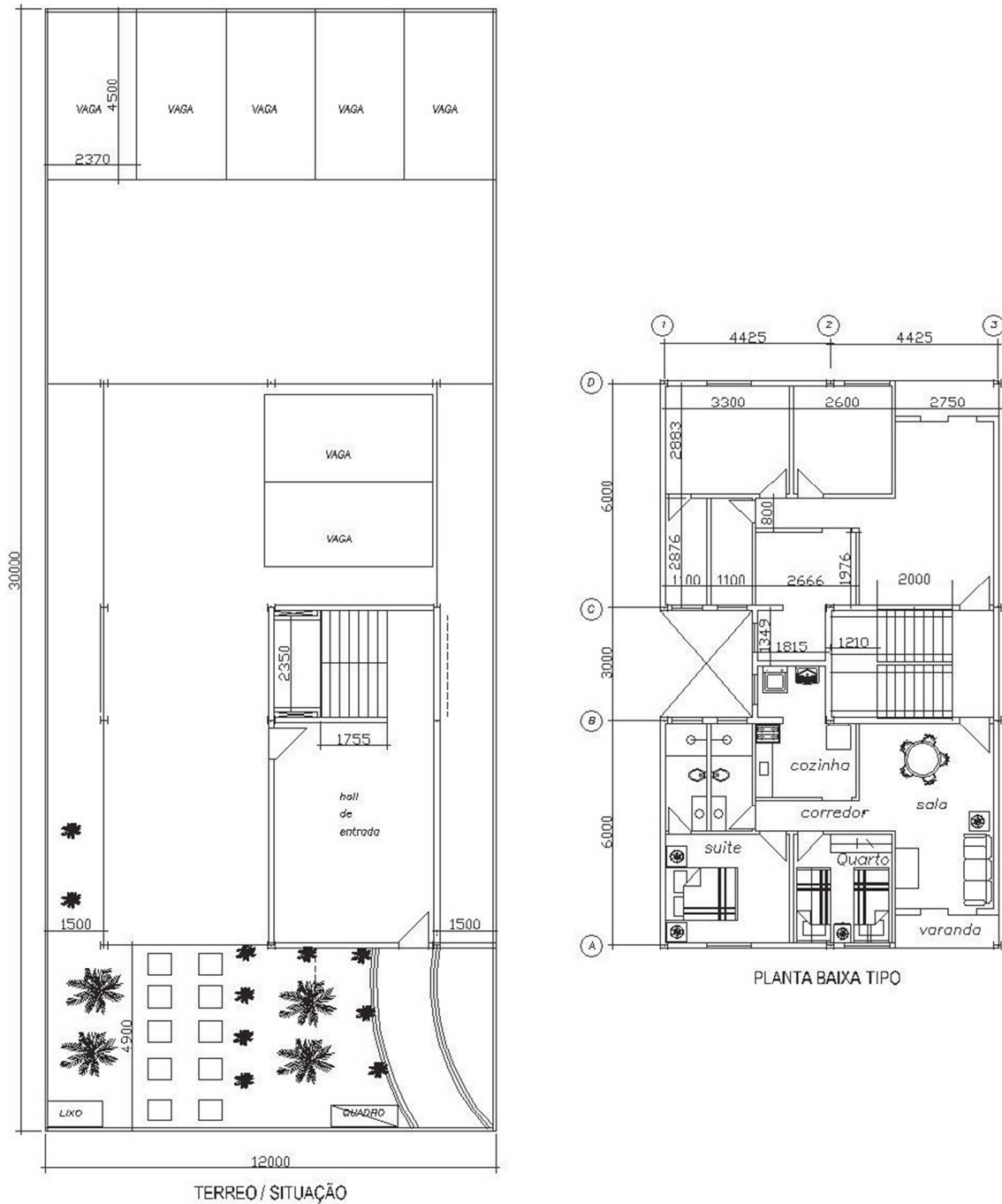


Figura 4. 1 – Planta Situação e Planta Pavimento Tipo

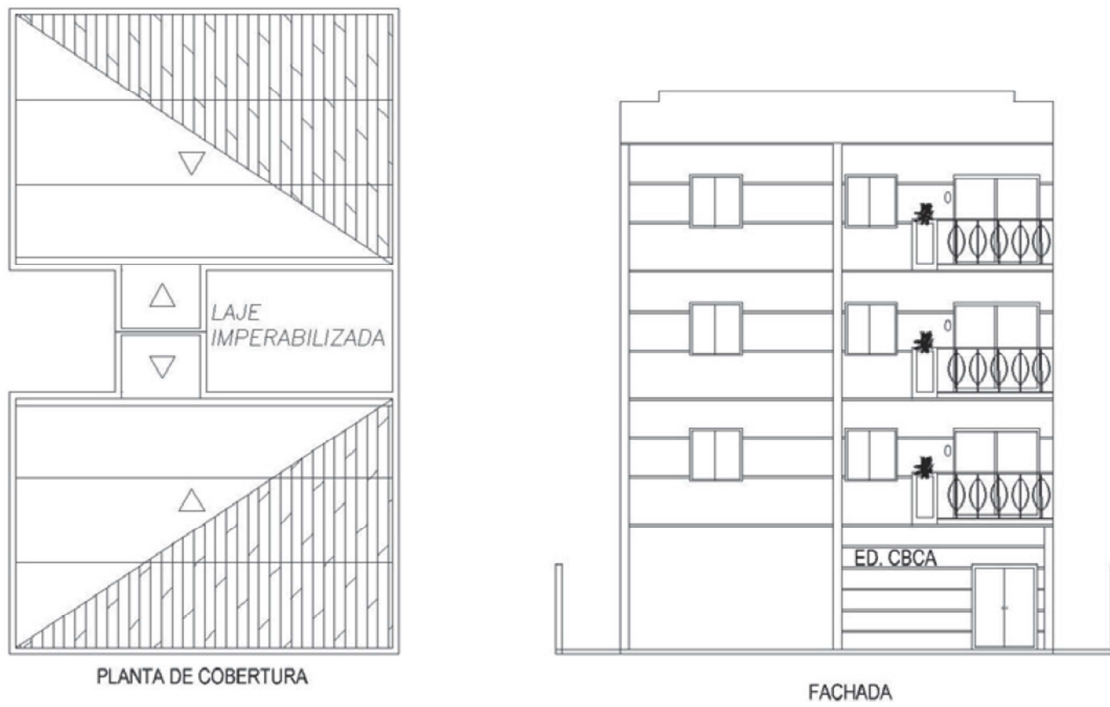


Figura 4. 2 – Plantas Cobertura e Fachada

Tabela 1 – Dados Gerais do Edifício

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

4.2. Sistema Estrutural

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

4.2.1. Plano das Vigas e Terças

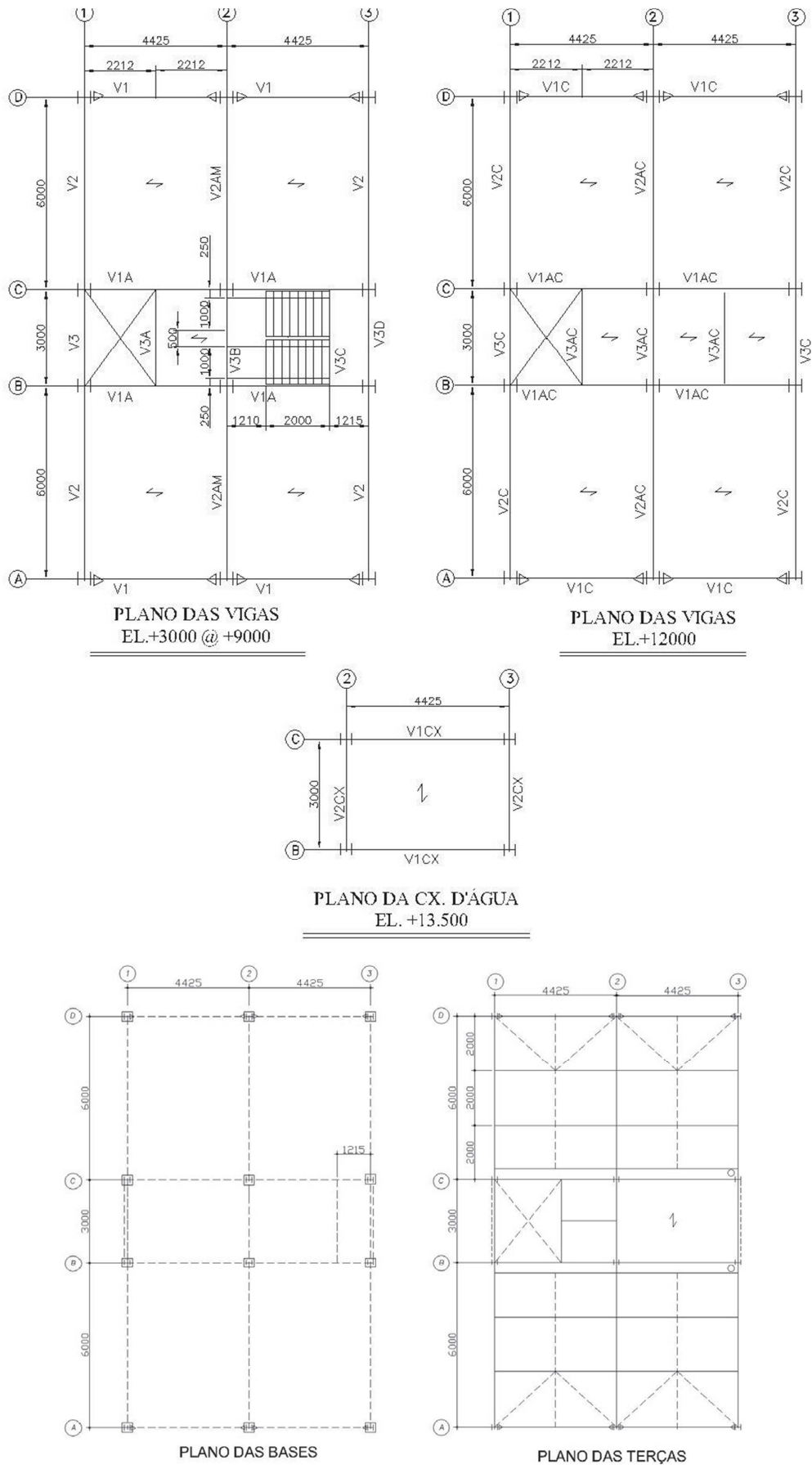
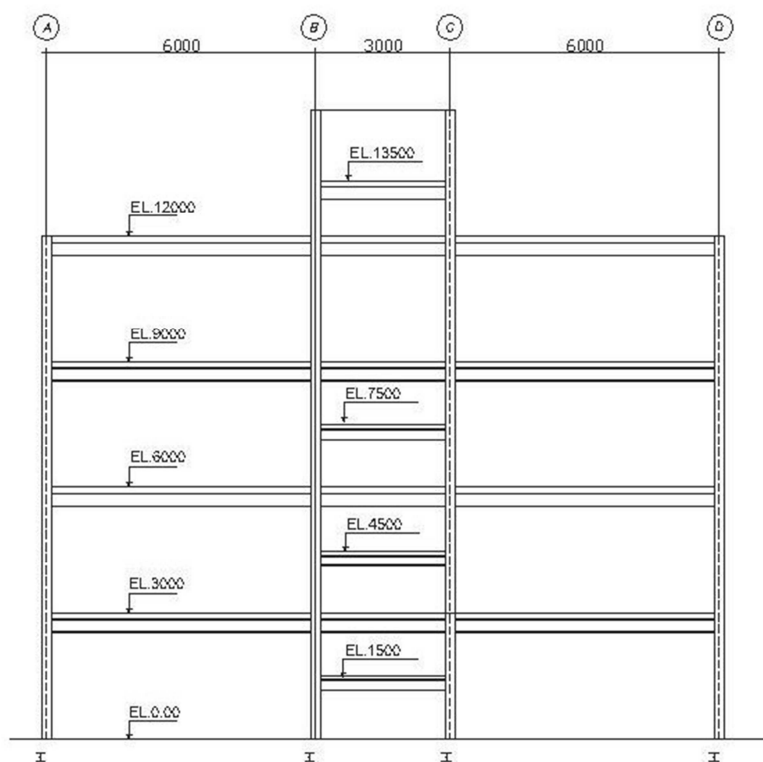
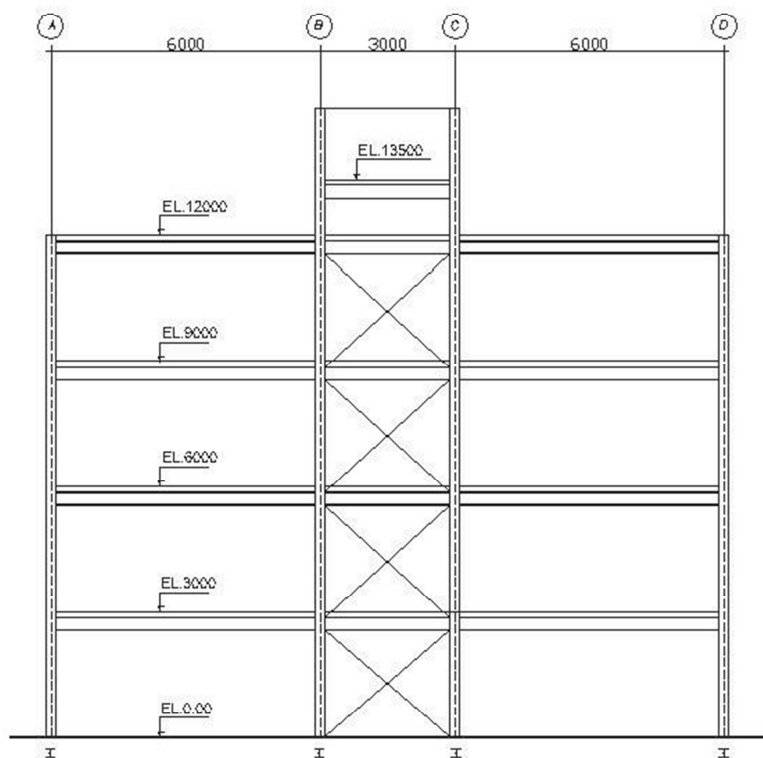


Figura 4. 3 – Plano das Vigas e Terças

4.2.2. Elevações

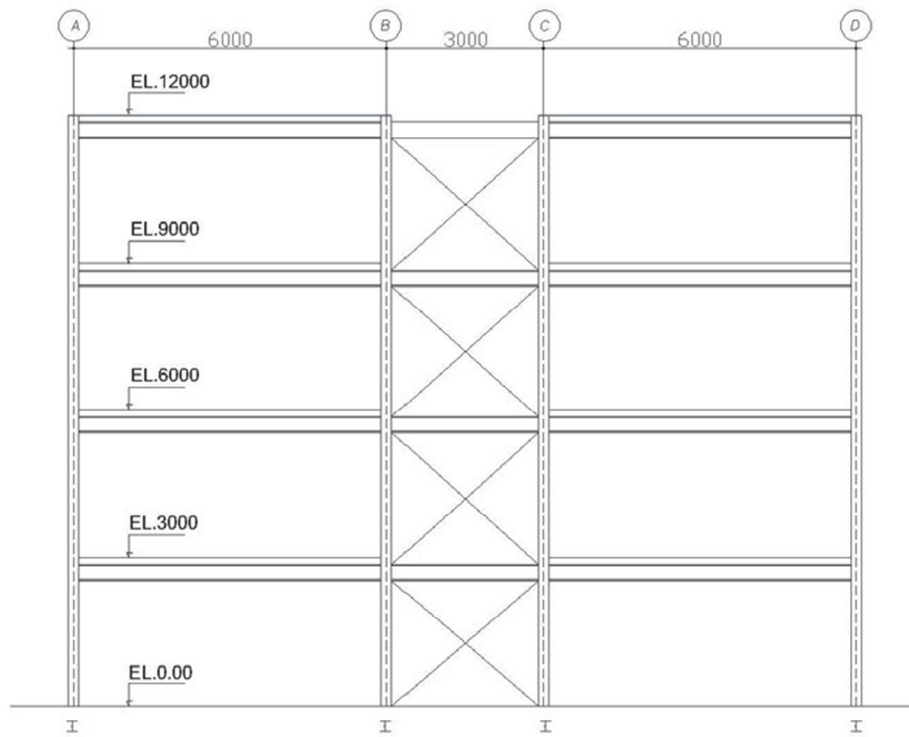


ELEVAÇÃO EIXO 2



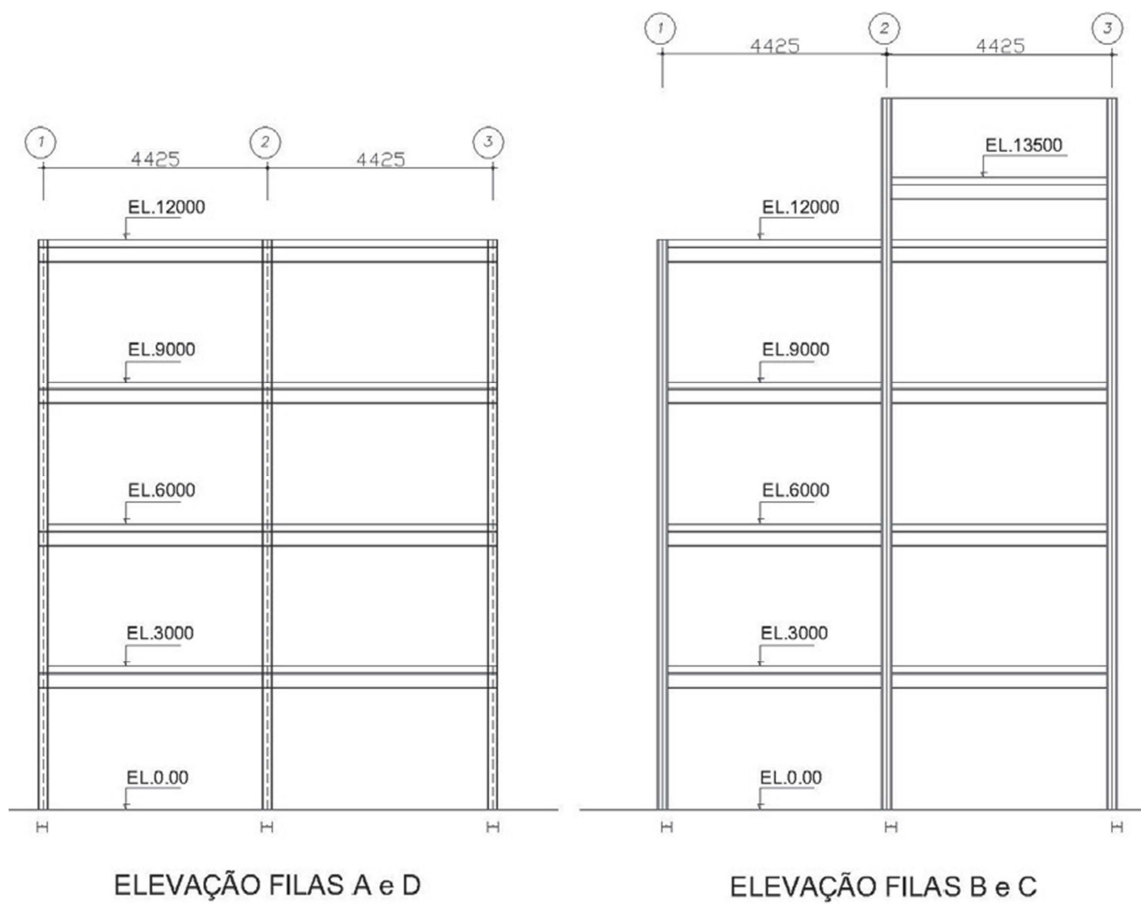
ELEVAÇÃO EIXO 3

Figura 4.4 – Elevação Eixos 2 e 3



ELEVAÇÃO EIXO 1

Figura 4.5 – Elevação Eixo 1



ELEVAÇÃO FILAS A e D

ELEVAÇÃO FILAS B e C

Figura 4.6 – Elevações Filas A e D, B e C

4.2.3. Isométrica



Figura 4. 7 – Isométrica

4.3. Materiais

4.3.1. Estrutura

Tabela 2 – Materiais da Estrutura

Materiais	Fy (kN/cm²)	Fu (kN/cm²)
Vigas	35	45
Pilares	25	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	-	-

4.3.2. Complementares

Tabela 3 – Materiais Complementares

Materiais	kN/cm²
Concreto armado	25
Aço	78,5
Tipo de concreto celular	5,0
Argamassa cimento + cal + areia	21
Gesso	12,5

4.4. Ações

4.4.1. Distribuição dos Carregamentos

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

a) EL. 13500

Ações Permanentes Diretas (CP):

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

Ações Variáveis (CA):

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

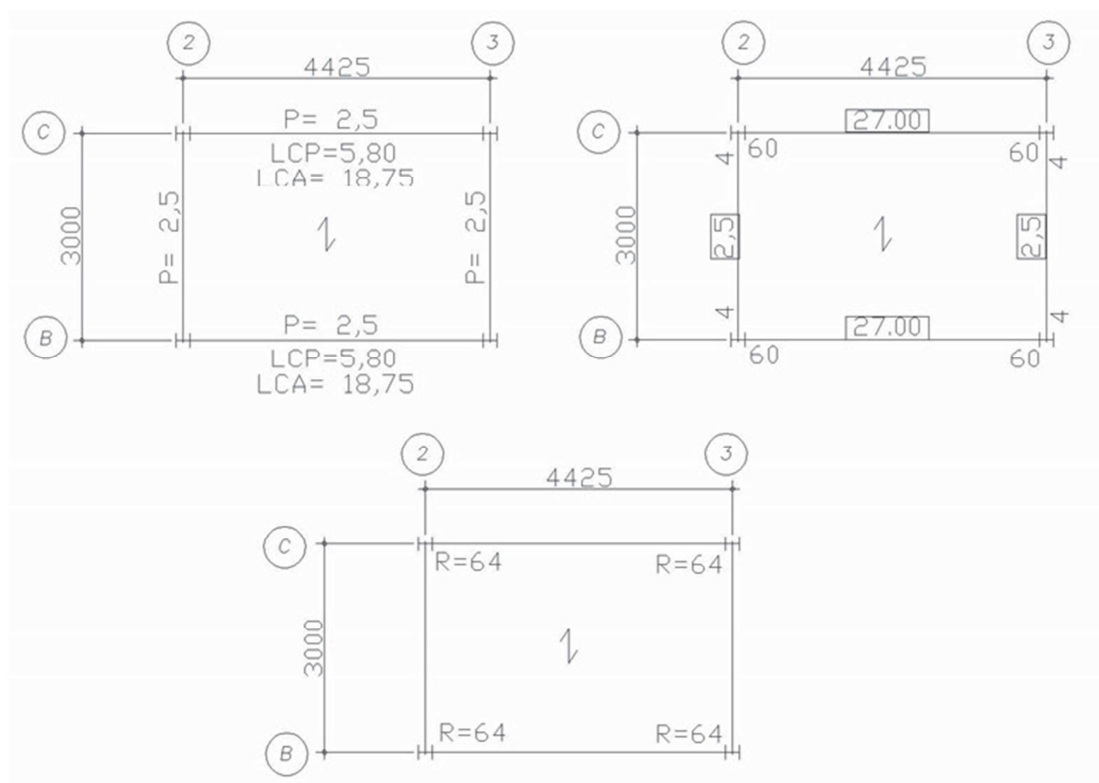


Figura 4. 8 – Cargas nas vigas sob a caixa d'água

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 (12 cm+3 cm revestimento) $\rightarrow 1,25$ kN/m² (concreto celular);
- Parede cobertura (H=1,35m) $\rightarrow 1,70$ kN/m;
- Telhado + terço + 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.

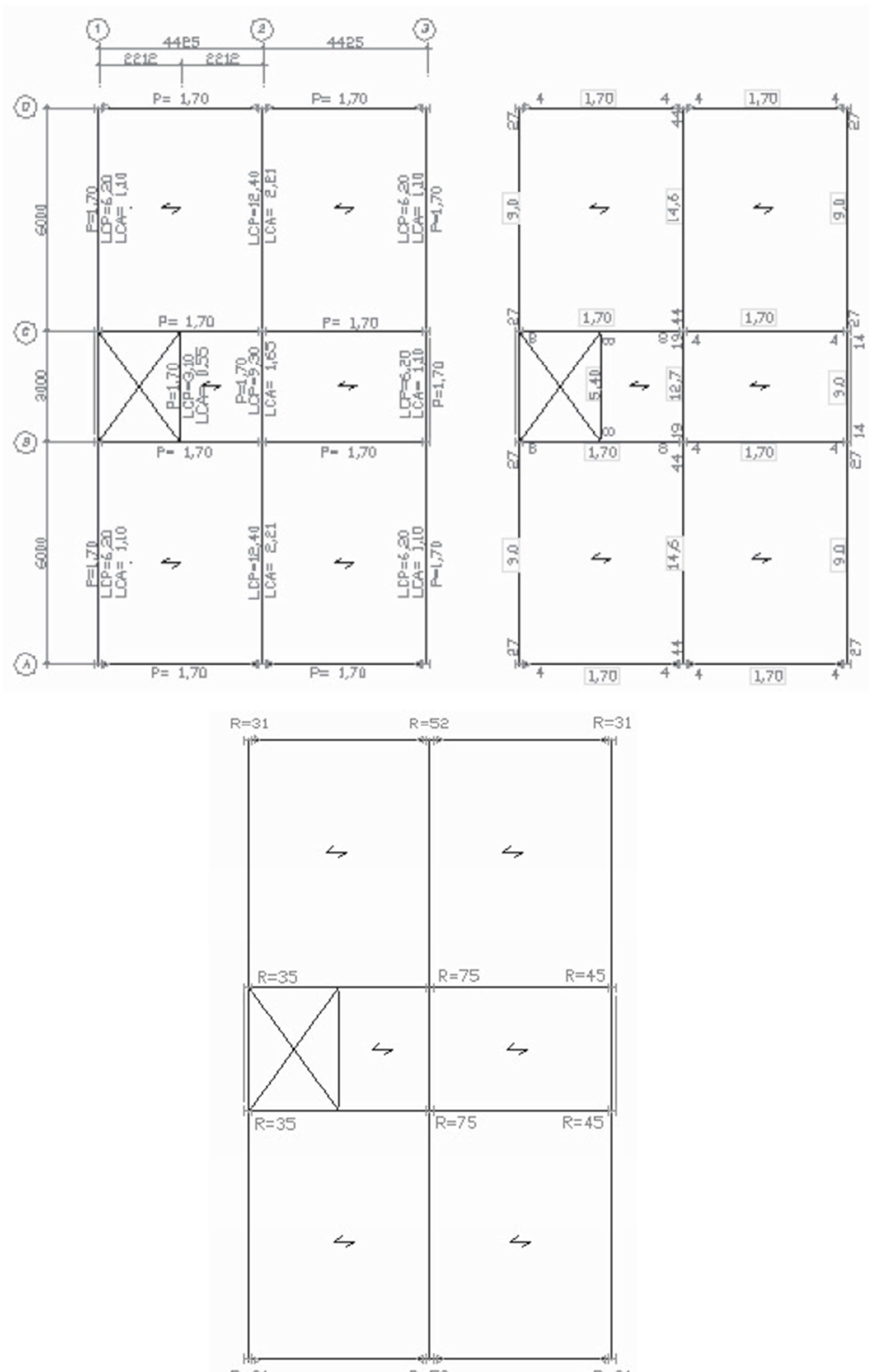


Figura 4.9 – Cargas nas vigas da cobertura

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 = $(2,5+0,30+,50)\times 2,212 = 7,63$ 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.

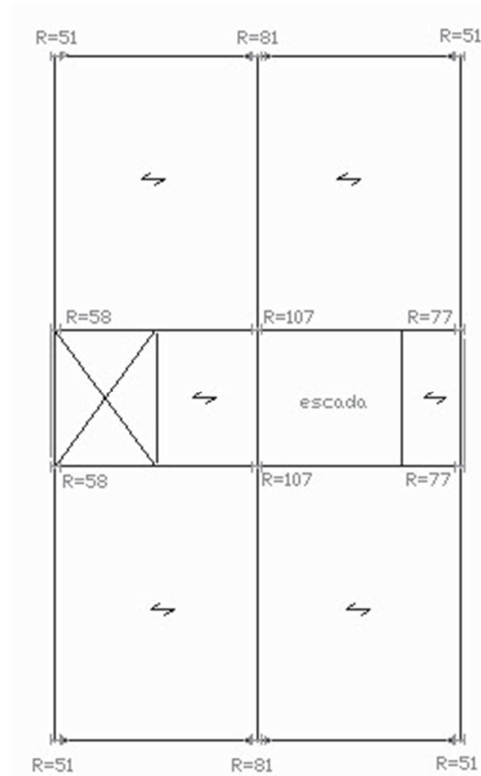


Figura 4. 10 – Cargas nas vigas do pavimento tipo

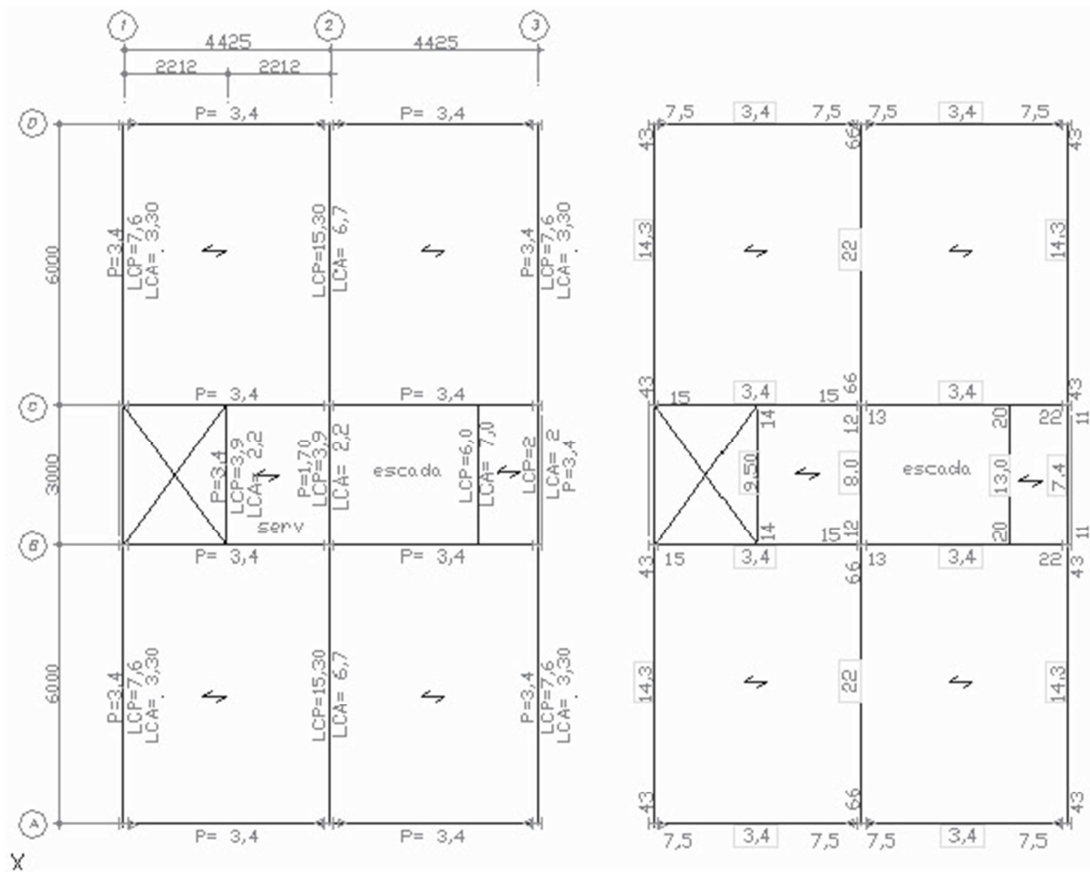


Figura 4. 11 – Cargas nas vigas do pavimento tipo

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.

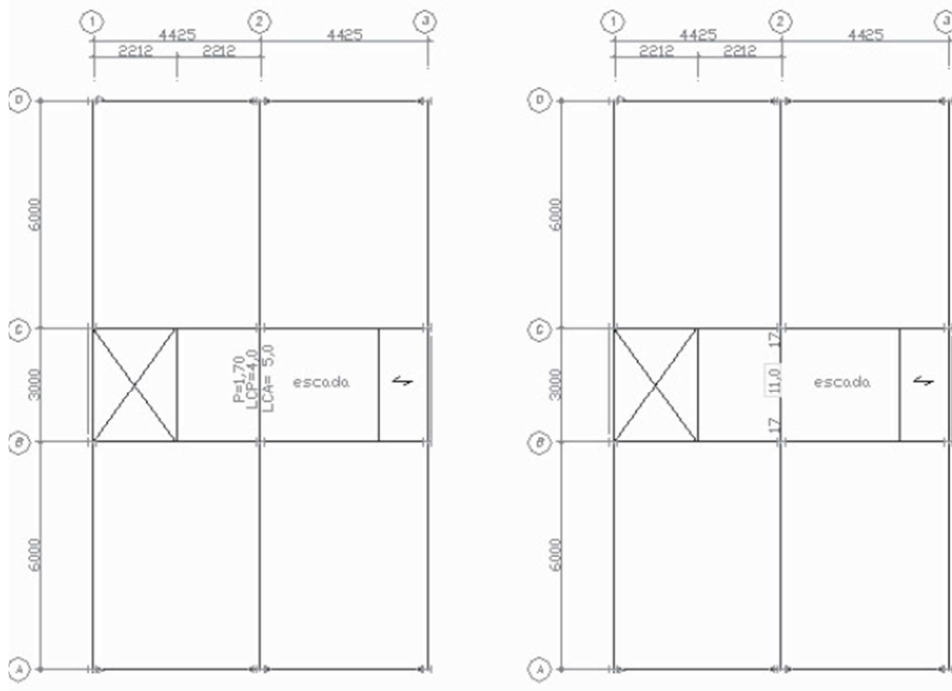


Figura 4. 12 – Cargas nas vigas da escada

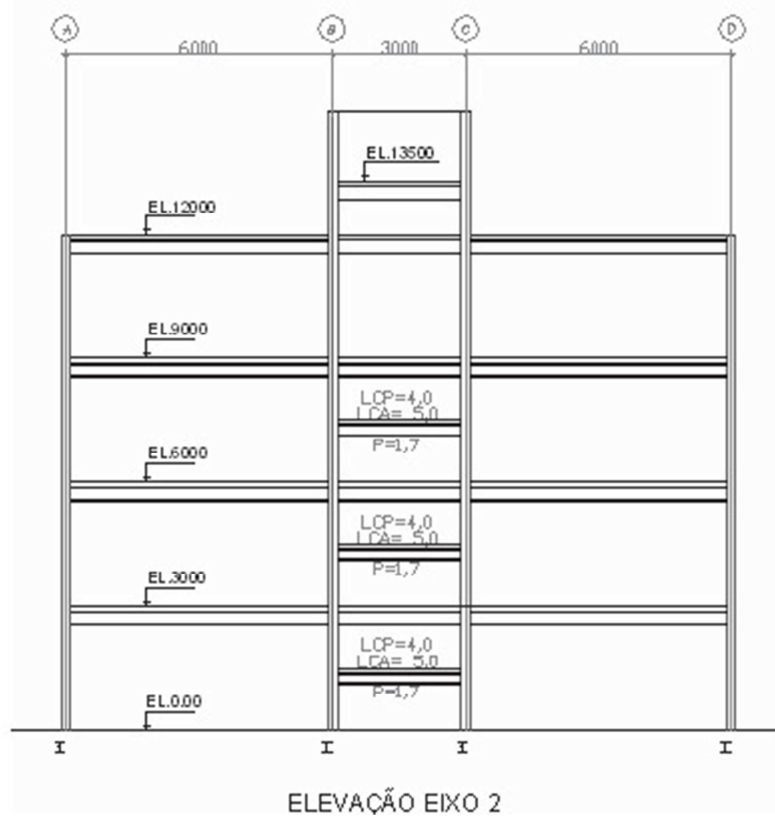


Figura 4. 13 – Cargas nas vigas intermediárias

4.4.2. 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;
- $S_2 = \text{NBR 6123 Tabela2 CAT IV – Classe A}$;
- $S_2 = b \times F_r \times (Z/10)^p$.

Tabela 4 – Dados relativos ao Vento

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 estatístico;
- $V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$ (velocidade característica);
- $q_k = 0,613 \times V_k^2$ (pressão dinâmica) N/m^2 .

Tabela 5 – Cargas de Vento

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

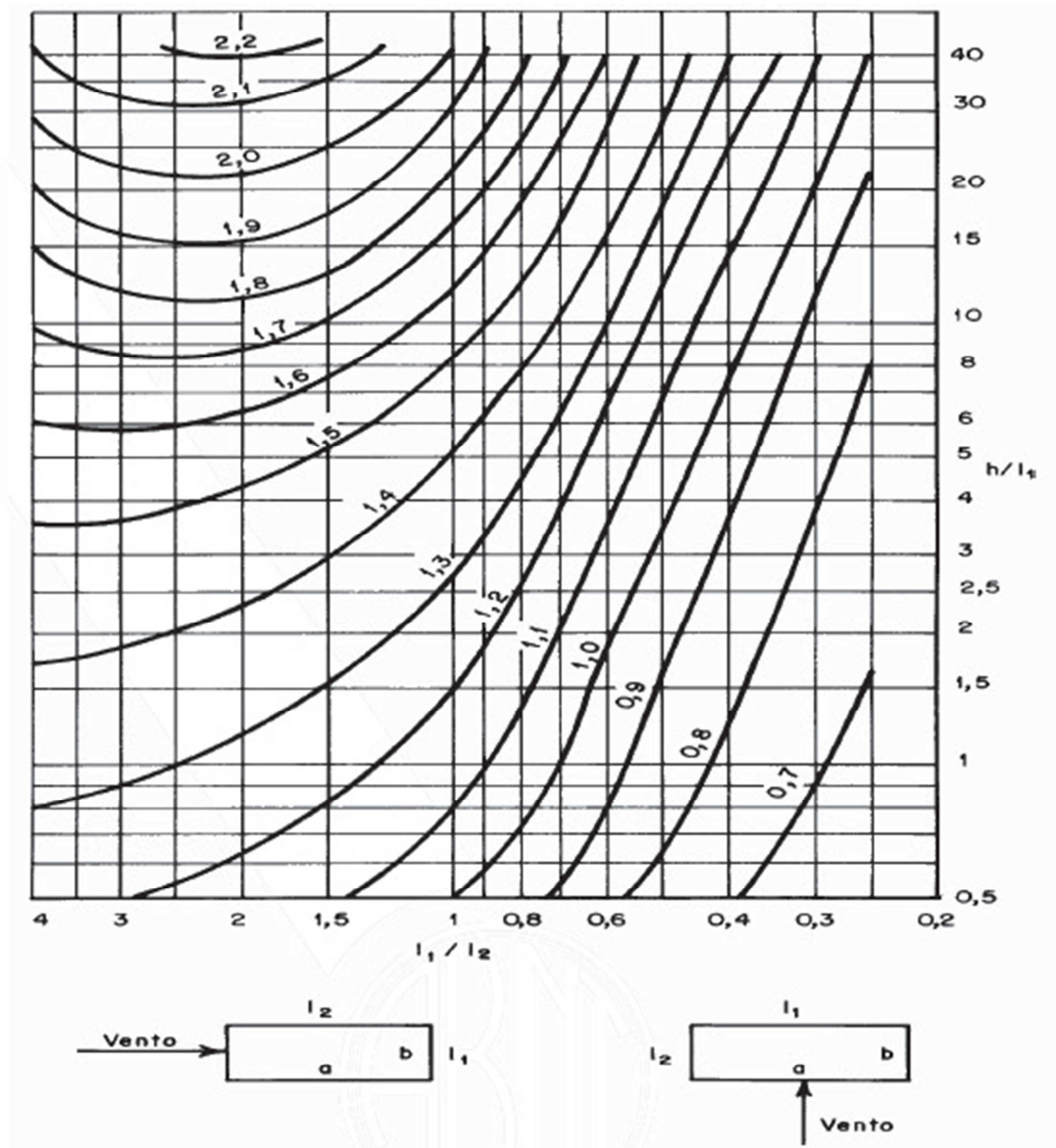


Figura 4. 14 – Coeficiente de arrasto C_a para edificações paralelepípedicas

a) 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.

Tabela 6 – Resumo do Vento CV0 (Cargas Aplicadas nos Nós)

h	qk(kN/m ²)	Ca	Ae(m ²)	Fa(kN)	1/2Fa(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

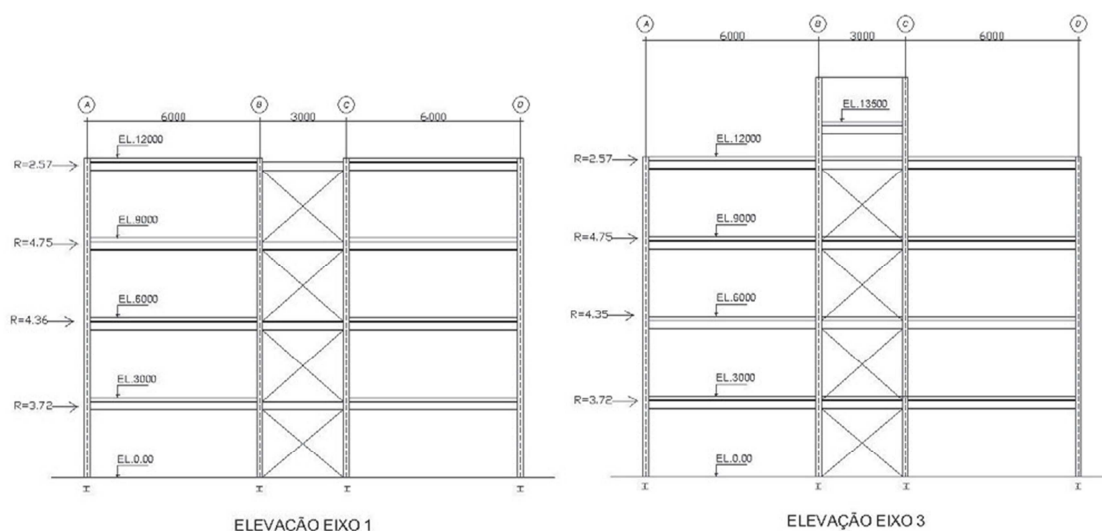


Figura 4.15 – Cargas Devido ao Vento Aplicadas nos Nós para os Eixos 1 e 3

b) Vento CV90 – NBR 6123

- a=15m; b=9m; H=12m;
- $L1 / L2 = 15,0/9,0 = 1,67$; $H/ L1 = 12,0/15,0 = 0,80$.

Olhando no gráfico teremos: $Ca = 1,20$.

Força de arrasto (vento): $Fa = Ca \times qk \times Ae$

qk – pressão dinâmica do vento;

Ae – Área de influência do vento.

Tabela 7 – Resumo do Vento CV90 (Cargas Aplicadas nos Nós)

Filas A e D

h	qk(kN/m ²)	Ca	Ae1(m ²)	Fa(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

Tabela 8 – Resumo do Vento CV90 (Cargas Aplicadas nos Nós) - Continuação

Filas B e C

h	qk(kN/m ²)	Ca	Ae2(m ²)	Fa(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

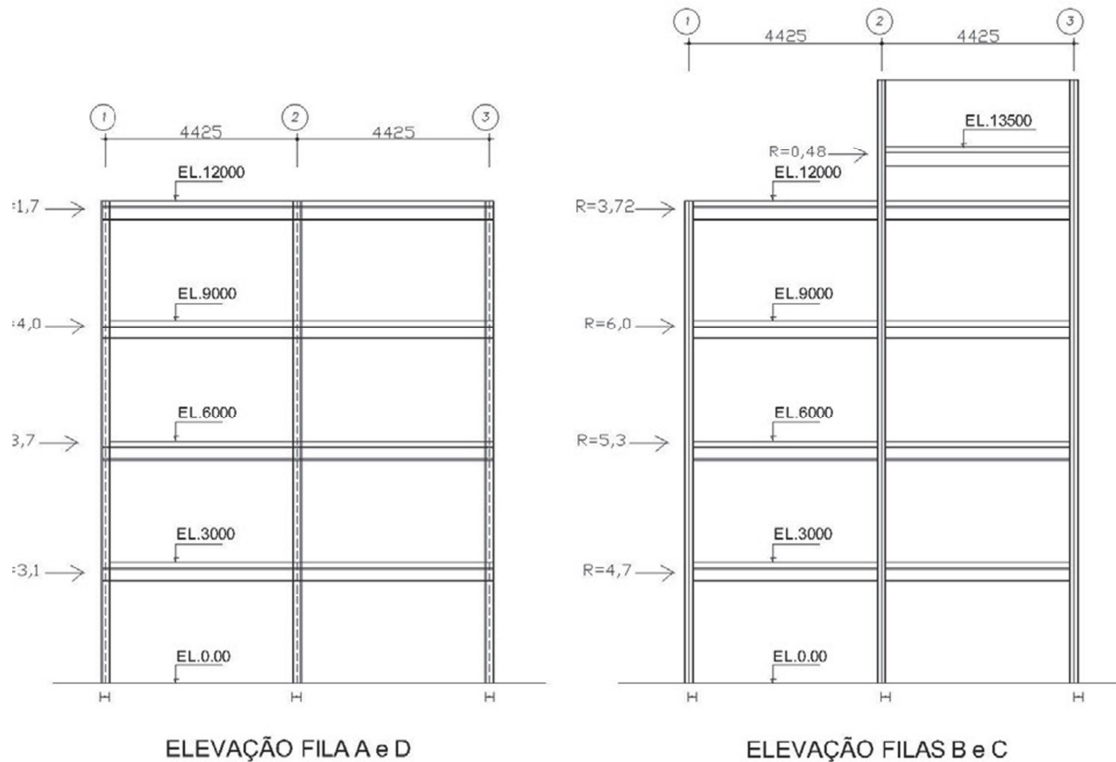
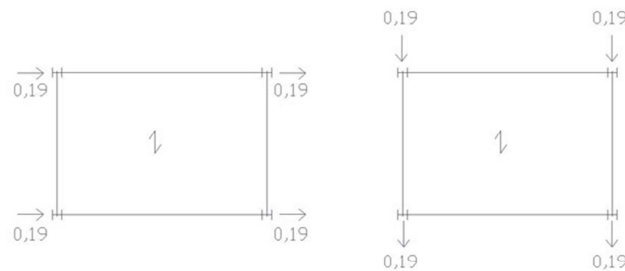


Figura 4. 16 – Cargas Devido ao Vento Aplicadas nos Nós para as Filas A-D e B-C

4.4.3. Força Nocional

- 0,3% das ações gravitacionais (CP+CA) devem ser aplicadas nas duas direções.



PLANO DAS VIGAS EL. 13500

Figura 4. 17 – Aplicação das Forças Nocionais no Plano das Vigas sob a Caixa D'Água

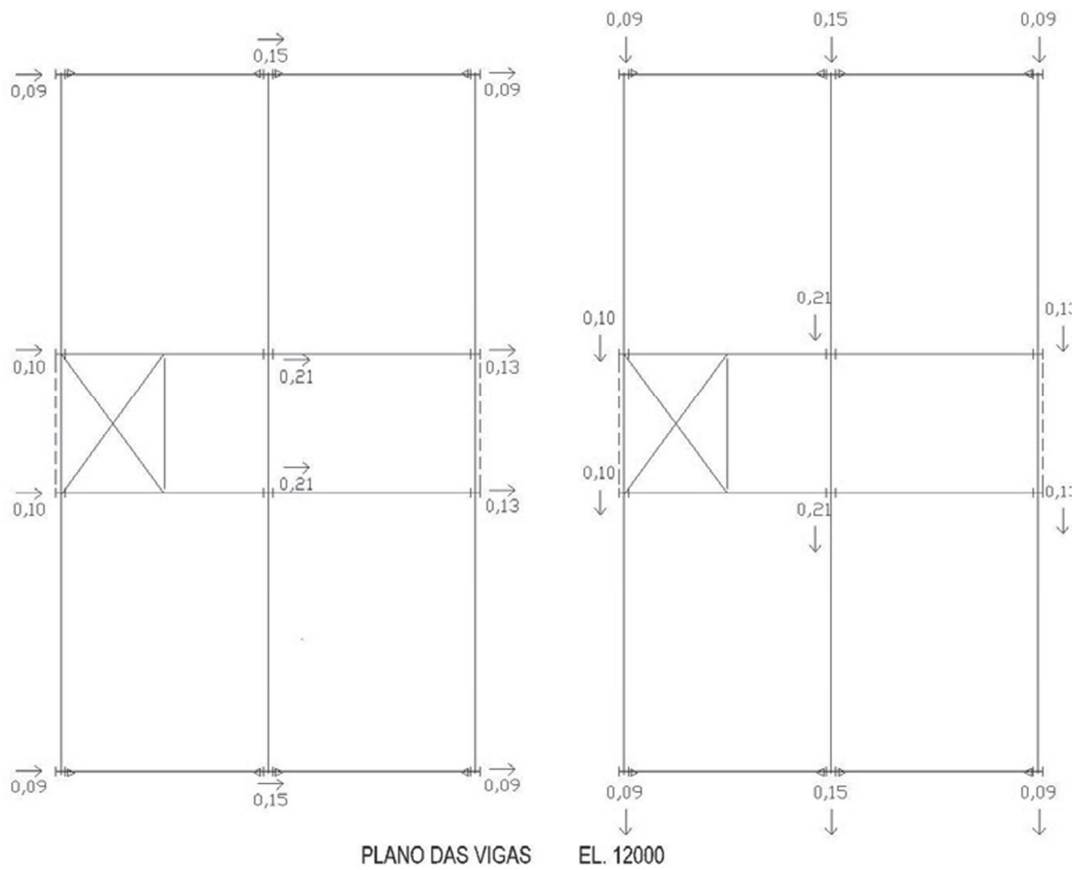


Figura 4. 18 – Aplicação das Forças Nocionais no Plano das Vigas da Cobertura

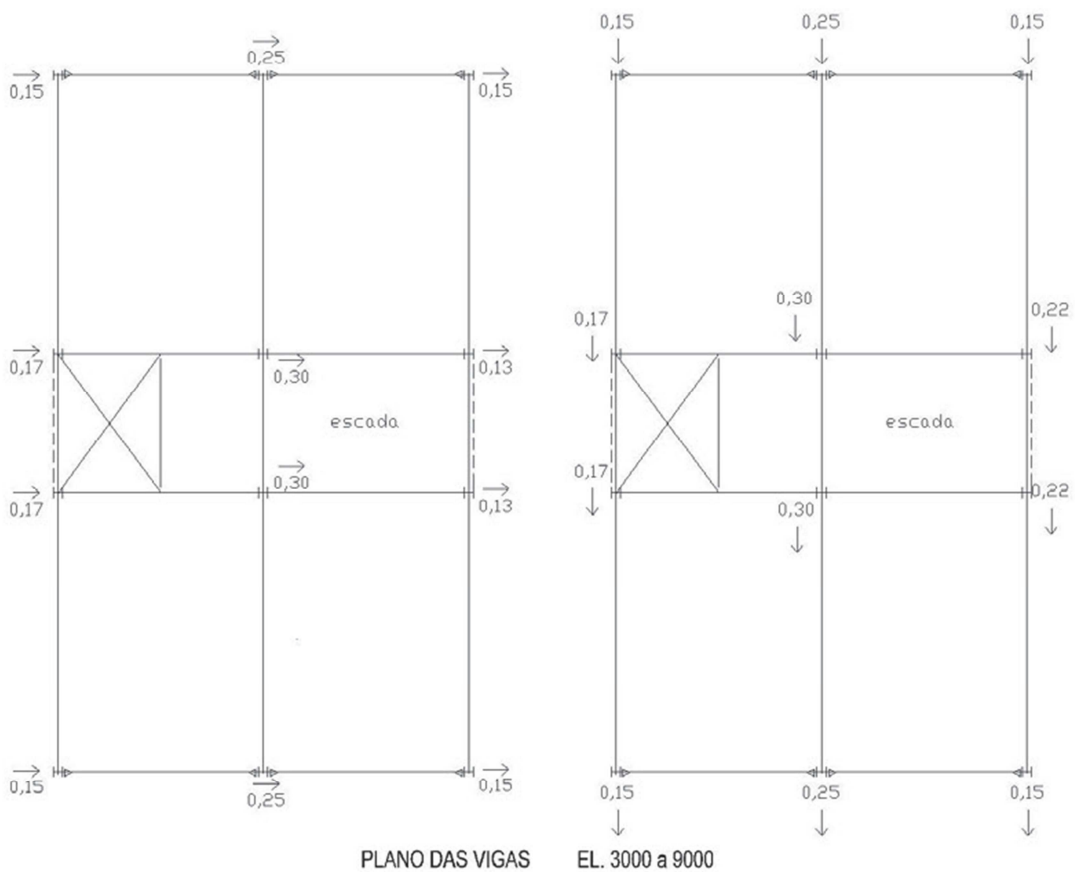


Figura 4. 19 – Aplicação das Forças Nocionais no Plano do Pavimento Tipo

4.5. Combinações de Cargas

Para o projeto estrutural dos membros da estrutura, os valores dos coeficientes de ponderação foram obtidos conforme tabelas 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 – $CP + CV90$.

4.6. Critério de Redução das Cargas Acidentais

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

4.7. Vibração

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

4.8. Deslocamento Máximo

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: 15 mm;
- Deformação total: $\delta_{tot} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$.

Sendo que: δ_1 = deslocamento devido a CP, δ_2 = deslocamento devido a CP longa duração, e δ_3 = deslocamento devido às seções variáveis.

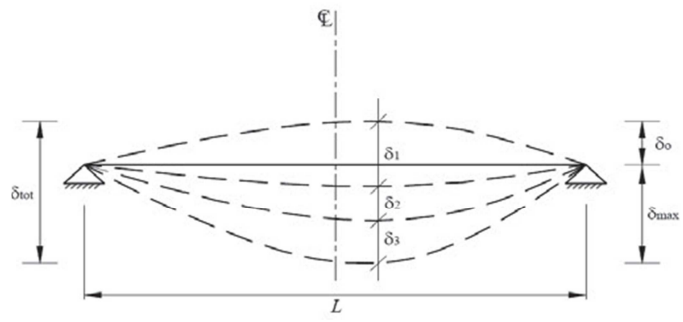


Figura 4. 20 – Representação dos deslocamentos

5. ESFORÇOS SOLICITANTES DA ESTRUTURA

De acordo com o roteiro do Manual de Construção em Aço – Edifícios de Pequeno Porte Estruturados em Aço, do Instituto Aço Brasil, devem ser dimensionadas 3 vigas no sentido transversal ao pórtico principal, uma viga do pórtico e um pilar.

5.1. Viga V2CX da Elevação 13500

- Concreto: $F_{ck} = 20\text{MPa}$;
- Peso Próprio = 25kN/m^3 ;
- Aço do Perfil: Tensão de Escoamento = 230MPa ;
- Módulo de Elasticidade = 200.000MPa ;
- Viga: Ie $300 \times 85 \times 25 \times 2,25$;
- Comprimentos de Flambagem: $K_x L_x = 3000\text{mm}$; $K_y L_y = 3000\text{mm}$; $K_z L_z = 3000\text{mm}$.

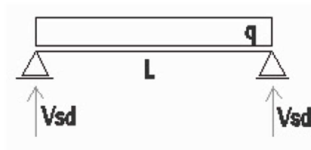


Figura 5.1 – Viga V2CX da Elevação 13500

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

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

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

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

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

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

- Estado Limite de Serviço (ELS):

$$\text{Limite} = L/350 = 300/350 = 0,85\text{cm.}$$

$$\delta_1 = \frac{5q_{cp}L^4}{384EI_x} = \frac{5 \times 0,0268 \times 300^4}{384 \times 20000 \times 2291} = 0,062\text{cm}$$

$$\delta_3 = \frac{5q_{cp}L^4}{384EI_x} = 0,0\text{cm}$$

$$\delta_t = \delta_1 + \delta_3 = 0,062\text{cm} < 0,85\text{cm} \rightarrow \text{OK!}$$

5.2. Viga V2C da Elevação 12000

- Concreto: $F_{ck} = 20\text{MPa}$;
- Peso Próprio = 25kN/m^3 ;
- Aço do Perfil: Tensão de Escoamento = 230MPa ;
- Módulo de Elasticidade = 200.000MPa ;
- Viga: Ie $300 \times 85 \times 25 \times 2,25$;
- Comprimentos de Flambagem: $K_x L_x = 6000\text{mm}$; $K_y L_y = 6000\text{mm}$; $K_z L_z = 6000\text{mm}$.

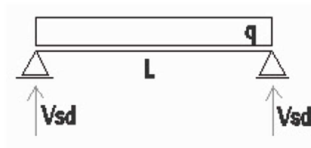


Figura 5.2 – Viga V2C da Elevação 12000

$$QCP = 1,70 + 6,20 + 0,283 = 8,18\text{kN/m}$$

$$QCA = 1,10\text{kN/m}$$

$$\text{Combinação: } 1,4QCP + 1,4QCA = 13,0\text{kN/m}$$

$$Q_{\text{TOTAL}} = 13,00\text{kN/m}$$

$$Msd = \frac{13,0 \times 6,0^2}{8} = 58,5\text{kN.m}$$

$$Vsd = \frac{13,0 \times 6,0}{2} = 39\text{kN}$$

- Estado Limite de Serviço (ELS):

$$\text{Limite} = L/350 = 600/350 = 1,71\text{cm.}$$

$$\delta_1 = \frac{5q_{cp}L^4}{384EI_x} = \frac{5 \times 0,0818 \times 600^4}{384 \times 20000 \times 5500} = 1,25\text{cm}$$

$$\delta_3 = \frac{5q_{cp}L^4}{384EI_x} = \frac{5 \times 0,0110 \times 600^4}{384 \times 20000 \times 5500} = 0,0\text{cm}$$

$$\delta_t = \delta_1 + \delta_3 = 1,42\text{cm} < 1,71\text{cm} \rightarrow \text{OK!}$$

5.3. Viga V2AM da Elevação 3000 a 9000

- Concreto: $F_{ck} = 20\text{MPa}$;
- Peso Próprio = 25kN/m^3 ;
- Aço do Perfil: Tensão de Escoamento = 230MPa ;
- Módulo de Elasticidade = 200.000MPa ;
- Viga: Ie $300 \times 85 \times 25 \times 2,25$;
- Comprimentos de Flambagem: $K_x L_x = 6000\text{mm}$; $K_y L_y = 6000\text{mm}$; $K_z L_z = 6000\text{mm}$.

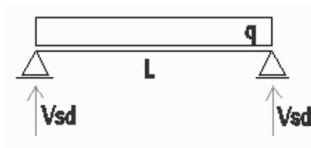


Figura 5.3 – Viga V2AM da Elevação 3000 a 9000

$$Q_{CP} = 15,30\text{kN/m}$$

$$Q_{CA} = 6,70\text{kN/m}$$

$$\text{Combinação: } 1,4Q_{CP} + 1,4Q_{CA} = 30,8\text{kN/m}$$

$$Q_{TOTAL} = 30,8\text{kN/m}$$

$$M_{sd} = \frac{30,8 \times 6,0^2}{8} = 138,6\text{kN.m}$$

$$V_{sd} = \frac{30,8 \times 6,0}{2} = 92,4\text{kN}$$

- Estado Limite de Serviço (ELS):

$$\text{Limite} = L/350 = 600/350 = 1,71\text{ cm.}$$

$$\delta_1 = \frac{5q_{cp}L^4}{384EI_x} = \frac{5 \times 0,1530 \times 600^4}{384 \times 20000 \times 5500} = 2,34\text{cm}$$

$$\delta_3 = \frac{5q_{cp}L^4}{384EI_x} = \frac{5 \times 0,067 \times 600^4}{384 \times 20000 \times 5500} = 1,03\text{cm}$$

$$\delta_t = \delta_1 + \delta_3 = 3,37\text{cm} > 1,71\text{cm} \rightarrow \text{NÃO OK!}$$

5.4. Pórtico

Para a obtenção dos esforços solicitantes do pórtico, foi utilizado o programa de computador SAP 2000, versão 14. Através deste programa, foram obtidos os diagramas de momento fletor, força cortante e força normal, como se vê abaixo. Além disso, foram obtidos também os valores dos deslocamentos da edificação.

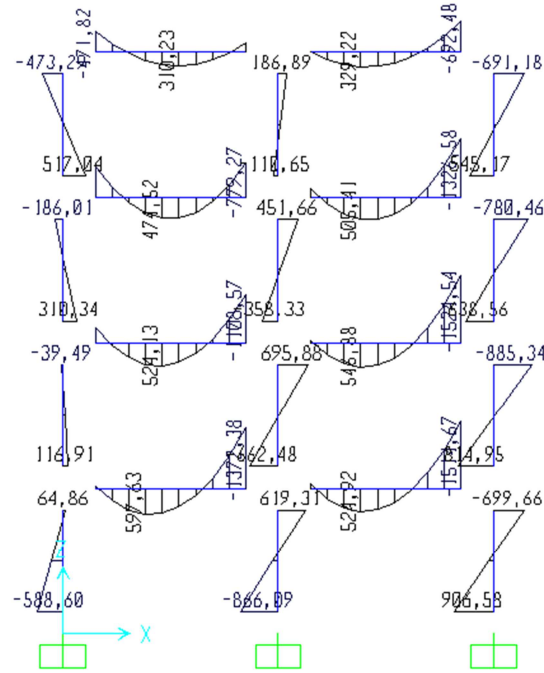


Figura 5.4 – Diagrama Momentos Pórtico

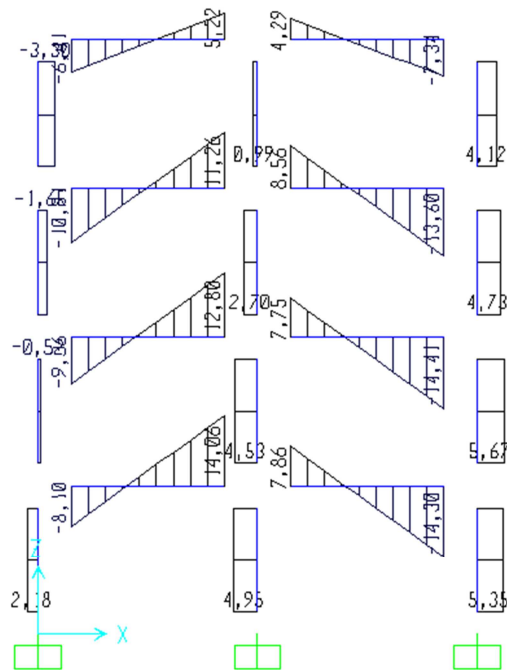


Figura 5.5 – Diagrama Força Cortante Pórtico

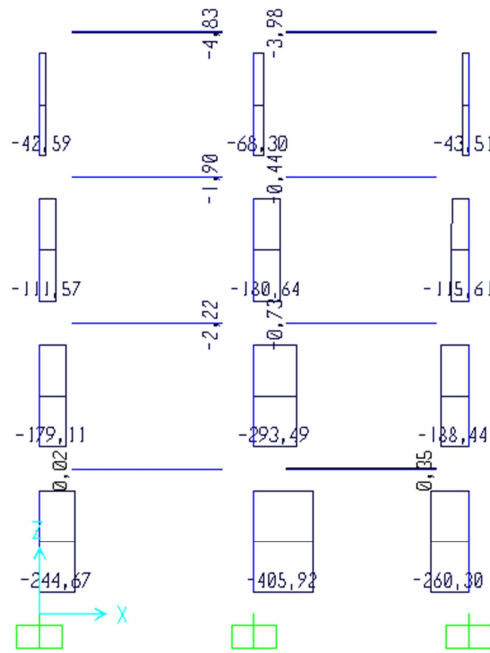


Figura 5.6 – Diagrama Força Normal Pórtico

Pt Obj: 39
 Pt Elm: 39
 U1 = .0004
 U2 = .2498
 U3 = -.3242
 R1 = -.00449
 R2 = .00047
 R3 = -.0001

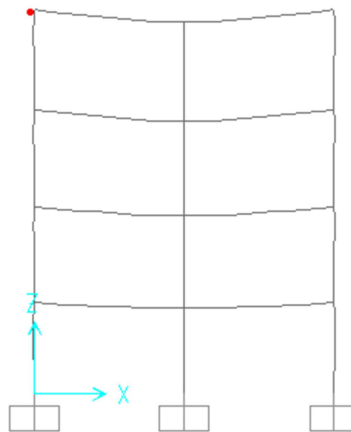


Figura 5.7 – Deslocamentos Pórtico Último Andar

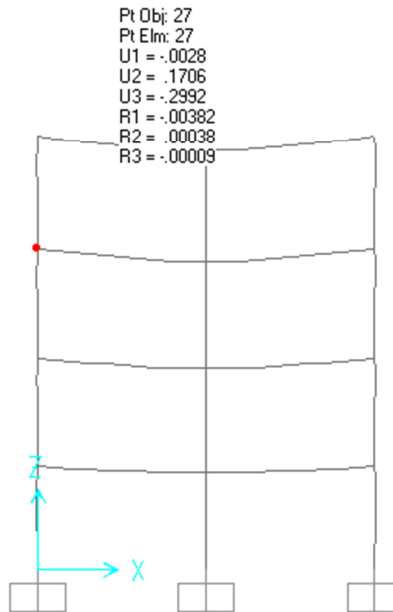


Figura 5.8 – Deslocamentos Pórtico Penúltimo Andar

5.4.1. Vigas do pórtico

Como pode se ver na Figura 3.4, o maior momento encontrado nas vigas do pórtico foi o momento: $M_{sd} = 1515 \text{ kNcm}$.

5.4.2. Pilares do pórtico

Como pode se ver na Figura 3.6, a maior força normal encontrada nos pilares do pórtico foi a força normal: $N_{sd} = 405,92 \text{ kNcm}$. Já o momento fletor máximo encontrado foi: $M_{sd} = 866,09 \text{ kNcm}$.

6. DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DA ESTRUTURA

A disciplina Projeto de Estruturas de Aço com Perfis Estruturais Formados a Frio propôs aos alunos que os mesmos realizassem o dimensionamento de uma determinada estrutura de escolha dos mesmos. Além disso, foi escolhido um perfil formado a frio para os pilares e outro perfil para as vigas desta estrutura. Como explicado anteriormente, este trabalho diz respeito ao uso destes perfis em um edifício de pequeno porte referente ao Manual de Construção em Aço – Edifícios de Pequeno Porte Estruturados em Aço, do Instituto Aço Brasil.

Assim, o perfil da viga é o perfil Ie 300x85x25x2,25, e o perfil do pilar é o Cx 300x85x25x2,00. Para estes perfis, devem ser encontrados os esforços resistentes de cálculo, e posteriormente deve ser feita a comparação com os esforços solicitantes.

No caso da viga, deve ser realizado o estudo da flexão para que seja determinado o momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} , que deve ser tomado 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.

Já no caso do pilar, deve ser realizado o estudo da flexão e também da compressão. O cálculo da flexão é análogo ao cálculo citado para o caso da viga, e o cálculo da compressão consiste na obtenção do menor valor da força normal resistente de cálculo com base nos métodos da largura efetiva e da seção efetiva.

6.1. Cálculo dos esforços resistentes das vigas

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

a) Método da Largura Efetiva

- Verificação do flange comprimido (elemento 2):

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

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

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{E}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,614}{0,2214}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{20000}{23}}\right]} = 1,872; \lambda_{po} \geq 0,673$$

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

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

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

$$I_a = 399 t^4 (0,487 \lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,2214^4 \times (0,487 \times 1,872 - 0,328)^3$$

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

$$I_a \leq t^4 (56 \lambda_{po} + 5) = 0,2214^4 \times (56 \times 1,872 + 5) = 0,264 \text{ cm}^4$$

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

$$n = (0,582 - 0,122 \times 1,872) = 0,3536 \geq 1/3$$

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

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

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,1606}{0,1906} = 0,84 \leq 1,0 \rightarrow OK$$

Cálculo do coeficiente de flambagem local, k:

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

$$k = (4,82 - 5 \times 0,328)(0,84)^{0,3536} + 0,43 = 3,422 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,422$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}} \right]} = \frac{\frac{7,614}{0,2214}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{3,422 \times 20000}{23}} \right]} = 0,664$$

Como $\lambda_p < 0,673$, não haverá flambagem local na mesa superior do perfil. Assim:

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

- Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3):

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

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

$$k = 0,43$$

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

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

$$d_{ef} = 2,057 \text{ cm}$$

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

$$d_s = 0,84 \times 2,057 = 1,733 \leq d_{ef}$$

$$d_s = 1,733$$

- Verificação da Alma (elemento 1):

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

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

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

Tabela 9 – Propriedades Geométricas – 1ª Iteração

<i>Elementos Fixos</i>	<i>L (cm)</i>	<i>y (cm)</i>	<i>L.y (cm²)</i>
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

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

$$y_t = 30 - 15,08 = 14,92 \text{ cm}$$

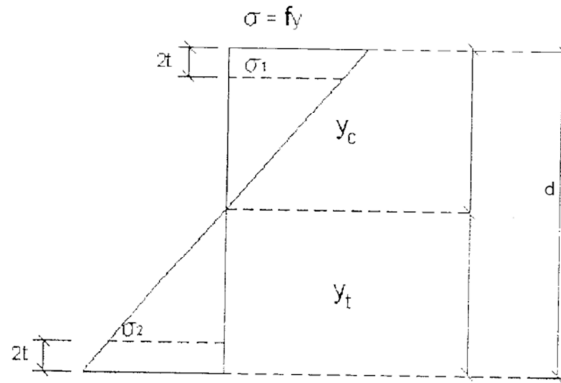


Figura 6.1 – Tensões na Alma do Perfil

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

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

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-22,09}{22,32} = -0,99 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

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

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

$$k = 4 + 2(1 + 0,99)^3 + 2(1 + 0,99) = 23,71$$

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

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:

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

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

$$b_{ef} = \frac{15,08}{0,95} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,95} \right) = 12,20 \text{ cm} \leq b_c = 14,64 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{b_{ef}}{(3 - \psi)} = \frac{12,20}{(3 + 0,99)} = 3,06 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5b_{ef} = 0,5 \times 12,20 = 6,10 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,06 + 6,10 = 9,16 \text{ cm} \leq b_c = 14,64 \text{ cm}$$

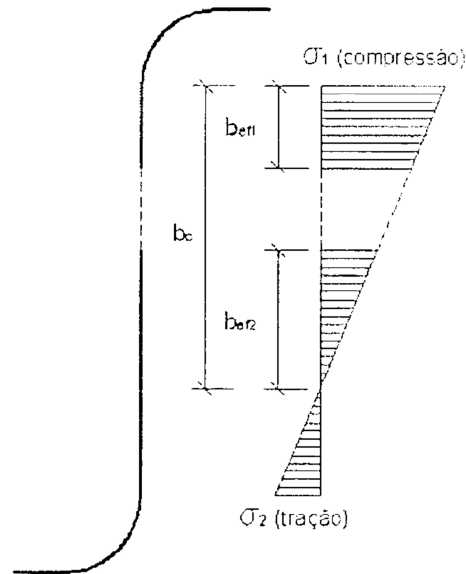


Figura 6.2 – Larguras Efetivas para o Elemento 1 Solicitado por um Gradiente de Tensão

❖ Segunda iteração: considerando a alma não totalmente efetiva.

A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = (b_{ef1} + b_{ef2}) - b_c = 9,16 - 14,64 = -5,48\text{cm}$$

$$y_{inef} = y_{cg} - (b_{ef2} - b_{inef}/2) = 15,08 - (6,10 + 5,48/2) = 6,24\text{cm}$$

Tabela 10 – Propriedades Geométricas – 2ª Iteração

<i>Elementos Fixos</i>	<i>L (cm)</i>	<i>y (cm)</i>	<i>L.y (cm²)</i>
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	-5,48	6,24	-34,20
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	44,74	-	723,177

$$y_{cg} = \frac{723,177}{44,74} = 16,16\text{cm}$$

$$y_t = 30 - 16,16 = 13,84\text{cm}$$

O eixo neutro mudou de 15,08 cm para 16,16 cm, resultando em uma diferença de 7,18%. Isto torna necessária a execução de mais iterações.

❖ Terceira iteração:

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

$$\sigma_2 = \frac{23 \times (13,84 - 2 \times 0,2214)}{16,16} = -19,06 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{-19,06}{22,37} = -0,85 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

$$k = 4 + 2(1 + 0,85)^3 + 2(1 + 0,85) = 20,41$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{29,114}{0,2214}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{20,41 \times 20000}{22,37}}\right]} = 1,02$$

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:

$$b_c = 16,16 - 2 \times 0,2214 = 15,72 \text{ cm}$$

$$b_{ef} = \frac{16,16}{1,02} \times \left(1 - \frac{0,22}{1,02}\right) = 12,39 \text{ cm} \leq b_c = 15,72 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{12,39}{(3 + 0,85)} = 3,22 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5 \times 12,39 = 6,19 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,22 + 6,19 = 9,41 \text{ cm} \leq b_c = 15,72 \text{ cm}$$

$$b_{inef} = 9,41 - 15,72 = -6,31 \text{ cm}$$

$$y_{inef} = 16,16 - (6,19 + 6,31/2) = 6,81 \text{ cm}$$

Tabela 11 – Propriedades Geométricas – 3ª Iteração

<i>Elementos Fixos</i>	<i>L (cm)</i>	<i>y (cm)</i>	<i>L.y (cm²)</i>
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	-6,31	6,81	-42,971
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	43,909	-	714,406

$$y_{cg} = \frac{714,406}{43,909} = 16,27 \text{ cm}$$

O eixo neutro mudou de 16,16cm para 16,27cm, resultando em uma diferença de 0,65%.

Logo a convergência é obtida ao final dessa interação, obtendo-se:

$$y_{cg} = 16,27\text{cm}$$

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

Tabela 12 – Propriedades Geométricas após a Convergência

<i>Elementos Fixos</i>	<i>L (cm)</i>	<i>y (cm)</i>	<i>L.y (cm²)</i>	<i>L.y² (cm³)</i>	<i>I'x (cm³)</i>
Flange Superior	7,614	0,111	0,843	0,093	-
Canto Superior Esquerdo	0,521	0,231	0,121	0,028	0,005
Canto Superior Direito	0,521	0,231	0,121	0,028	0,005
Enrijecedor Superior	1,733	1,309	2,270	2,972	0,434
Elemento Inefetivo da Alma	-6,31	16,27	-102,696	-1670,855	-20,957
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	43,909	-	-	14283,083	2036,778

$$I_{x'} = \Sigma Ly^2 + \Sigma I'_x - [(y_{cg})^2 \Sigma L] = 14283,083 + 2036,778 - [(16,27^2) \times 43,909]$$

$$I_{x'} = 4697,302$$

$$I_x = I_{x'} \times t = 4697,302 \times 0,2214 = 1039,983\text{cm}^4$$

$I_{x'}$ 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:

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{1039,983}{16,27} = 63,921\text{cm}^3$$

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

$$M_{rd} = \frac{W_{ef} f_y}{1,1} = \frac{63,921 \times 23}{1,1} = 1336,5\text{kN.cm}$$

b) 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:

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

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

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

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

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:

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

$$M_l = 29,75 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1 - 0,30^2)(299,964/2,214)^2} \times 98,5 = 2885,9kN$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W_{fy}}{M_l}} = \sqrt{\frac{98,5 \times 23}{2885,9}} = 0,886 > 0,673, \text{ haverá flambagem local.}$$

$$W_{ef} = \frac{W}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) = \frac{98,5}{0,886} \left(1 - \frac{0,22}{0,886}\right) = 83,568cm^3$$

$$M_{RD} = \frac{W_{ef} f_y}{1,1} = \frac{167,135 \times 23}{1,1} = 3494,64kN.cm$$

6.1.2. Momento com base na flambagem lateral com torção (FLT)

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

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} \times W_{c,ef} \times f_y}{1,10}$$

a) Método da Largura Efetiva

- Verificação do flange comprimido (elemento 2):

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

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_z)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 314,19}{(1,00 \times 300)^2} = 689,10kN$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \left\{ GJ + \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} \right] \right\} = \frac{1}{12,03^2} \left\{ 7700 \times 0,38 + \left[\frac{\pi^2 \times 20000 \times 75796,8}{(300)^2} \right] \right\}$$

$$= 1168,47kN$$

Nez é a força normal de flambagem elástica por torção.

$$M_e = 1,0 \times 12,03 \times (689,1 \times 1168,47)^{0,5} = 10796,9kN.cm$$

$$W_c = W_x = 197,0cm^3$$

$$\lambda_o = \left[\frac{(W_c f_y)}{M_e} \right]^{0,5} = \left[\frac{(197,0 \times 23)}{10796,9} \right]^{0,5} = 0,648 > 0,6 \rightarrow 0,6 < \lambda_o < 1,336$$

$$\chi_{FLT} = 1,11 \times (1 - 0,278\lambda_o\lambda_o) = 0,9805$$

$$\sigma = 23,00 \times 0,9805 = 22,55kN/cm^2$$

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

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

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right]} = \frac{\frac{7,614}{0,2214}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{20000}{22,55}} \right]} = 1,854$$

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

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

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

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

$$I_a = 399t^4(0,487\lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,2214^4 \times (0,487 \times 1,854 - 0,328)^3$$

$$I_a = 0,182cm^4$$

$$I_a \leq t^4(56\lambda_{po} + 5) = 0,2214^4 \times (56 \times 1,854 + 5) = 0,2614cm^4$$

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

$$n = (0,582 - 0,122 \times 1,854) = 0,3558 \geq 1/3$$

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

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

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,1606}{0,182} = 0,88 \leq 1,0 \rightarrow OK$$

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

$$k = (4,82 - 5 \times 0,328)(0,88)^{0,3558} + 0,43 = 3,47 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,47$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,614}{0,2214}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{3,47 \times 20000}{22,55}}\right]} = 0,653$$

Como $\lambda_p < 0,673$, não haverá flambagem local na mesa superior do perfil.

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

- Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3):

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

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

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

$$\lambda_p = \frac{\frac{d}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{2,057}{0,2214}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{22,55}}\right]} = 0,501$$

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

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

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

$$d_s = 0,88 \times 2,057 = 1,815 \leq d_{ef}$$

$d_s = 1,815$ (largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda).

- Verificação da Alma (elemento 1):

❖ Primeira iteração: considerando a alma totalmente efetiva.

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

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

Tabela 13 – Propriedades Geométricas – 1ª Iteração

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	1,815	1,350	2,452
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	50,301	-	757,559

$$y_{cg} = \frac{757,55}{50,301} = 15,06 \text{ cm}$$

$$y_t = 30 - 15,06 = 14,94 \text{ cm}$$

$$\sigma_1 = \frac{f_y(y_{cg} - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23,0 \times (15,06 - 2 \times 0,2214)}{15,06} = 22,32 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{f_y(y_t - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23,0 \times (14,94 - 2 \times 0,2214)}{15,06} = -22,14 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-22,14}{22,32} = -0,99 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

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

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

$$k = 4 + 2(1 + 0,99)^3 + 2(1 + 0,99) = 23,79$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{29,114}{0,2214}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{23,79 \times 20000}{22,32}}\right]} = 0,95$$

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:

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

$$b_c = 15,06 - 2 \times 0,2214 = 14,62 \text{ cm}$$

$$b_{ef} = \frac{15,06}{0,95} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,95}\right) = 12,20 \text{ cm} \leq b_c = 14,62 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{b_{ef}}{(3 - \psi)} = \frac{12,20}{(3 + 0,99)} = 3,06 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5b_{ef} = 0,5 \times 12,20 = 6,10 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,06 + 6,10 = 9,16 \text{ cm} \leq b_c = 14,62 \text{ cm}$$

❖ Segunda iteração: considerando a alma não totalmente efetiva.

A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = (b_{ef1} + b_{ef2}) - b_c = 9,16 - 14,62 = -5,46 \text{ cm}$$

$$y_{inef} = y_{cg} - (b_{ef2} - b_{inef}/2) = 15,06 - (6,10 + 5,46/2) = 6,23 \text{ cm}$$

Tabela 14 – Propriedades Geométricas – 2ª Iteração

<i>Elementos Fixos</i>	<i>L (cm)</i>	<i>y (cm)</i>	<i>L.y (cm²)</i>
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	1,815	1,350	2,452
Elemento Inefetivo da Alma	-5,46	6,23	-34,015
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	44,841	-	723,544

$$y_{cg} = \frac{723,544}{44,841} = 16,14\text{cm}$$

$$y_t = 30 - 16,14 = 13,86\text{cm}$$

O eixo neutro mudou de 15,06cm para 16,14cm, resultando em uma diferença de 7,14%. Isto torna necessária a execução de mais interações.

❖ Terceira iteração:

$$\sigma_1 = \frac{23 \times (16,14 - 2 \times 0,2214)}{16,14} = 22,37\text{kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{23 \times (13,86 - 2 \times 0,2214)}{16,14} = -19,13\text{kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{-19,13}{22,37} = -0,86 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

$$k = 4 + 2(1 + 0,86)^3 + 2(1 + 0,86) = 20,48$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{29,114}{0,2214}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{20,48 \times 20000}{22,37}}\right]} = 1,02$$

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:

$$b_c = 16,14 - 2 \times 0,2214 = 15,70\text{cm}$$

$$b_{ef} = \frac{16,14}{1,02} \times \left(1 - \frac{0,22}{1,02}\right) = 12,38\text{cm} \leq b_c = 15,70\text{cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{12,38}{(3 + 0,86)} = 3,21\text{cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5 \times 12,38 = 6,19\text{cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 3,21 + 6,19 = 9,40\text{cm} \leq b_c = 15,70\text{cm}$$

$$b_{inef} = 9,40 - 15,70 = -6,29cm$$

$$y_{inef} = 16,14 - (6,19 + 6,29/2) = 6,80cm$$

Tabela 15 – Propriedades Geométricas – 3ª Iteração

<i>Elementos Fixos</i>	<i>L (cm)</i>	<i>y (cm)</i>	<i>L.y (cm²)</i>
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	1,815	1,350	2,452
Elemento Inefetivo da Alma	-6,29	6,80	-42,77
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	44,011	-	714,789

$$y_{cg} = \frac{714,789}{44,011} = 16,24cm$$

O eixo neutro mudou de 16,14cm para 16,24cm, resultando em uma diferença de 0,65%.

Logo a convergência é obtida ao final dessa interação, obtendo-se:

$$y_{cg} = 16,24cm$$

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

Tabela 16 – Propriedades Geométricas após a Convergência

<i>Elementos Fixos</i>	<i>L (cm)</i>	<i>y (cm)</i>	<i>L.y (cm²)</i>	<i>L.y² (cm³)</i>	<i>I'_x (cm³)</i>
Flange Superior	7,614	0,111	0,843	0,093	-
Canto Superior Esquerdo	0,521	0,231	0,121	0,028	0,005
Canto Superior Direito	0,521	0,231	0,121	0,028	0,005
Enrijecedor Superior	1,815	1,350	2,452	3,311	0,499
Elemento Inefetivo da Alma	-6,29	16,24	-102,168	-1659,325	-20,745
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	44,011	-	-	14294,952	2037,055

$$I_{x'} = \Sigma Ly^2 + \Sigma I'_x - [(y_{cg})^2 \Sigma L] = 14294,952 + 2037,055 - [(16,24^2) \times 44,011]$$

$$I_{x'} = 4723,133$$

$$I_x = I_{x'} \times t = 4723,133 \times 0,2214 = 1045,702cm^4$$

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{1045,702}{16,24} = 64,386cm^3$$

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

$$M_{rd} = \frac{W_{ef} f_y}{1,1} = \frac{64,386 \times 23}{1,1} = 1320,0 kN.cm$$

b) 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:

$$\chi_{FLT} = 1,11 \times (1 - 0,278 \lambda_o \lambda_o) = 0,981$$

$$t_r = 0,018 mm$$

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

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

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

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

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

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:

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

$$M_l = 29,75 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1 - 0,30^2)(299,964/2,214)^2} \times 98,5 = 2885,9 kN$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W f_y}{M_l}} = \sqrt{\frac{98,5 \times 22,55}{2885,9}} = 0,877 > 0,673, \text{ haverá flambagem local.}$$

$$W_{ef} = 2 \times \frac{W}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) = 2 \times \frac{98,5}{0,877} \left(1 - \frac{0,22}{0,877}\right) = 168,237 cm^3$$

$$M_{RD} = \frac{\chi_{FLT} W_{ef} f_y}{1,1} = \frac{0,981 \times 168,237 \times 22,55}{1,1} = 3381,85 kN.cm$$

6.1.3. Momento com base na flambagem por distorção da seção transversal

a) Flambagem Local

De acordo com a flambagem lateral com torção, o momento $M_{Re} = 1452 \text{ kNcm}$.

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{re}}{M_l}} = \sqrt{\frac{1452}{7335,8}} = 0,444$$

$$M_l = 7335,8 \text{ kN.cm}$$

Como $\lambda_l < 0,776$, temos que: $M_{Rl} = M_{Re} = 7335,8 \text{ kN.cm}$.

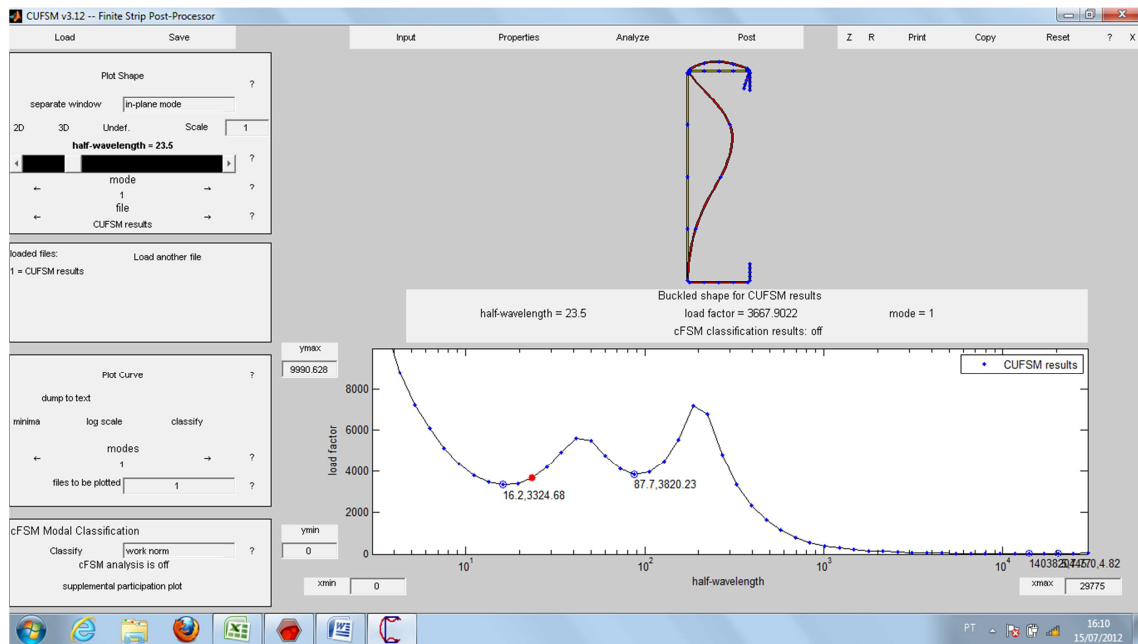


Figura 6.3 – Método da Resistência Direta – Flambagem local

b) Flambagem Distorcional

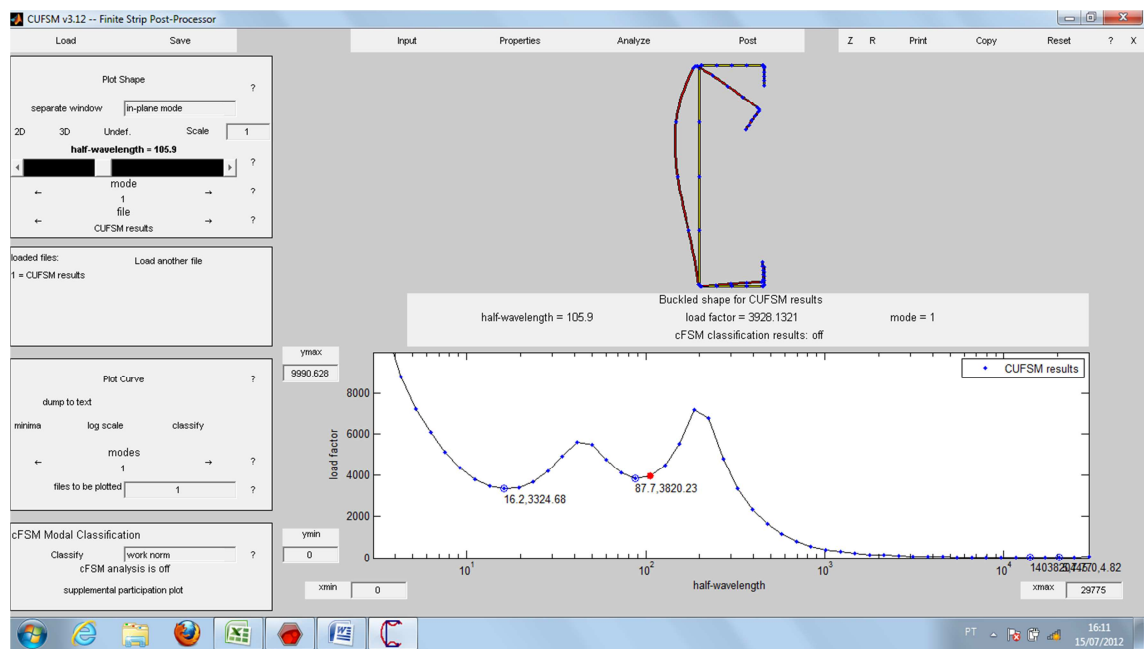


Figura 6.4 – Método da Resistência Direta – Flambagem Distorcional

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{W f_y}{M_{dist}}} = \sqrt{\frac{98,5 \times 23}{7856,3}} = 0,537$$

$$M_{dist} = 7856,3 \text{ kN.cm}$$

Para $\lambda_{dist} < 0,673$, temos que: $M_{Rdist} = W \times f_y = 98,5 \times 23 = 2266 \text{ kN.cm}$.

c) Determinação de M_{rd}

Para encontrarmos o momento resistente, devemos tomar o menor valor do momento entre os encontrados acima. Logo, temos que:

$$M_r = 1452 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = \frac{1452}{1,1} = 1320 \text{ kN.cm}$$

6.2. Cálculo dos esforços resistentes dos pilares - Compressão

6.2.1. Força normal com base na flambagem por flexão, torção ou flexo-torção

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma} \quad (\gamma = 1,2)$$

a) Método da Largura Efetiva

❖ Determinação da Tensão:

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

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 2641,0}{300^2} = 5792,36kN$$

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

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 986,70}{300^2} = 2164,07kN$$

- Força normal de flambagem global elástica por torção:

$$N_{ez} = \frac{1}{(r_0)^2} \times \left\{ GJ + \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} \right] \right\}, \text{ onde } r_0^2 = r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2$$

$$N_{ez} = \frac{1}{(13,42)^2} \times \left\{ 7700 \times 2151,7 + \left[\frac{\pi^2 \times 20000 \times 7574,8}{(300)^2} \right] \right\} = 92073,84kN$$

- Força Normal de flambagem global elástica por flexo-torção:

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

$$N_{exz} = \frac{5792,36 + 92073,84}{2[1 - (0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \times 5792,36 \times 92073,84 [1 - (0)^2]}{(5792,36 + 92073,84)^2}} \right] = 5792,36kN$$

Como $N_{ey} = 2164,07kN < 5792,36kN \rightarrow N_e = 2164,07kN$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Af_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{20,14 \times 23,00}{2164,07}} = 0,46$$

Onde $\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{0,46^2} = 0,91$

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

$$\sigma = \chi f_y = 0,91 \times 23,00 = 21,03kN/cm^2$$

❖ Determinação da Área Efetiva:

- Verificação da alma (Elemento 1):

$$b = 30 - 4 \times \frac{2,00 - 0,036}{10} = 29,214 \text{ cm}$$

$$k = 4 \text{ (caso "a" na tabela 4.2)}$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{kE}{\sigma}\right)}\right]} = \frac{\frac{29,214}{0,1964}}{\left[0,95 \sqrt{\left(\frac{4 \times 20000}{21,03}\right)}\right]} = 2,54$$

Como $\lambda_p > 0,673$, haverá flambagem local no elemento 1.

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

$$b_{ef} = 29,214 \frac{1}{2,54} \left(1 - \frac{0,22}{2,54}\right) = 10,511 < b = 29,214$$

$$b_{ef} = 10,511$$

- Verificação do flange comprimido (elemento 2):

$$b = [85 - 4 \times (2,00 - 0,036)] \div 10 = 7,714 \text{ cm}$$

$$t = (2,00 - 0,036) \div 10 = 0,1964 \text{ cm}$$

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{E}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,714}{0,1964}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{20000}{21,03}}\right]} = 2,04$$

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

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

$$d = (25 \div 10) - 2 \times 0,1964 = 2,107 \text{ cm}$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{2,107^3 \times 0,1964}{12} = 0,1531 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 399 t^4 (0,487 \lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,1964^4 \times (0,487 \times 2,04 - 0,328)^3 = 0,1766 \text{ cm}^4$$

$$I_a \leq t^4 (56 \lambda_{po} + 5) = 0,1964^4 \times (56 \times 2,04 + 5) = 0,1774 \text{ cm}^4$$

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

$$n = (0,582 - 0,122 \times 2,04) = 0,333 \geq 1/3$$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{7,714} = 0,324$$

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

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,1531}{0,1766} = 0,87 \leq 1,0 \rightarrow OK$$

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

$$k = (4,82 - 5 \times 0,324)(0,87)^{0,333} + 0,43 = 3,481 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,481$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,714}{0,1964}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{3,481 \times 20000}{21,03}}\right]} = 0,719$$

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} , que é definida para elementos AA (elementos com bordas vinculadas - “apoiado-apoiado”), conforme segue:

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

$$b_{ef} = 7,714 \frac{1}{0,719} \left(1 - \frac{0,22}{0,719}\right)$$

$$\mathbf{b_{ef} = 7,449cm}$$

- Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3):

$$d = [25 - 2 \times (2,00 - 0,036)] \div 10 = 2,107cm$$

$$t = (2,00 - 0,036) \div 10 = 0,1964cm$$

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

$$\lambda_p = \frac{\frac{d}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{2,107}{0,1964}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{21,03}}\right]} = 0,558$$

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

$$d_{ef} = 2,107cm$$

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

$$d_s = 0,87 \times 2,107 = 1,827 \leq d_{ef}$$

$$d_s = 1,827$$

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

$$A_{inef} = [(b - b_{ef,alma}) + 2(b - b_{ef,mesa}) + 2(b_{ef,alma} - d_s)] \times t$$

$$A_{inef} = 3,888cm^2$$

$$A_{ef} = 20,14 - 3,888 = 16,252cm^2$$

❖ Determinação de $N_{c,Rd}$:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{0,91 \times 12,364 \times 23}{1,2} = 216,67kN$$

b) 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:

$$\chi_{FLT} = 0,91$$

$$t_r = 0,018mm$$

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

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

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

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

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

Com base na tabela 10 (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 compressão centrada que:

$$k_l = 5,782$$

A força axial de flambagem local elástica pode ser calculada por:

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

$$N_l = 5,782 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1 - 0,30^2)(299,964/2,214)^2} \times 10,07 = 45,12kN$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\chi A f_y}{N_l}} = \sqrt{\frac{0,91 \times 10,07 \times 21,03}{45,12}} = 2,166 > 0,673, \text{ haverá flambagem local.}$$

$$A_{ef} = 9,974cm^2$$

$$N_{RD} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{1,2} = \frac{0,91 \times 9,974 \times 21,03}{1,2} = 174,78kN$$

6.3. Cálculo dos esforços resistentes dos pilares - Flexão

6.3.1. 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 .

a) Método da Largura Efetiva

- Verificação do flange comprimido (elemento 2):

$$b = [85 - 4 \times (2,00 - 0,036)] \div 10 = 7,714 \text{ cm}$$

$$t = (2,00 - 0,036) \div 10 = 0,1964 \text{ cm}$$

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{E}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,714}{0,1964}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{20000}{23}}\right]} = 2,138$$

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

$$d = (25 \div 10) - 2 \times 0,1964 = 2,107 \text{ cm}$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{2,107^3 \times 0,1964}{12} = 0,1531 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 399 t^4 (0,487 \lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,1964^4 \times (0,487 \times 2,138 - 0,328)^3$$

$$I_a = 0,2154 \text{ cm}^4$$

$$I_a \leq t^4 (56 \lambda_{po} + 5) = 0,1964^4 \times (56 \times 2,138 + 5) = 0,1856 \text{ cm}^4$$

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

$$n = (0,582 - 0,122 \times 2,138) = 0,3211 \geq 1/3$$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{7,714} = 0,324$$

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

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,1531}{0,1856} = 0,83 \leq 1,0 \rightarrow OK$$

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

$$k = (4,82 - 5 \times 0,324) (0,83)^{0,333} + 0,43 = 3,431 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,431$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{7,714}{0,1964}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{3,431 \times 20000}{23}}\right]} = 0,757$$

Como $\lambda_p < 0,673$, não haverá flambagem local na mesa superior do perfil.

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

- Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3)

$$d = [25 - 2 \times (2,00 - 0,036)] \div 10 = 2,107\text{cm}$$

$$t = (2,00 - 0,036) \div 10 = 0,1964\text{cm}$$

$$k = 0,43$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{d}{t}}{\left[0,95\sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{2,107}{0,1964}}{\left[0,95\sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{23}}\right]} = 0,584$$

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

$$d_{ef} = 2,107\text{cm}$$

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

$$d_s = 0,83 \times 2,107 = 1,739 \leq d_{ef}$$

$$d_s = 1,739$$

- Verificação da Alma (elemento 1):

❖ Primeira iteração: considerando a alma totalmente efetiva.

$$b = [300 - 4 \times (2,00 - 0,036)] \div 10 = 29,214\text{cm} \text{ (comprimento do elemento)}$$

$$t = (2,00 - 0,036) \div 10 = 0,1964\text{cm} \text{ (espessura do elemento)}$$

Tabela 17 – Propriedades Geométricas – 1ª Iteração

<i>Elementos Fixos</i>	<i>L (cm)</i>	<i>y (cm)</i>	<i>L.y (cm²)</i>
Flange Superior	7,229	0,098	0,710
Canto Superior Esquerdo	0,463	0,205	0,095
Canto Superior Direito	0,463	0,205	0,095
Enrijecedor Superior	1,739	1,262	2,195
Alma	29,214	15,000	438,216
Flange Inferior	7,714	29,900	230,661
Enrijecedor Inferior	2,107	28,554	60,168
Canto Inferior Esquerdo	0,463	29,795	13,781
Canto Inferior Direito	0,463	29,795	13,781
Soma	49,854	-	759,701

$$y_{cg} = \frac{759,701}{49,854} = 15,24\text{cm}$$

$$y_t = 30 - 15,24 = 14,76\text{cm}$$

$$\sigma_1 = \frac{f_y(y_{cg} - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (15,24 - 2 \times 0,1964)}{15,24} = 22,41\text{kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{f_y(y_t - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (14,76 - 2 \times 0,1964)}{15,24} = -21,69\text{kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-21,69}{22,41} = -0,97 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

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

$$k = 4 + 2(1 + 0,97)^3 + 2(1 + 0,97) = 23,18$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{29,214}{0,1964}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{23,18 \times 20000}{22,41}}\right]} = 1,09$$

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:

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

$$b_c = 15,24 - 2 \times 0,1964 = 14,85\text{cm}$$

$$b_{ef} = \frac{15,24}{1,09} \times \left(1 - \frac{0,22}{1,09}\right) = 11,17\text{cm} \leq b_c = 14,85\text{cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{b_{ef}}{(3 - \psi)} = \frac{11,17}{(3 + 0,97)} = 2,81\text{cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5b_{ef} = 0,5 \times 11,17 = 5,58\text{cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 2,81 + 5,58 = 8,39\text{cm} \leq b_c = 14,85\text{cm}$$

❖ Segunda iteração: considerando a alma não totalmente efetiva.

$$b_{inef} = (b_{ef1} + b_{ef2}) - b_c = 8,39 - 14,85 = -6,45\text{cm}$$

$$y_{inef} = y_{cg} - (b_{ef2} - b_{inef}/2) = 15,24 - (5,58 + 6,45/2) = 6,43\text{cm}$$

Tabela 18 – Propriedades Geométricas – 2ª Iteração

<i>Elementos Fixos</i>	<i>L (cm)</i>	<i>y (cm)</i>	<i>L.y (cm²)</i>
Flange Superior	7,229	0,098	0,710
Canto Superior Esquerdo	0,463	0,205	0,095
Canto Superior Direito	0,463	0,205	0,095
Enrijecedor Superior	1,739	1,262	2,195
Elemento Inefetivo da Alma	-6,45	6,43	-41,47
Alma	29,214	15,000	438,216
Flange Inferior	7,714	29,900	230,661
Enrijecedor Inferior	2,107	28,554	60,168
Canto Inferior Esquerdo	0,463	29,795	13,781
Canto Inferior Direito	0,463	29,795	13,781
Soma	43,404	-	718,231

$$y_{cg} = \frac{718,231}{43,404} = 16,55cm$$

$$y_t = 30 - 16,55 = 13,45cm$$

O eixo neutro mudou de 15,25cm para 16,55, resultando em uma diferença de 8,58%. Isto torna necessária a execução de mais interações.

❖ Terceira iteração:

$$\sigma_1 = \frac{23 \times (16,55 - 2 \times 0,1964)}{16,55} = 22,45kN/cm^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{23 \times (13,45 - 2 \times 0,1964)}{16,55} = -18,15kN/cm^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{-18,15}{22,45} = -0,81 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

$$k = 4 + 2(1 + 0,81)^3 + 2(1 + 0,81) = 19,45$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{29,214}{0,1964}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{19,45 \times 20000}{22,45}}\right]} = 1,19$$

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:

$$b_c = 16,55 - 2 \times 0,1964 = 16,16cm$$

$$b_{ef} = \frac{16,55}{1,19} \times \left(1 - \frac{0,22}{1,19}\right) = 11,34cm \leq b_c = 16,16cm$$

$$b_{ef1} = \frac{11,34}{(3 + 0,81)} = 2,98cm$$

$$b_{ef2} = 0,5 \times 11,34 = 5,67cm$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 2,98 + 5,67 = 8,65\text{cm} \leq b_c = 16,16\text{cm}$$

$$b_{inef} = 8,65 - 16,16 = -7,51\text{cm}$$

$$y_{inef} = 16,55 - (5,67 + 7,51/2) = 7,12\text{cm}$$

Tabela 8 – Propriedades Geométricas – 3ª Iteração

<i>Elementos Fixos</i>	<i>L (cm)</i>	<i>y (cm)</i>	<i>L.y (cm²)</i>
Flange Superior	7,229	0,098	0,710
Canto Superior Esquerdo	0,463	0,205	0,095
Canto Superior Direito	0,463	0,205	0,095
Enrijecedor Superior	1,739	1,262	2,195
Elemento Inefetivo da Alma	-7,51	7,12	-53,471
Alma	29,214	15,000	438,216
Flange Inferior	7,714	29,900	230,661
Enrijecedor Inferior	2,107	28,554	60,168
Canto Inferior Esquerdo	0,463	29,795	13,781
Canto Inferior Direito	0,463	29,795	13,781
Soma	42,344	-	706,23

$$y_{cg} = \frac{706,23}{42,344} = 16,68\text{cm}$$

O eixo neutro mudou de 16,55cm para 16,68cm, resultando em uma diferença de 0,79%.

Logo a convergência é obtida ao final dessa interação, obtendo-se:

$$y_{cg} = 16,68\text{cm}$$

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

Tabela 8 – Propriedades Geométricas após a Convergência

<i>Elementos Fixos</i>	<i>L (cm)</i>	<i>y (cm)</i>	<i>L.y (cm²)</i>	<i>L.y² (cm³)</i>	<i>I'_x (cm³)</i>
Flange Superior	7,229	0,098	0,710	0,070	-
Canto Superior Esquerdo	0,463	0,205	0,095	0,019	0,004
Canto Superior Direito	0,463	0,205	0,095	0,019	0,004
Enrijecedor Superior	1,739	1,262	2,195	2,770	0,438
Elemento Inefetivo da Alma	-7,51	16,68	-125,228	-2088,477	-35,281
Alma	29,214	15,000	438,216	6573,240	2077,828
Flange Inferior	7,714	29,900	230,661	6896,751	-
Enrijecedor Inferior	2,107	28,554	60,168	1718,017	0,78
Canto Inferior Esquerdo	0,463	29,795	13,781	410,596	0,0002
Canto Inferior Direito	0,463	29,795	13,781	410,596	0,0002
Soma	42,345	-	-	13923,602	2043,773

$$I_{x'} = \Sigma Ly^2 + \Sigma I'_x - [(y_{cg})^2 \Sigma L] = 13923,602 + 2043,773 - [(16,68^2) \times 42,345]$$

$$I_{x'} = 4189,672$$

$$I_x = I_{x'} \times t = 4189,672 \times 0,1964 = 822,8515\text{cm}^4$$

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{822,8515}{16,68} = 49,339\text{cm}^3$$

$$M_{rd} = \frac{W_{ef} f_y}{1,1} = \frac{49,339 \times 23}{1,1} = 1031,6 \text{ kN.cm}$$

b) Método da Seção Efetiva

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

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

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

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

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

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

$$k_l = 29,75$$

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

$$M_l = 29,75 \times \frac{\pi^2 \times 20000}{12(1 - 0,30^2)(299,964/1,964)^2} \times 88,0 = 2028,88 \text{ kN}$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{W_{fy}}{M_l}} = \sqrt{\frac{88 \times 23}{2028,88}} = 0,999 > 0,673, \text{ haverá flambagem local.}$$

$$W_{ef} = \frac{W}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) = \frac{88,0}{0,999} \left(1 - \frac{0,22}{0,999}\right) = 68,699 \text{ cm}^3$$

$$M_{RD} = \frac{W_{ef} f_y}{1,1} = \frac{137,399 \times 23}{1,1} = 2872,88 \text{ kN.cm}$$

6.3.2. Momento com base na flambagem lateral com torção (FLT)

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

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} \times W_{c,ef} \times f_y}{1,10}$$

$$\chi_{FLT} = 1,11 \times (1 - 0,278 \times 0,146 \times 0,146) = 1,10$$

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

Como o valor do fator de redução é igual a 1, não há necessidade de refazer os cálculos, pois os resultados são idênticos aos resultados encontrados no método com base no início do escoamento da seção efetiva.

7. CONCLUSÃO

Após encontrarmos os esforços solicitantes e os esforços resistentes da estrutura, devemos realizar uma comparação entre eles para que a solicitação seja menor que a capacidade resistente desta estrutura.

Como pode ser visto no Capítulo 3, os esforços solicitantes das vigas são:

- a) **Viga V2CX da Elevação 13500:** $M_{sd} = 422 \text{ kNcm}$;
- b) **Viga V2C da Elevação 12000:** $M_{sd} = 5850 \text{ kNcm}$;
- c) **Viga V2AM da Elevação 3000 a 9000:** $M_{sd} = 13860 \text{ kNcm}$;
- d) **Vigas do Pórtico:** $M_{sd} = 1515 \text{ kNcm}$;
- e) **Pilares do Pórtico:** $M_{sd} = 866,09 \text{ kNcm}$;

$$N_{sd} = 405,92 \text{ KN.}$$

Como pode ser visto no Capítulo 4, os esforços resistentes das vigas são:

- 1) **Vigas – Largura Efetiva:** $M_{rd} = 1336,5 \text{ kNcm}$;
- 2) **Vigas – Seção Efetiva:** $M_{rd} = 3494,64 \text{ kNcm}$;
- 3) **Vigas FLT – Largura Efetiva:** $M_{rd} = 1320 \text{ kNcm}$;
- 4) **Vigas FLT – Seção Efetiva:** $M_{rd} = 3381,85 \text{ kNcm}$;
- 5) **Pilares Compressão – Largura Efetiva:** $N_{rd} = 216,67 \text{ kN}$;
- 6) **Pilares Compressão – Seção Efetiva:** $N_{rd} = 174,78 \text{ kN}$;
- 7) **Pilares Flexão – Largura Efetiva:** $M_{rd} = 1031,6 \text{ kNcm}$;
- 8) **Pilares Flexão – Seção Efetiva:** $M_{rd} = 2872,88 \text{ kNcm}$.

Devemos fazer ainda, para o caso dos pilares, a verificação da barra submetida à flexão composta.

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

$$\frac{405,92}{174,78} + \frac{866,09}{1031,6} + \frac{0}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

$3,16 > 1,0$ Não Passam!

No caso das vigas, podemos notar que apenas a viga V2CX da elevação 13500 tem esforço solicitante menor que o esforço resistente, pois $422 \text{ kNcm} < 1320 \text{ kNcm}$. As demais vigas apresentaram esforços superiores ao permitido. Logo, o perfil das vigas V2C da elevação 12000, V2AM da elevação 3000 a 9000, e das vigas do pórtico é inadequado para os esforços existentes. Uma solução seria a alteração do projeto, com definição de menores vãos de cálculo, ou a utilização de vigas mistas de aço e concreto.

Já no caso dos pilares, embora o esforço fletor solicitante seja menor que o esforço resistente, a força axial resistente é muito inferior ao esforço solicitante. Logo, na verificação de flexão composta, podemos notar que o perfil não é adequado para os pilares. Uma solução plausível seria a troca do perfil por um perfil com maior inércia.

Referências Bibliográficas

NBR 6120:1980 – Cargas para cálculo de estruturas e edificações.

NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações.

NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

AISC – American Institute of Steel Construction = 13ª/05

AWS – American Welding Society-Structural Welding Code D 1.1/05

INSTITUTO AÇO BRASIL. Edifícios de Pequeno Porte Estruturados em Aço. Rio de Janeiro, 2011.