

MAURICIO MARROQUE PEREIRA DE SOUZA

TRABALHO PRÁTICO:  
EDIFÍCIOS DE PEQUENO PORTE  
ESTRUTURADOS EM AÇO

MAURICIO MARROQUE PEREIRA DE SOUZA

Belo Horizonte  
Setembro de 2014

TRABALHO PRÁTICO:  
EDIFÍCIOS DE PEQUENO PORTE  
ESTRUTURADOS EM AÇO

Trabalho final do Curso de Especialização  
em Estruturas da Escola de Engenharia da  
Universidade Federal de Minas Gerais.

Professor: Prof. Dr. Francisco Carlos  
Rodrigues

Belo Horizonte  
Setembro de 2014

## SUMÁRIO

<b>Sumário .....</b>	<b>3</b>
<b>1. OBJETIVO .....</b>	<b>5</b>
<b>2. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS.....</b>	<b>6</b>
<b>3. Documentos de Referencia .....</b>	<b>7</b>
<b>4. Descrição da estrutura.....</b>	<b>8</b>
4.1. Características do Edifício .....	8
4.2. Sistema Estrutural .....	10
4.2.1. Plano das Vigas e Terças .....	10
4.2.2. Elevações .....	12
4.2.3. Isométrica .....	14
4.3. Ações .....	15
4.3.1. Distribuição dos Carregamentos.....	15
4.3.2. Cargas Devido ao Vento (CV) – NBR 6123 .....	21
4.3.3. Força Nocional.....	25
4.4. Carregamentos Lançados no SAP 2000 .....	26
4.5. Combinações de Cargas .....	30
4.6. Critério de Redução das Cargas Acidentais.....	30
4.7. Vibração .....	30
4.8. Deslocamento Máximo.....	30
<b>5. ESFORÇOS SOLICITANTES DA ESTRUTURA.....</b>	<b>32</b>
5.1. Resultados do SAP .....	34
5.1.1. Momento Fletor.....	34
5.1.2. Força Axial.....	37
<b>6. Dimensionamento das Vigas – Perfil CX 402x202x25x3,35mm.....</b>	<b>38</b>
6.1. Flexão.....	38
6.1.1. Método da Largura Efetiva.....	38
6.2. Método da Seção Efetiva .....	46
6.2.1. Momento calculado com base na flambagem lateral com torção .....	46
6.2.2. Método da Seção Efetiva .....	48
<b>7. Dimensionamento dos Pilares–Ue 402x202x25x3,35 .....</b>	<b>51</b>
7.1. Compressão .....	51
7.1.1. Método da Largura Efetiva.....	51
7.1.2. Método da seção efetiva.....	55
7.1.3. Método da Resistência Direta .....	55
7.2. Flexão.....	57
7.2.1. Método da Largura Efetiva.....	57
7.2.2. Método da Seção Efetiva .....	64
7.2.3. Momento calculado com base na flambagem lateral com torção (FLT).....	65
<b>8. Análise e discussão dos Resultados.....</b>	<b>69</b>
8.1. Vigas .....	69
8.1.1. Resistência a Flexão.....	69
8.2. Pilares .....	70

8.2.1. Resistência a Flexão.....	70
8.2.2. Resistência a Compressão .....	70
8.2.3. Verificação Flexo-Compressão .....	70
<b>9. Conclusões .....</b>	<b>73</b>

## 1. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo fazer o dimensionamento de um edifício utilizando Perfis Formados a Frio. Para a realização das análises foram utilizados os programas SAP2000 e o software *CUFSM*.

## 2. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

As seguintes características foram utilizadas para o dimensionamento dos perfis.

- Aço

Modulo de Elasticidade do Aço  $E=20000\text{kN/cm}^2$

Módulo Transversal  $G=7700\text{kN/cm}^2$

Coefficiente de Poisson  $\nu=0,3$

Resistência ao Escoamento  $F_y = 23\text{kN/cm}^2$

### **3. DOCUMENTOS DE REFERENCIA**

- Manual de Construção em aço – Edifícios de Pequeno Porte Estruturas em Aço;
- Apostila de Projetos de Estruturas de Aço com Perfis Formado a Frio – Curso de Especialização em Estruturas – DEES – UFMG 2012;
- NBR 6355:2003 – Perfis Estruturais de Aço Formado a Frio – Padronização;
- NBR 14762:2012 – Dimensionamento de Estruturas de Aço constituídas por Perfis Formados a Frio;
- AISC – American Institute of Steel Construction;
- AWS – American Welding Society – Structural Welding Code D 1.1/05;
- Catalogo de Perfis de Aço – Metform.

## 4. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

### 4.1. CARACTERÍSTICAS DO EDIFÍCIO

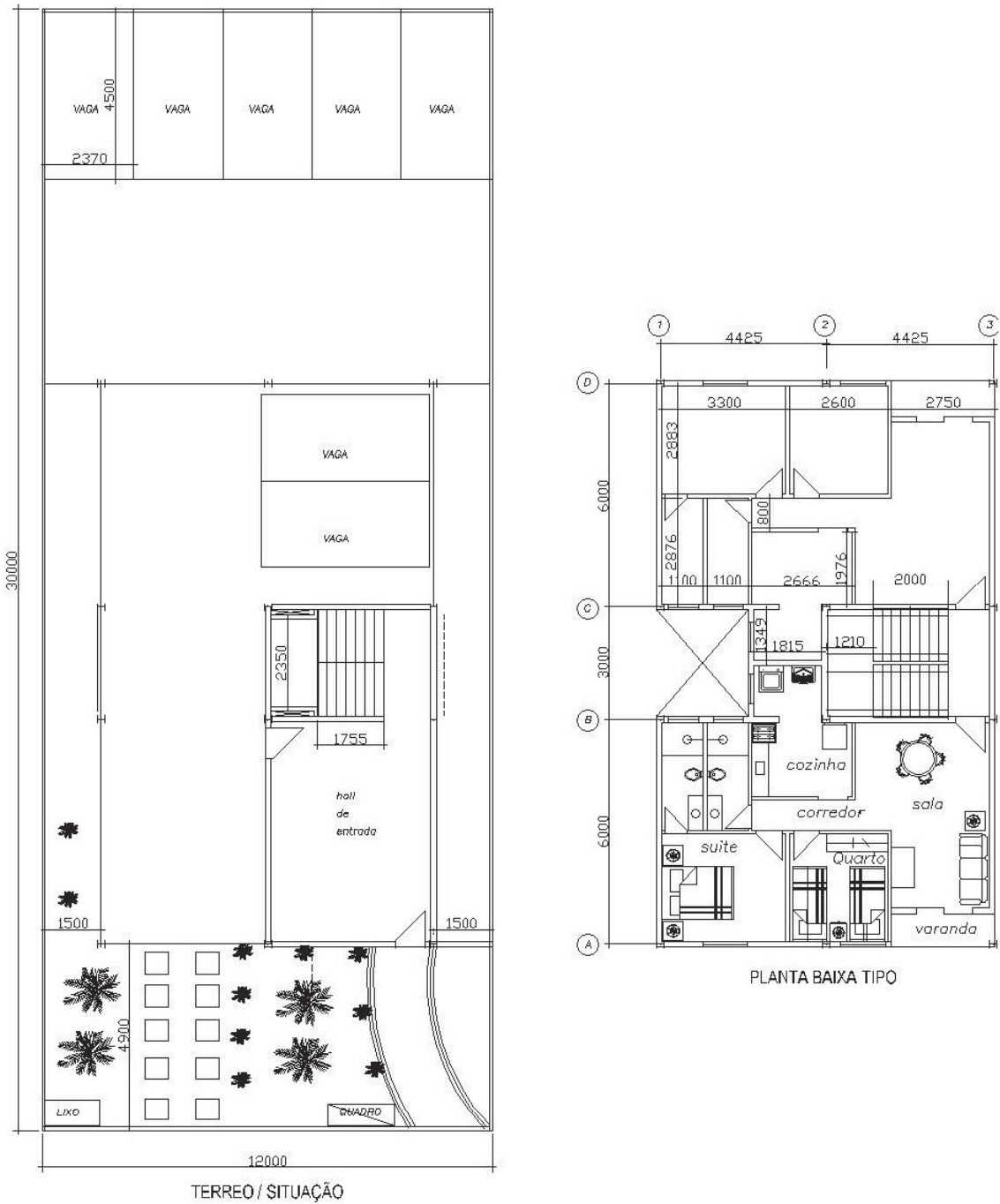
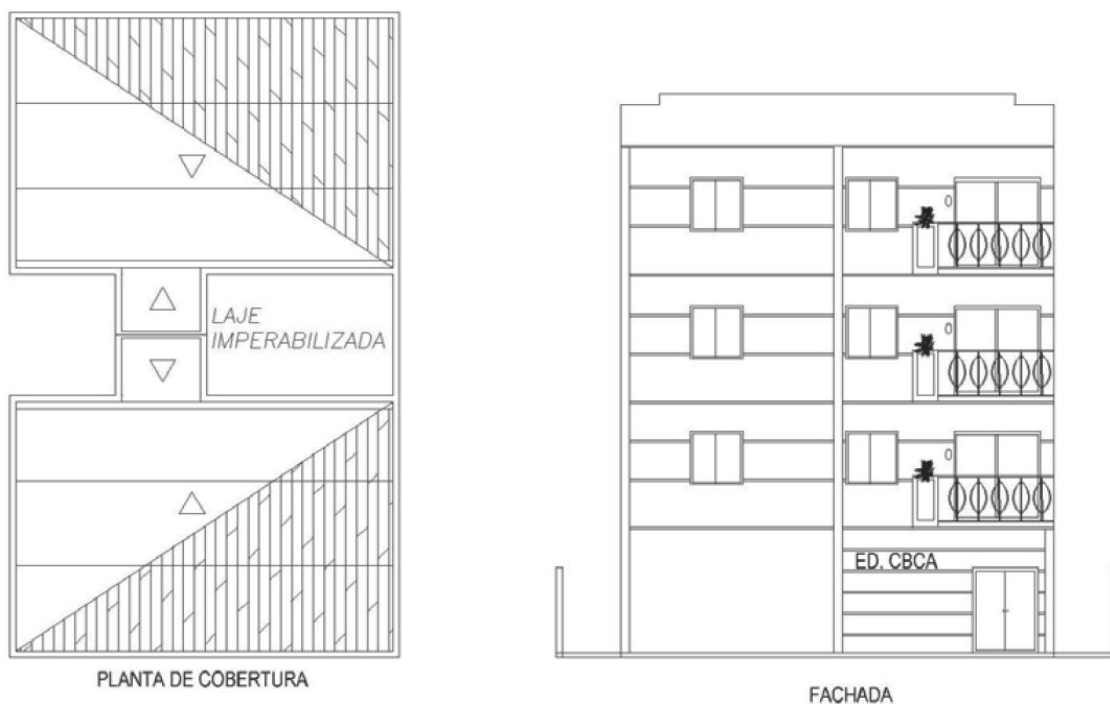


Figura 1– Planta Situação e Planta Pavimento Tipo





**Figura 2**– Plantas Cobertura e Fachada

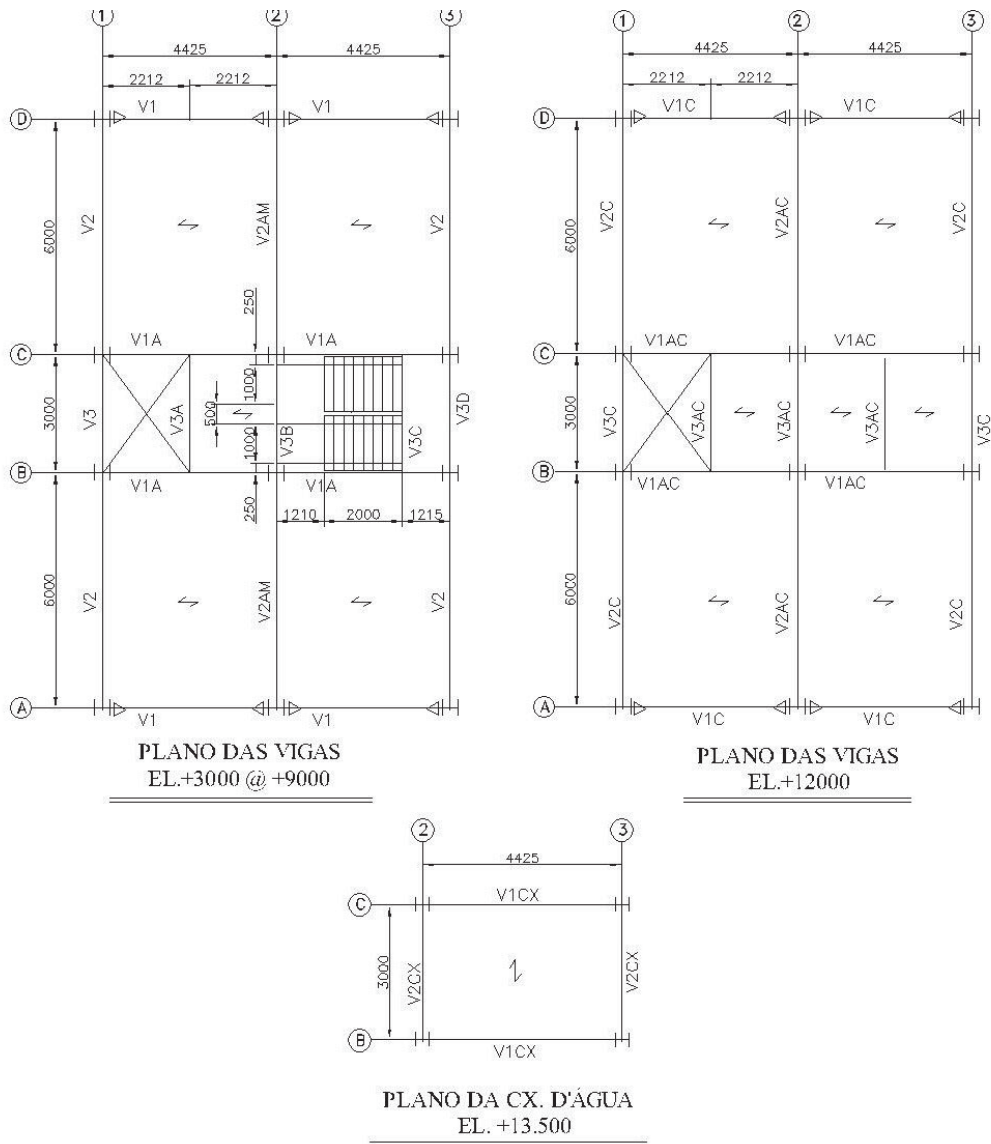
**Tabela 1** – Dados Gerais do Edifício

<b>Dados Gerais</b>	
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 <sup>2</sup>

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



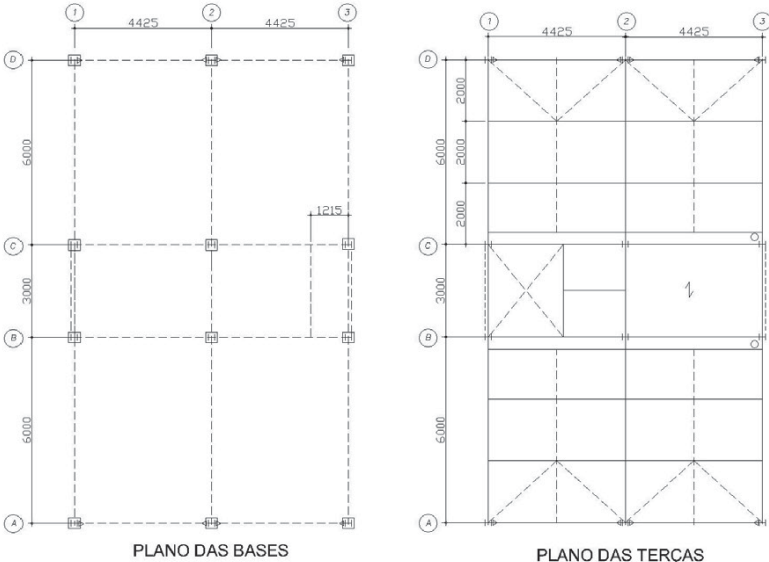
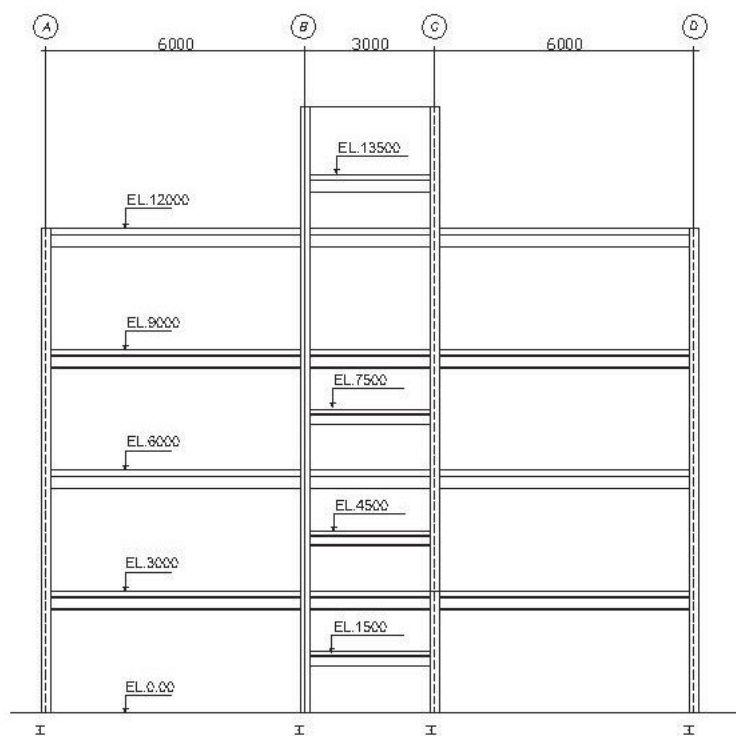
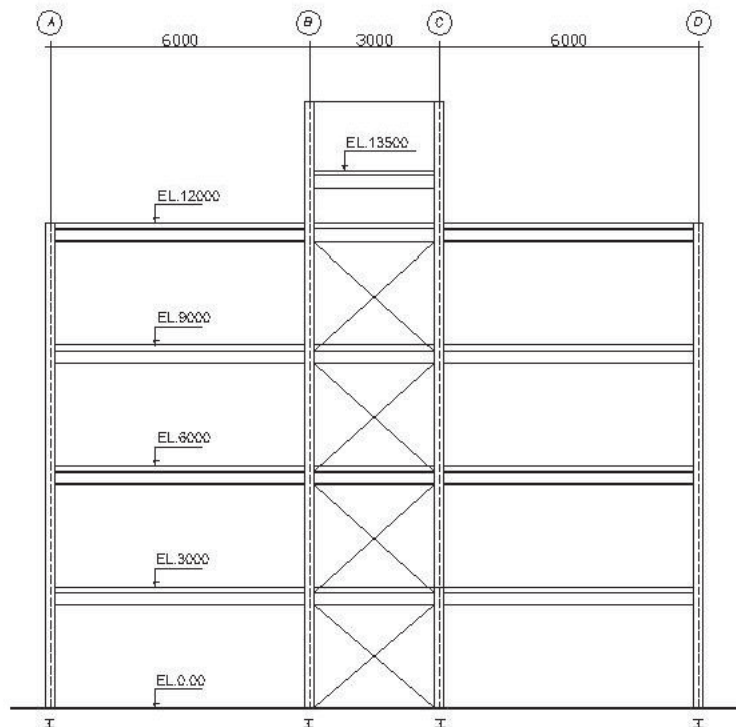


Figura 3 – Plano das Vigas e Terças

4.2.2. Elevações

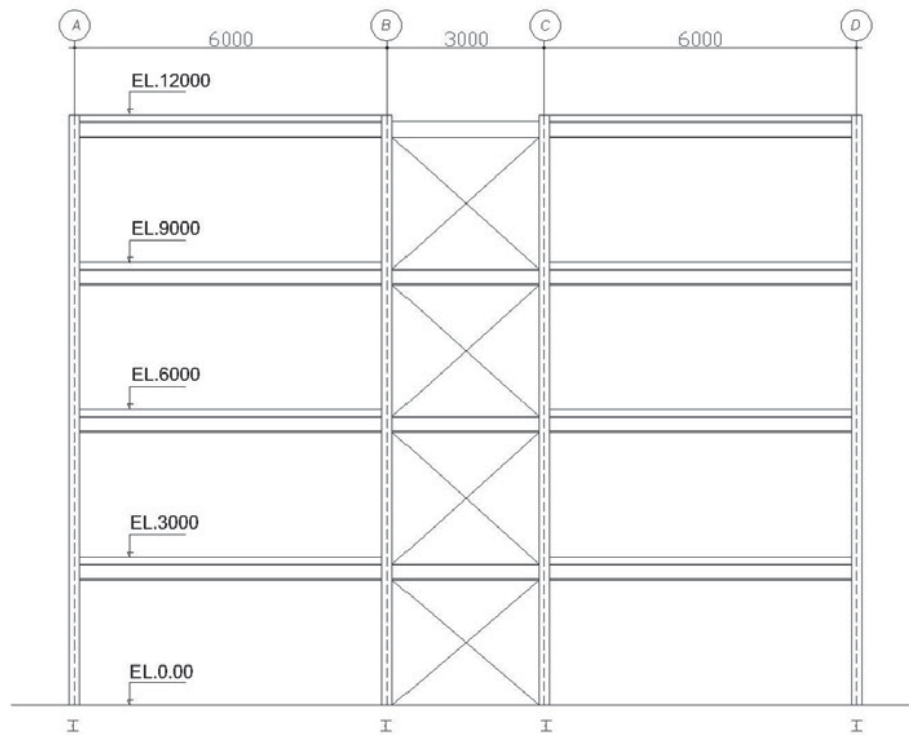


ELEVAÇÃO EIXO 2



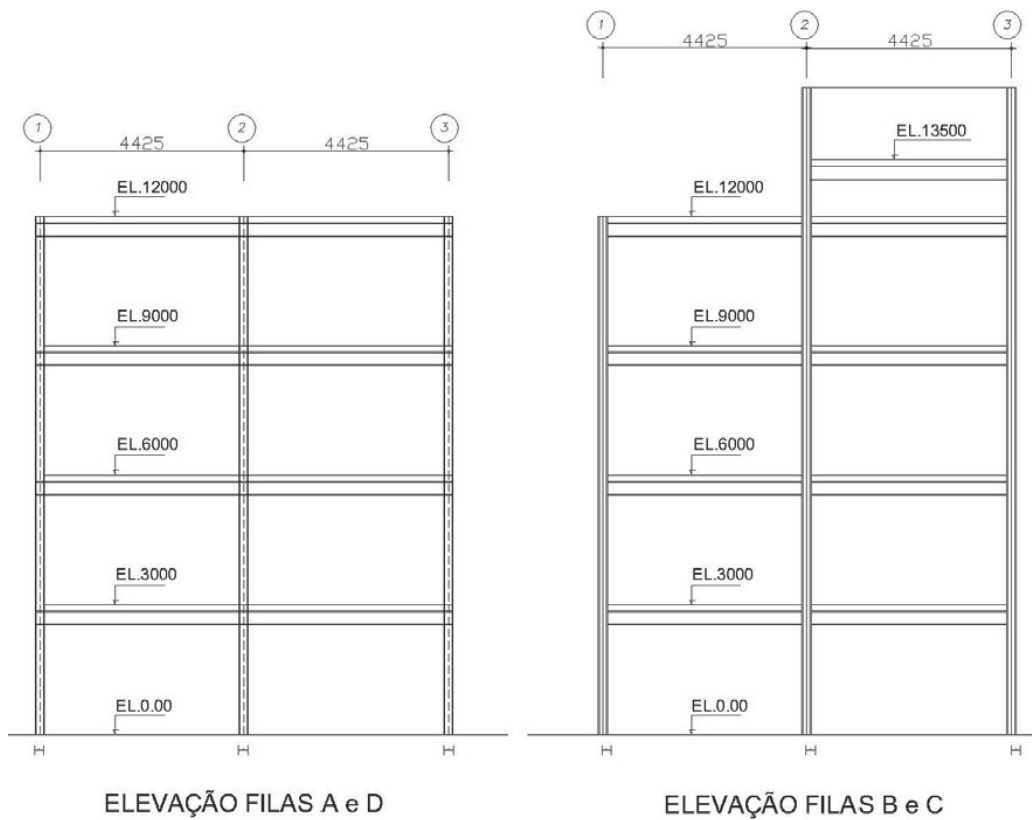
ELEVAÇÃO EIXO 3

Figura 4 – Elevação Eixos 2 e 3



ELEVAÇÃO EIXO 1

Figura 5– Elevação Eixo 1



ELEVAÇÃO FILAS A e D

ELEVAÇÃO FILAS B e C

Figura 6 – Elevações Filas A e D, B e C

4.2.3. Isométrica



Figura 7 – Isométrica

### 4.3. AÇÕES

#### 4.3.1. 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 →  $3,00$  kN/m<sup>2</sup>;
- Paredes externas (12cm+3cm revestimento) →  $1,25$  kN/m<sup>2</sup> (concreto celular);
- Parede tipo e CXD (H=2,00m) →  $2,50$  kN/m;
- Impermeabilização laje CXD →  $0,50$  kN/m<sup>2</sup>.

Ações Variáveis (CA):

- Cobertura (forro sem acesso) →  $0,50$  kN/m<sup>2</sup>;
- Caixad'água →  $12,00$  kN/m<sup>2</sup>.

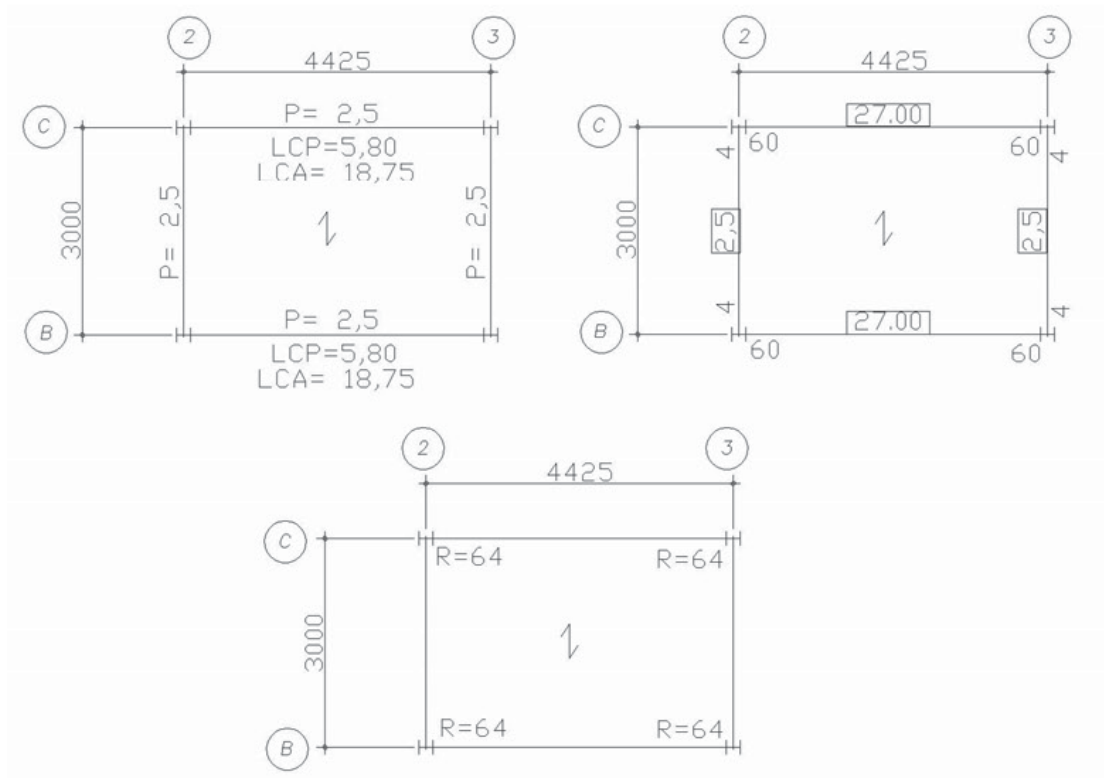


Figura 8 – Cargas nas vigas sob a caixa d'água

**b) EL. 12000**

Ações Permanentes Diretas (CP):

- Laje maciça de  $t_c=10$  cm  $\rightarrow 2,50$  kN/m<sup>2</sup>;
- Forro de gesso  $\rightarrow 0,15$  kN/m<sup>2</sup>;
- Paredes externas (12cm+3cm revestimento)  $\rightarrow 1,25$  kN/m<sup>2</sup> (concreto celular);
- Parede cobertura (H=1,35m)  $\rightarrow 1,70$  kN/m;
- Telhado + terço + tirante  $\rightarrow 0,15$  kN/m<sup>2</sup>.

Ações Variáveis (CA):

- Cobertura (forro sem acesso)  $\rightarrow 0,50$  kN/m<sup>2</sup>.

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/m<sup>2</sup>;
- Paredes internas em “Dry Wall”  $\rightarrow 0,30$  kN/m<sup>2</sup>;
- Revestimento piso  $\rightarrow 0,50$  kN/m<sup>2</sup>;
- Forro gesso  $\rightarrow 0,15$  kN/m<sup>2</sup>;
- Paredes externas (12cm+3cm revest)  $\rightarrow 1,25$  kN/m<sup>2</sup> (concreto celular);
- Parede andar tipo (H=2,70)  $\rightarrow 3,40$  kN/m;
- Degrau + corrimão + estrutura escada + laje patamar  $\rightarrow 2,50$  kN/m<sup>2</sup>;
- Corredor e hall  $\rightarrow 3,00$  kN/m<sup>2</sup>.

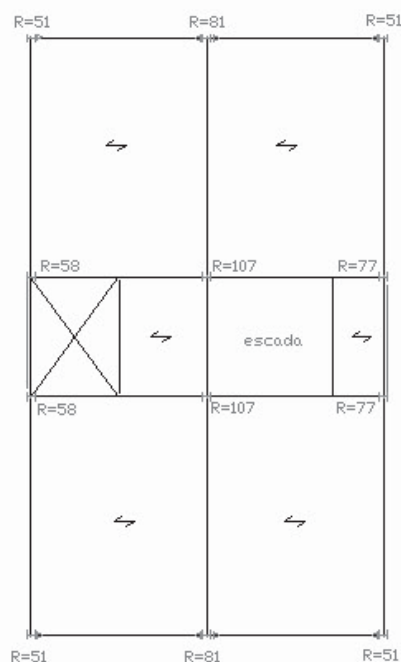
Ações Variáveis (CA):

- Piso tipo (apartamentos)  $\rightarrow 1,50$  kN/m<sup>2</sup>;
- Área de serviço  $\rightarrow 2,00$  kN/m<sup>2</sup>;
- Escadas / hall / corredor  $\rightarrow 3,00$  kN/m<sup>2</sup>.

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.



**Figura 10 – Cargas nas vigas do pavimento tipo**

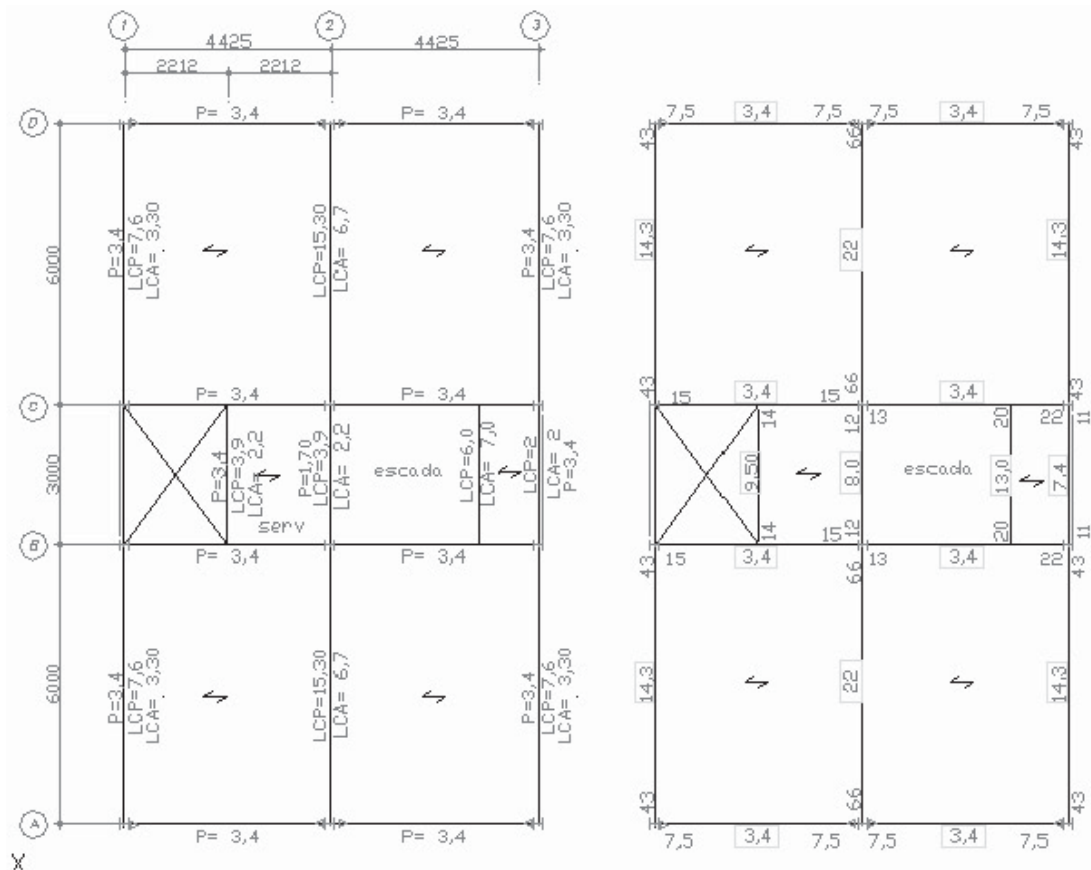


Figura 11 – Cargas nas vigas do pavimento tipo

**d) EL. 1500, 4500 e 7500**

**Ações Permanentes Diretas (CP)**

- Degrau + corrimão + estrutura escada + laje patamar → 2,50 kN/m<sup>2</sup>.

**Ações Variáveis (CA)**

- Escadas → 3,00kN/m<sup>2</sup>.

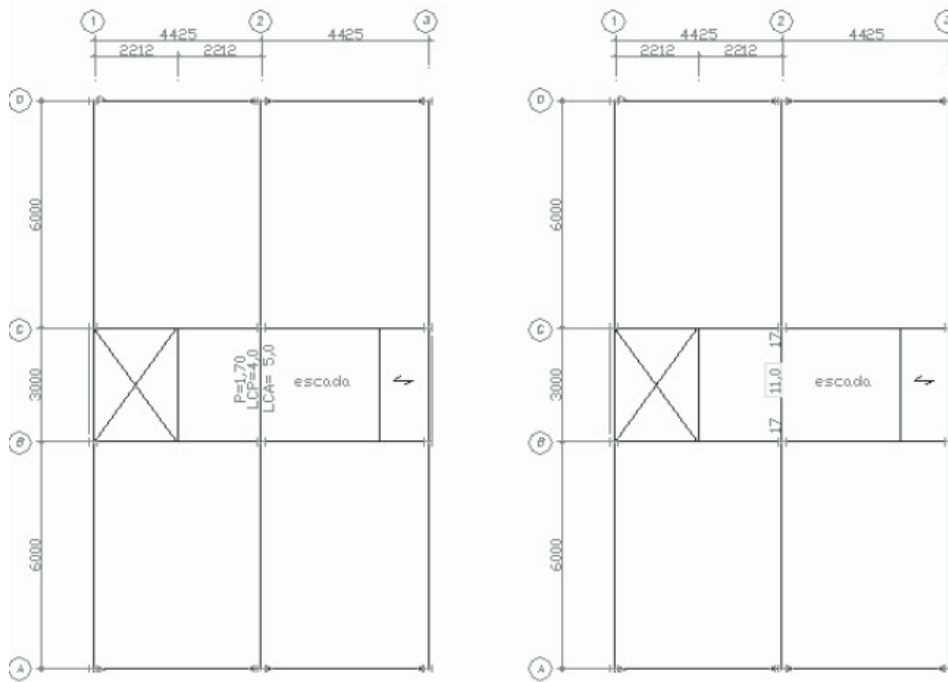


Figura 12 – Cargas nas vigas da escada

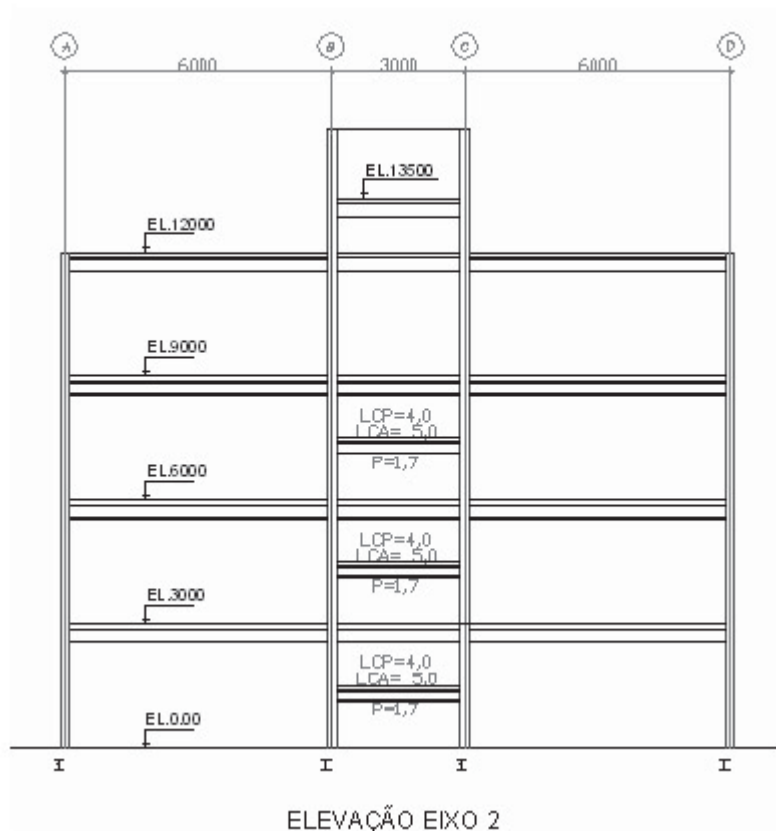


Figura 13 – Cargas nas vigas intermediárias

4.3.2. 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;
- $S_2 = \text{NBR 6123 Tabela 2 CAT IV – Classe A}$ ;
- $S_2 = b \times F_r \times (Z/10)^p$ .

**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)  $\text{N/m}^2$ .

**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

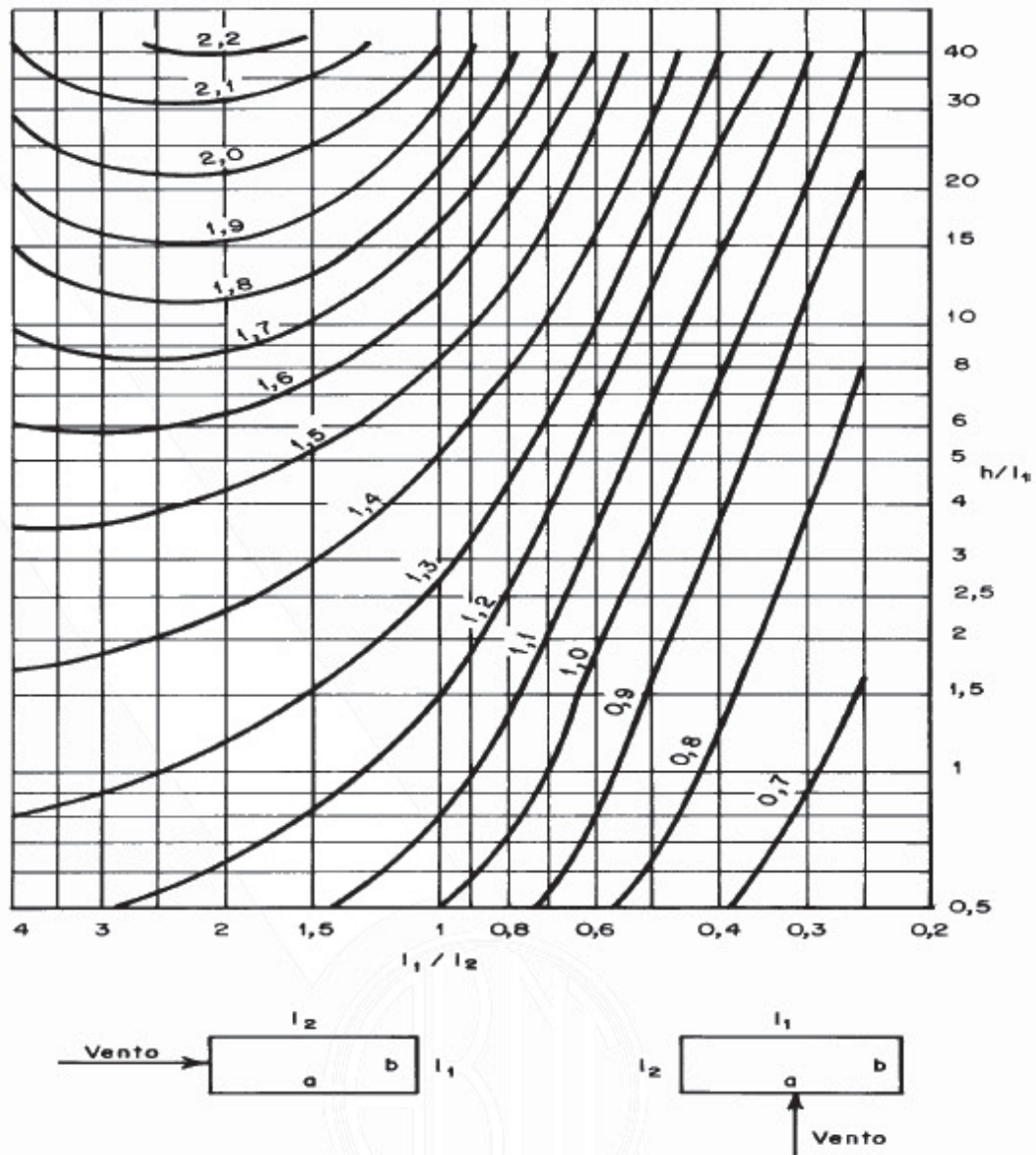


Figura 14 – Coeficiente de arrasto  $C_a$  para edificações paralelepípedicas

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

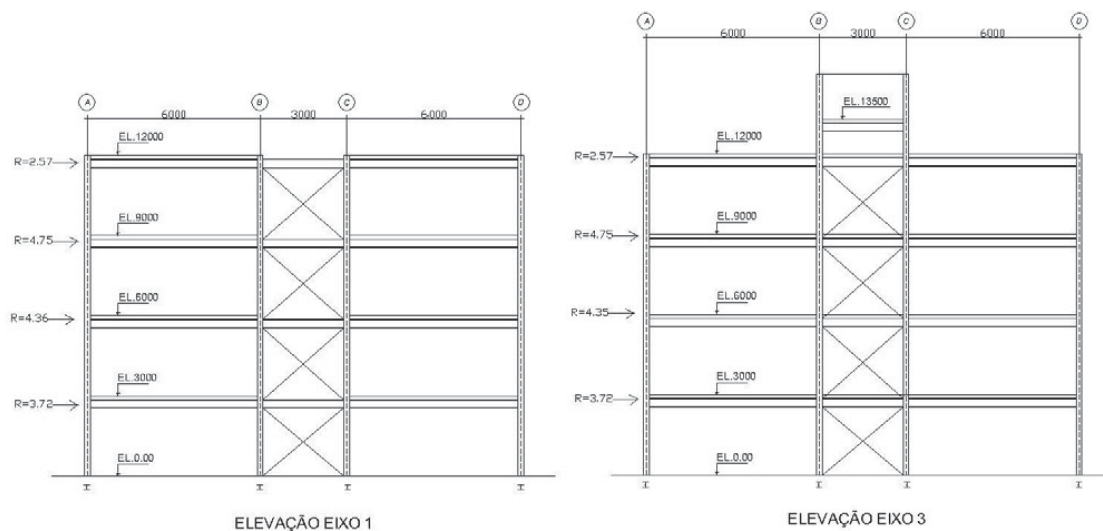
$C_a$  – Coeficiente de arrasto;

$q_k$  – 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 <sup>2</sup> )	Ca	Ae(m <sup>2</sup> )	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 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 <sup>2</sup> )	Ca	Ae1(m <sup>2</sup> )	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 <sup>2</sup> )	Ca	Ae2(m <sup>2</sup> )	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

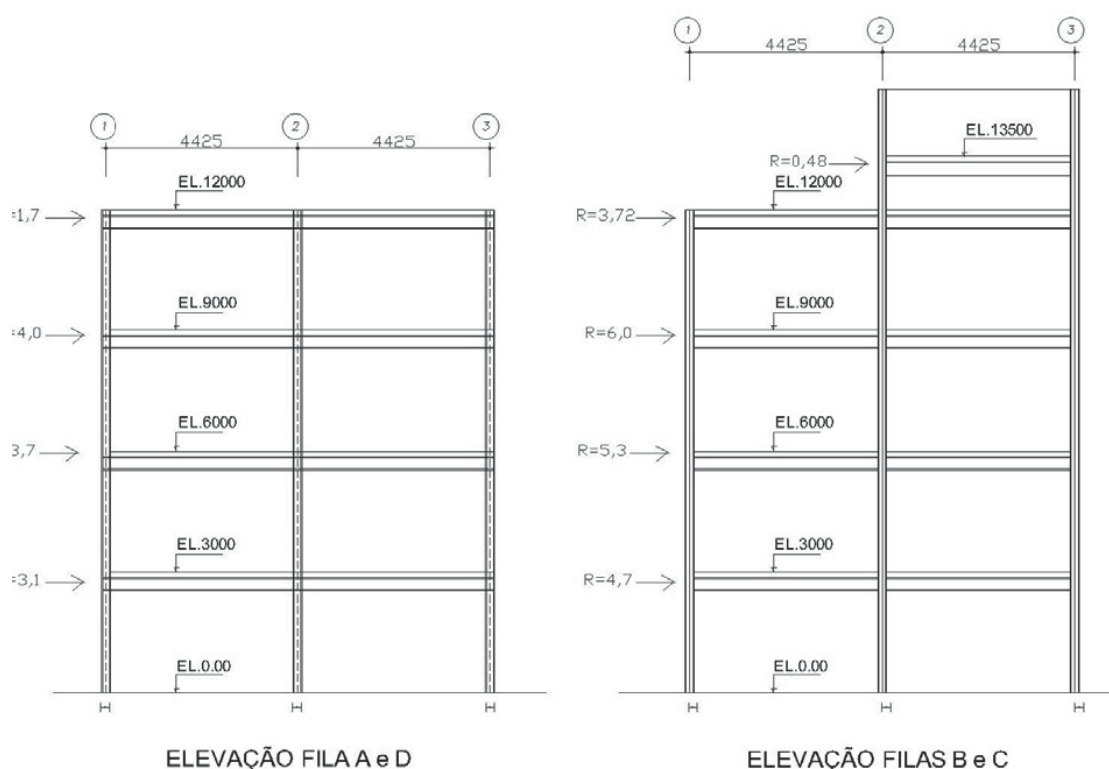
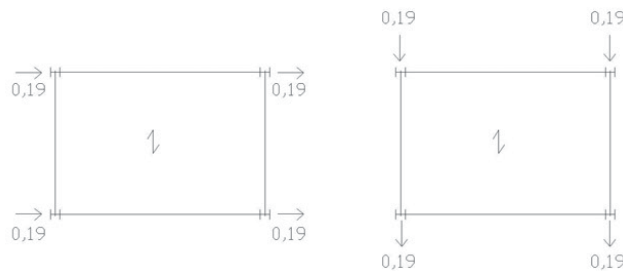


Figura 16 – Cargas Devido ao Vento Aplicadas nos Nós para as Filas A-D e B-C



4.3.3. Força Nocional

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



PLANO DAS VIGAS EL. 13500

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

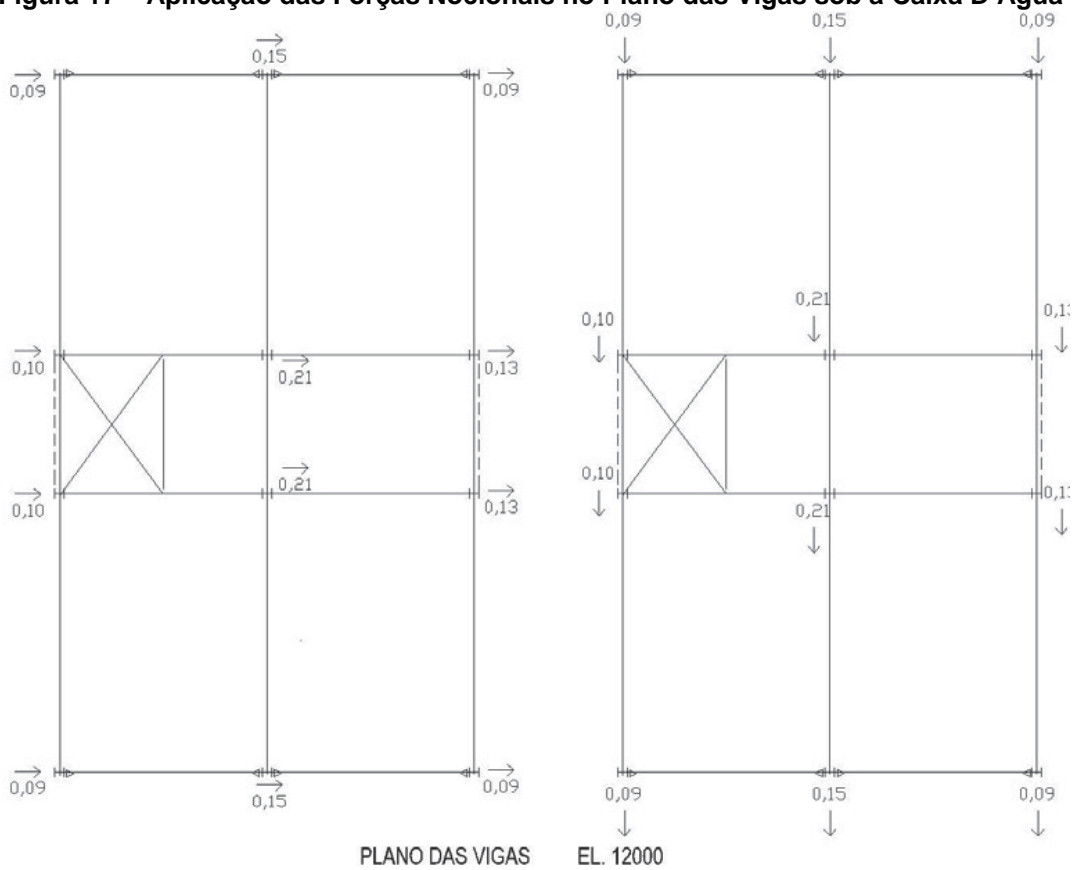


Figura 18 – Aplicação das Forças Nocionais no Plano das Vigas da Cobertura

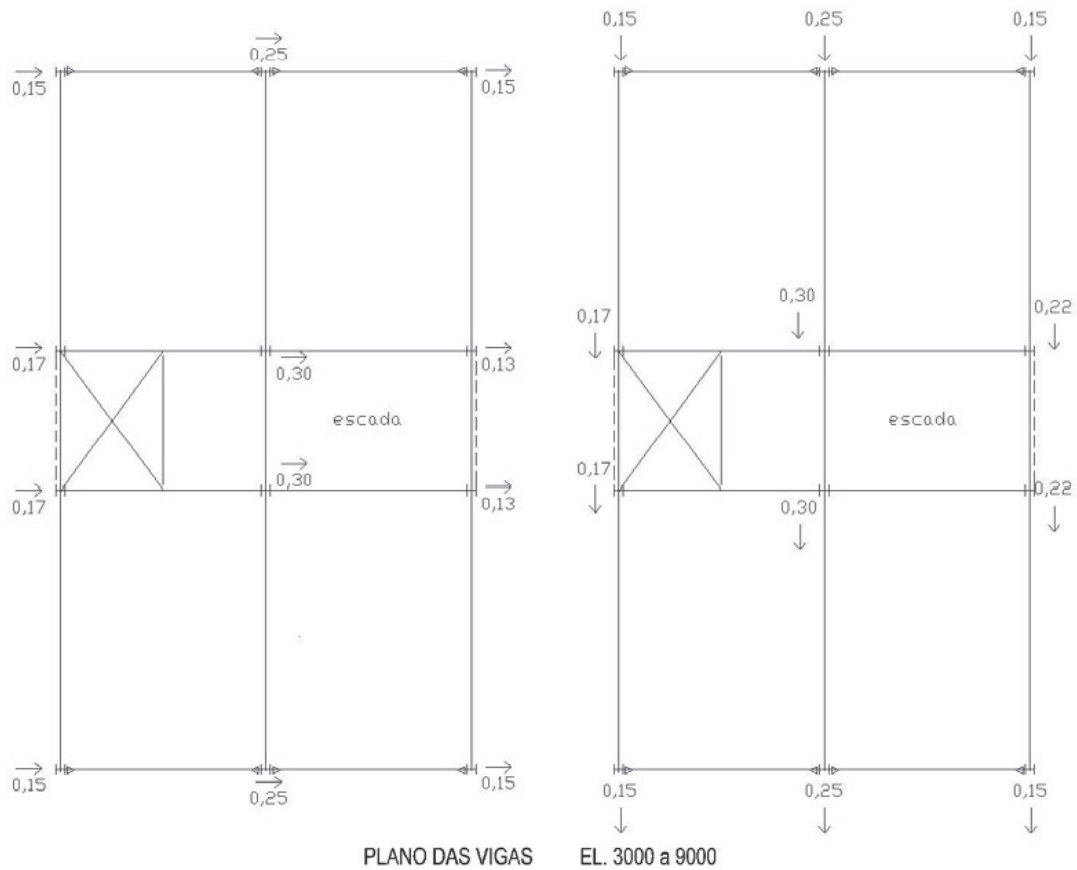


Figura 19 – Aplicação das Forças Nocionais no Plano do Pavimento Tipo

#### 4.4. CARREGAMENTOS LANÇADOS NO SAP 2000

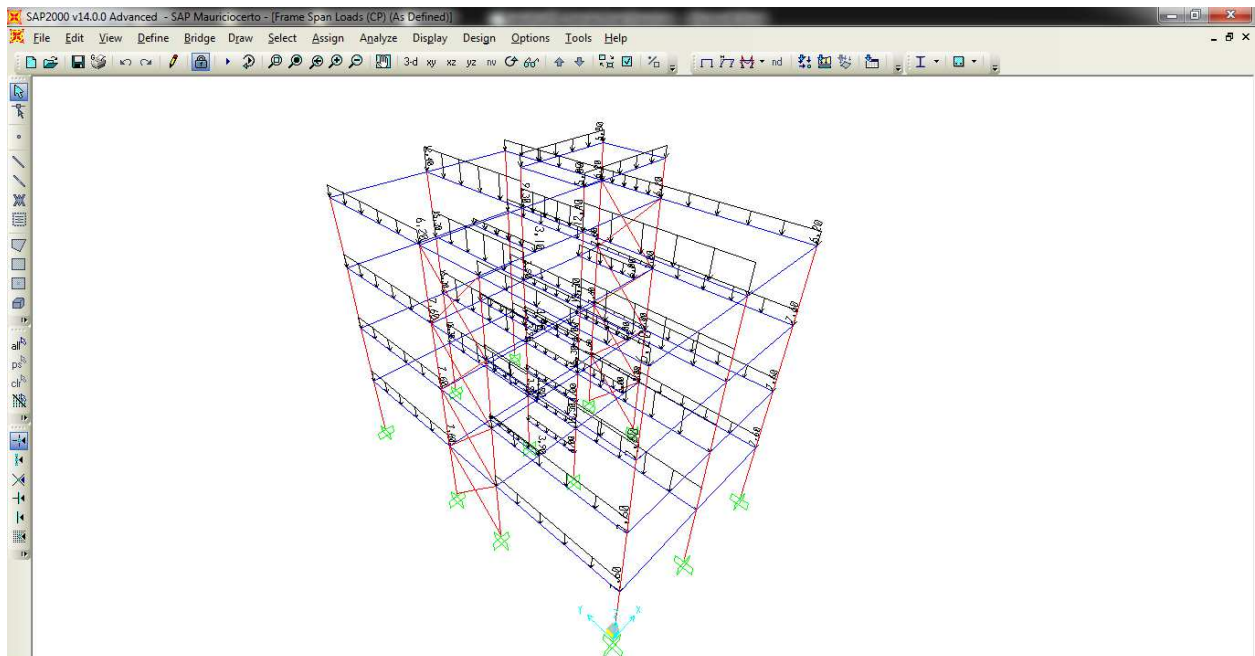
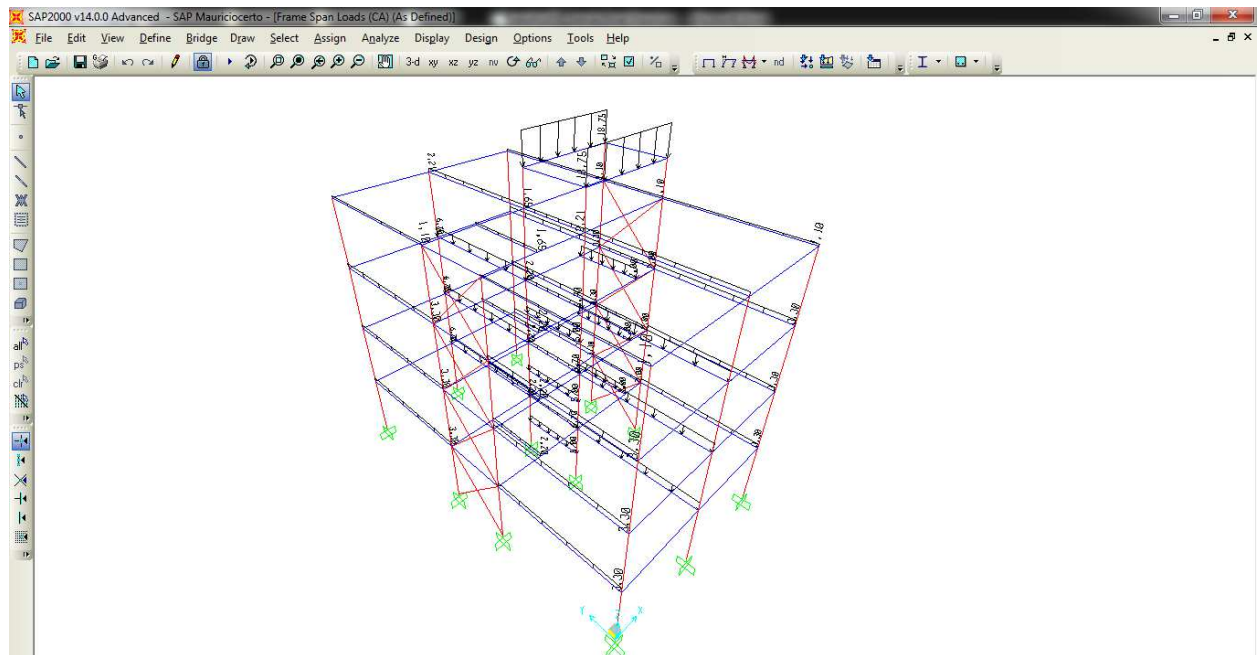
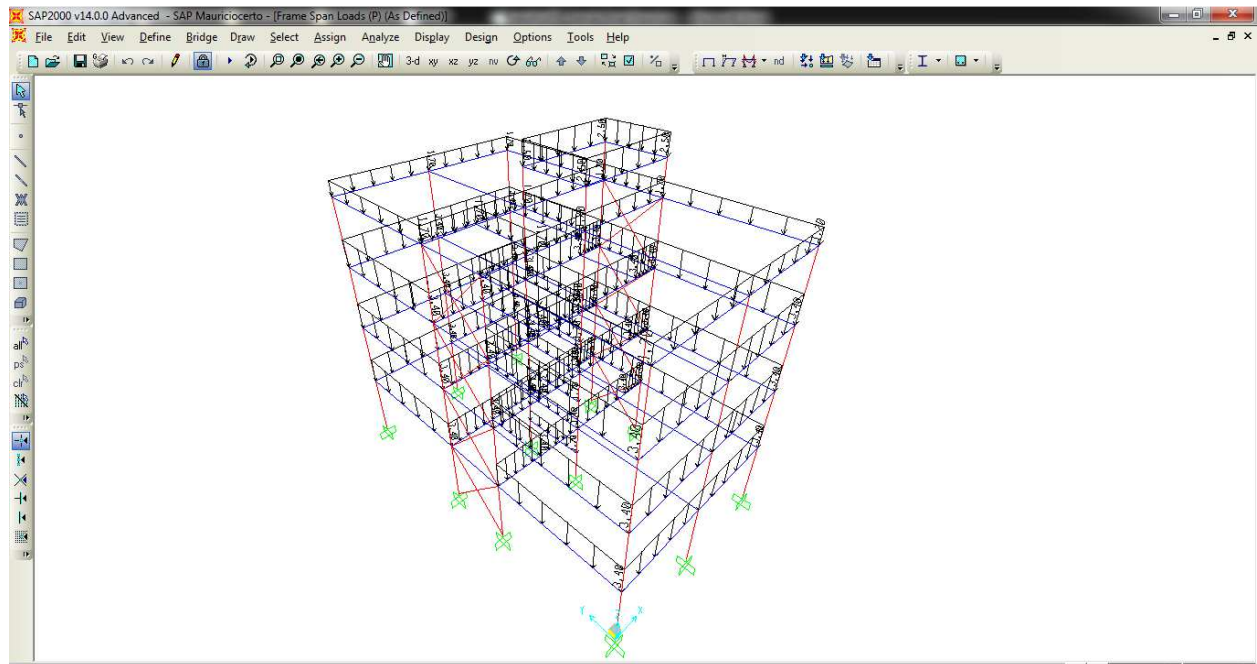


Figura 20 – SAP – Carregamentos Permanentes – Paredes (P)



**Figura 21 – SAP – Carregamentos Variáveis (CA)**



**Figura 22 – SAP – Carregamentos Permanentes – (CP)**

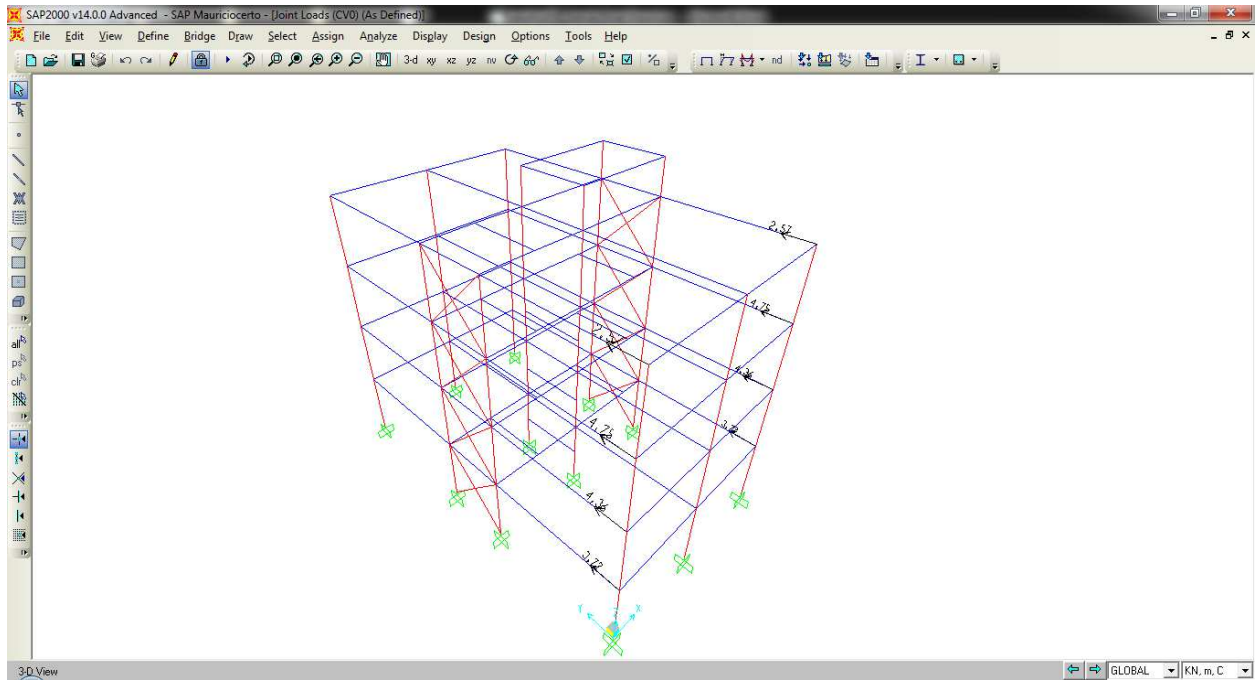


Figura 23 – SAP – Vento – (CV0)

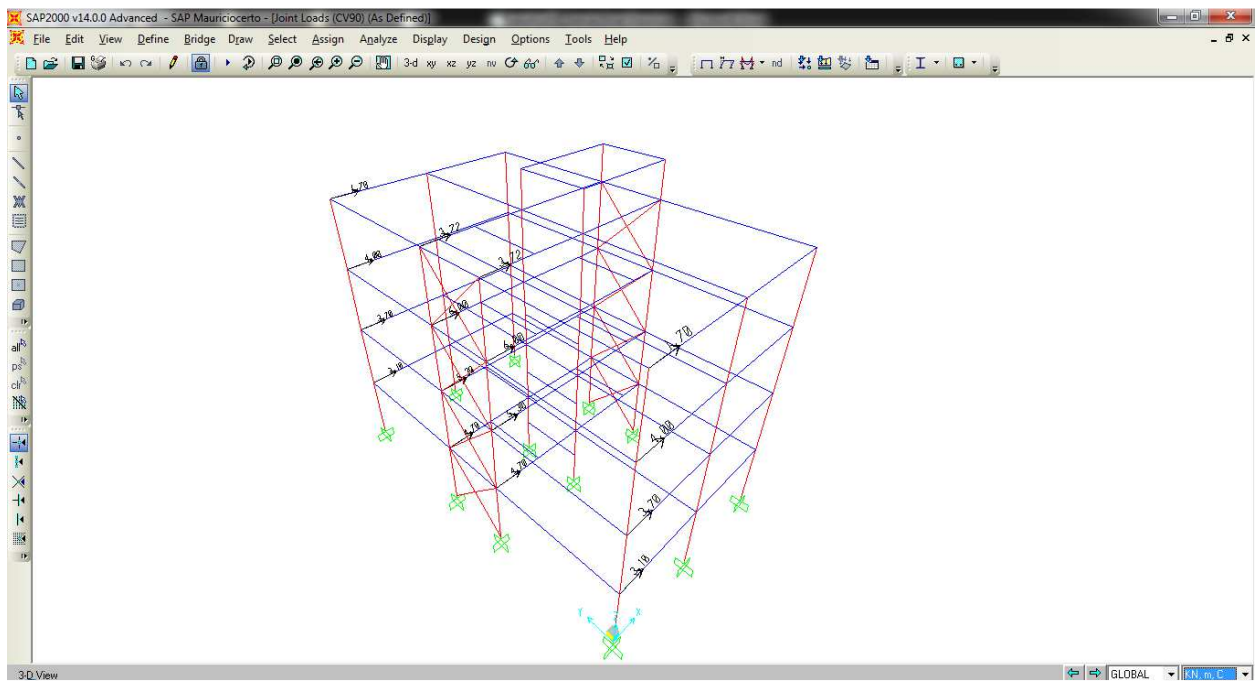


Figura 24 – SAP – Vento – (CV90)

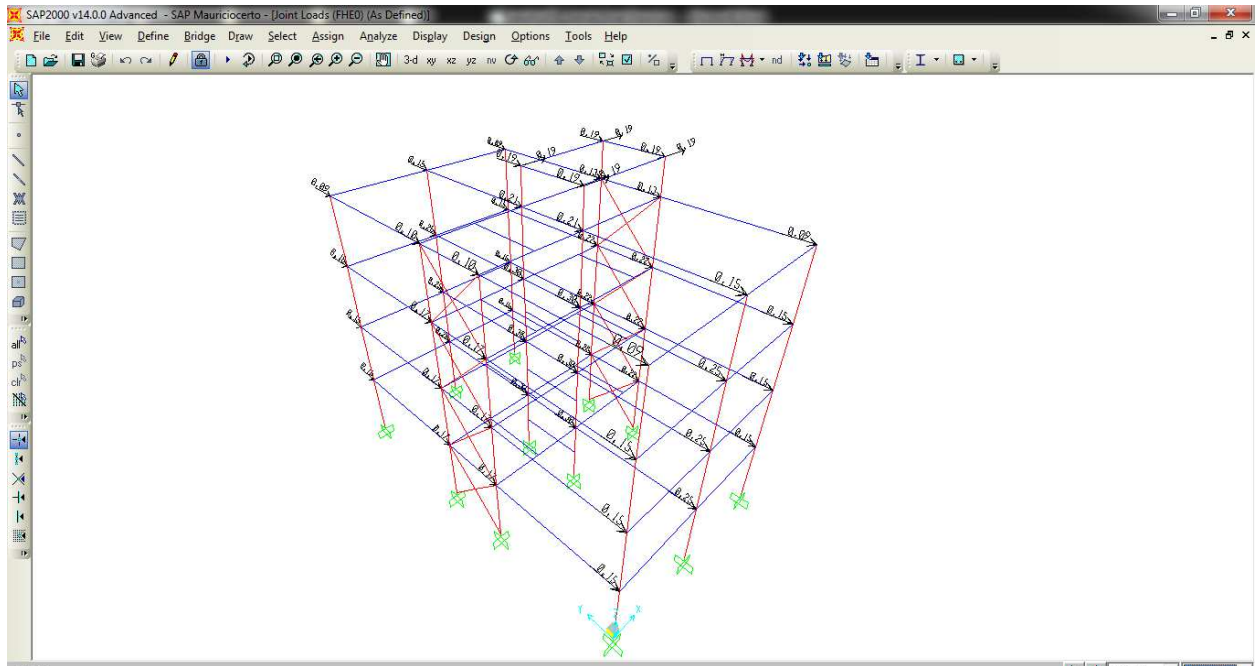


Figura 25 – SAP – Força Nocial (FHE0)

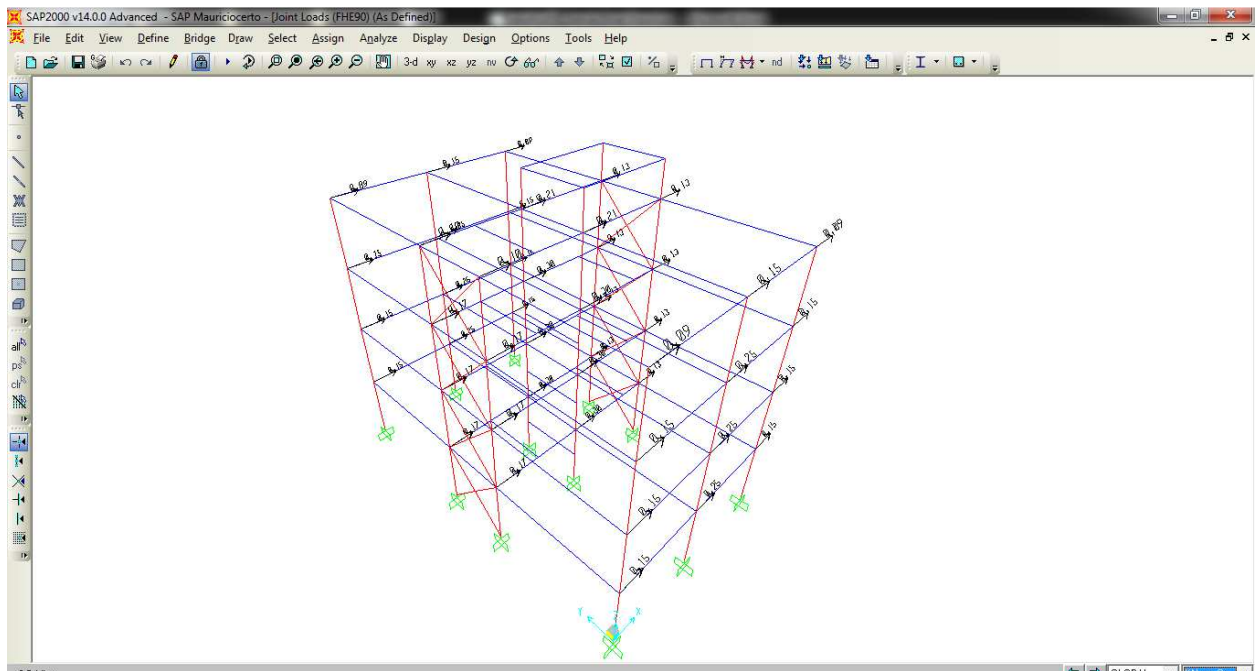


Figura 26 – SAP – Força Nocial (FHE90)

#### 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 x 0,6 = 0,84) CV0;

Combinação 4 – 1,4 CP + 1,4 CA + (1,4 x 0,6 = 0,84) CV90;

Combinação 5 – 1,4 CP + 1,4 CV0 + (1,4 x 0,5 = 0,70) CA;

Combinação 6 – 1,4 CP + 1,4 CV90 + (1,4 x 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 ( $\delta$ ):

- 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:  $\delta_1$  = deslocamento devido a CP,  $\delta_2$  = deslocamento devido a CP longa duração, e  $\delta_3$  = deslocamento devido às seções variáveis.

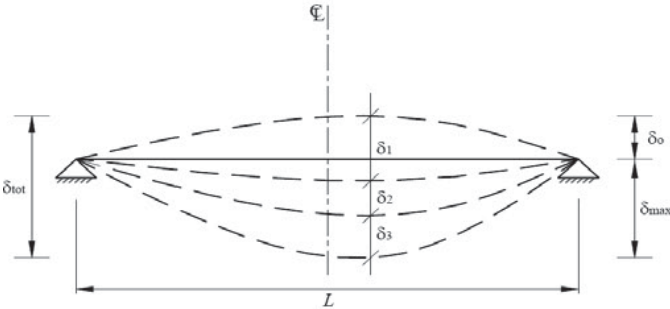


Figura 27 – Representação dos deslocamentos

## 5. ESFORÇOS SOLICITANTES DA ESTRUTURA

O prédio foi analisado no SAP2000 considerando uma análise de segunda ordem. Os dados de entrada das seções das vigas e dos pilares foram obtidos através do catálogo da Metform e suas características são mostrados nas figuras a seguir.

Property Data			
Section Name: C402x202x25x3.35			
Properties:			
Cross-section (axial) area	4.227E-03	Section modulus about 3 axis	0.
Torsional constant	7.036E-05	Section modulus about 2 axis	0.
Moment of Inertia about 3 axis	9.579E-05	Plastic modulus about 3 axis	4.765E-04
Moment of Inertia about 2 axis	3.040E-05	Plastic modulus about 2 axis	3.010E-04
Shear area in 2 direction	0.	Radius of Gyration about 3 axis	0.1505
Shear area in 3 direction	0.	Radius of Gyration about 2 axis	0.0848

Figura 28 - Características da Vigas

Property Data			
Section Name: C402x202x25x3.35			
Properties:			
Cross-section (axial) area	4.227E-03	Section modulus about 3 axis	0.
Torsional constant	1.581E-08	Section modulus about 2 axis	0.
Moment of Inertia about 3 axis	9.579E-05	Plastic modulus about 3 axis	4.765E-04
Moment of Inertia about 2 axis	7.139E-06	Plastic modulus about 2 axis	7.070E-05
Shear area in 2 direction	0.	Radius of Gyration about 3 axis	0.1505
Shear area in 3 direction	0.	Radius of Gyration about 2 axis	0.0411

Figura 29 - Características dos pilares

Foi verificado também a direção da maior inércia dos pilares como mostrado na descrição da estrutura.



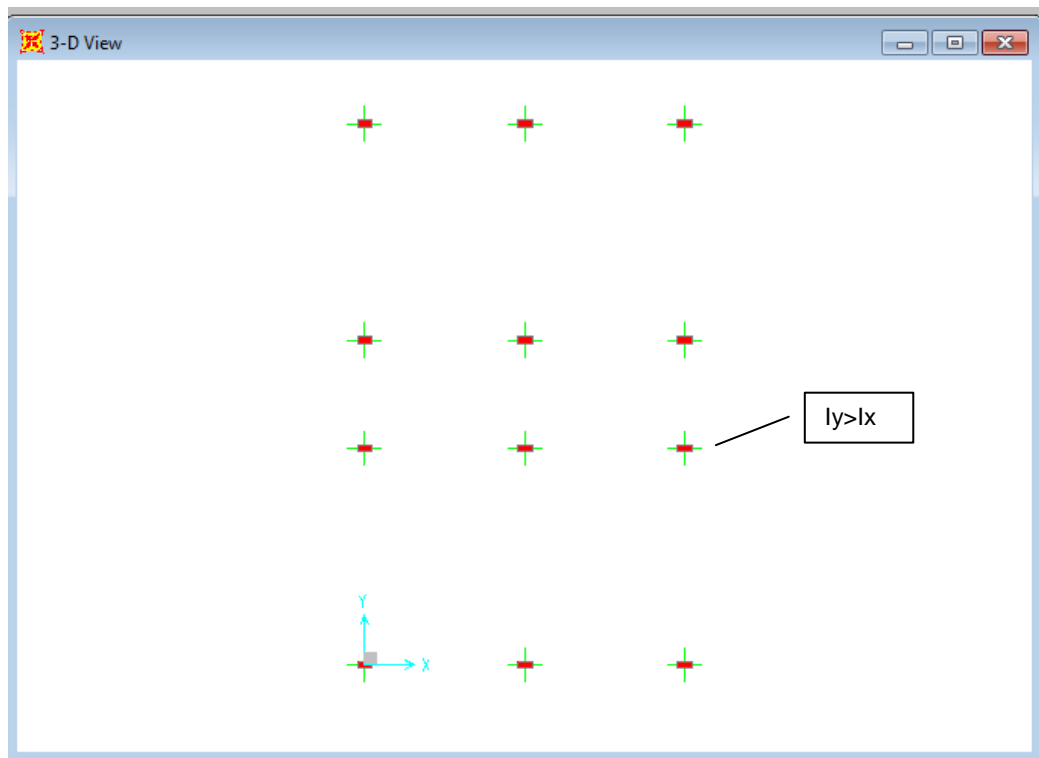


Figura 30 - Inércia dos pilares

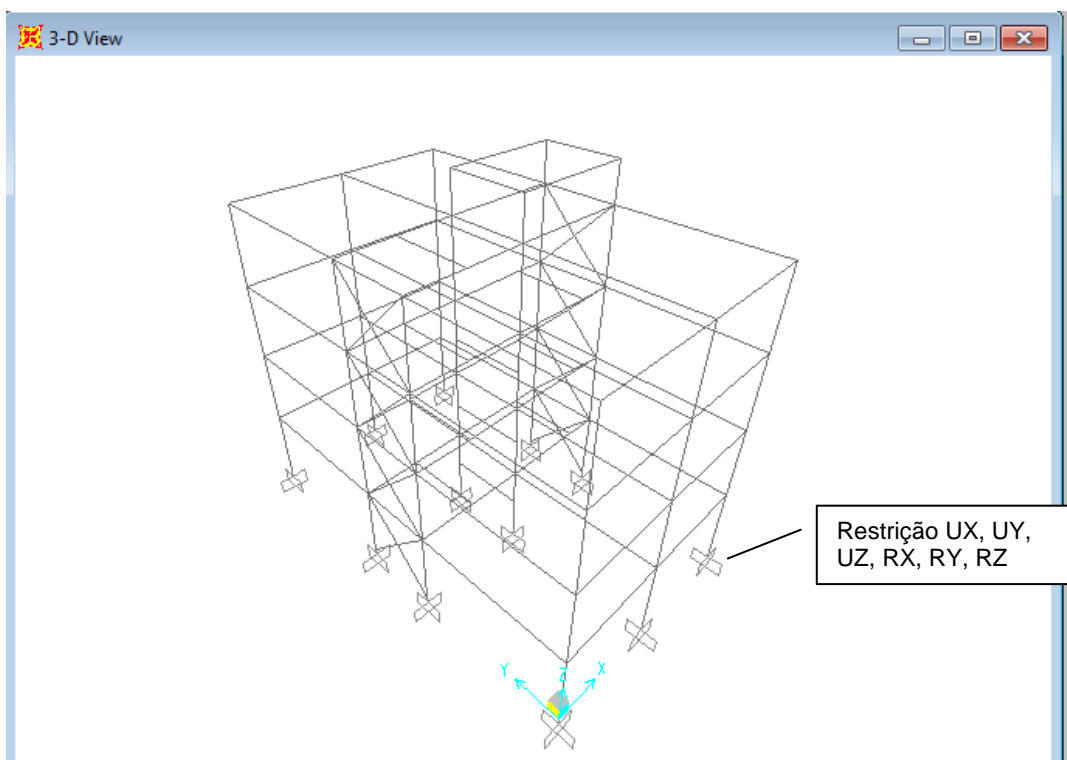


Figura 31 - Restrições Nodais

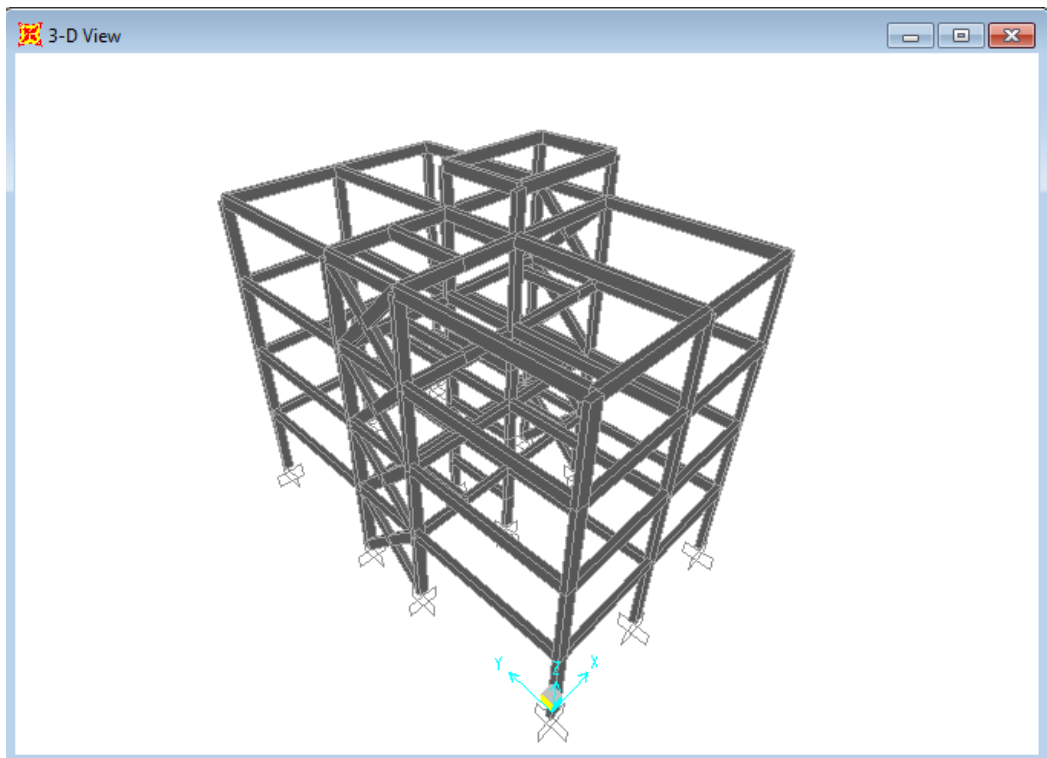


Figura 32 – Estrutura com Espessura

## 5.1. RESULTADOS DO SAP

Para a análise do SAP foram utilizados os esforços da Combinação 4.

### 5.1.1. Momento Fletor

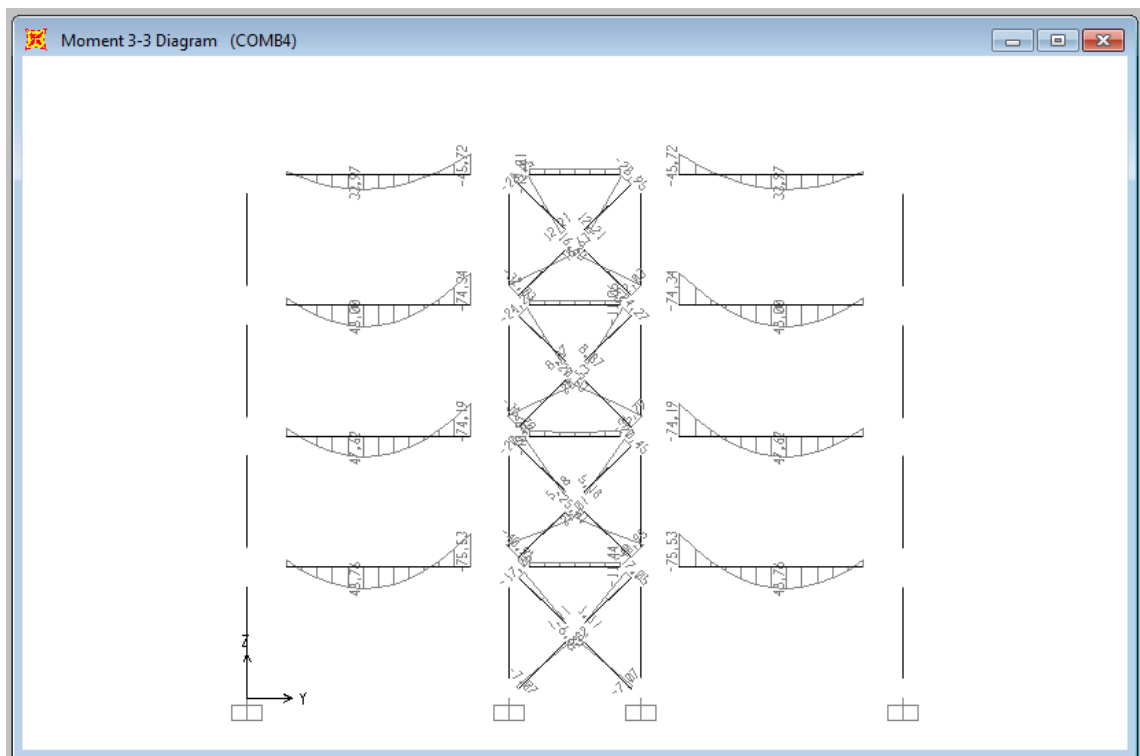


Figura 33 – Momento Eixo 1

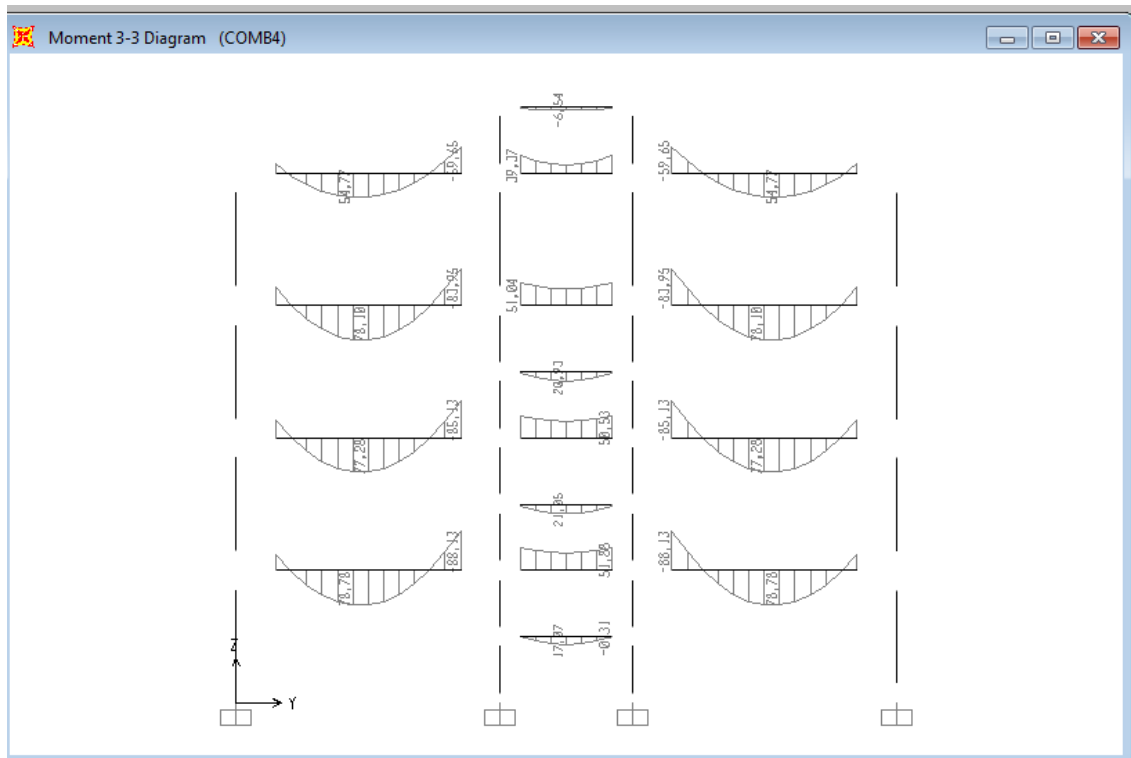


Figura 34 – Momento Eixo 2

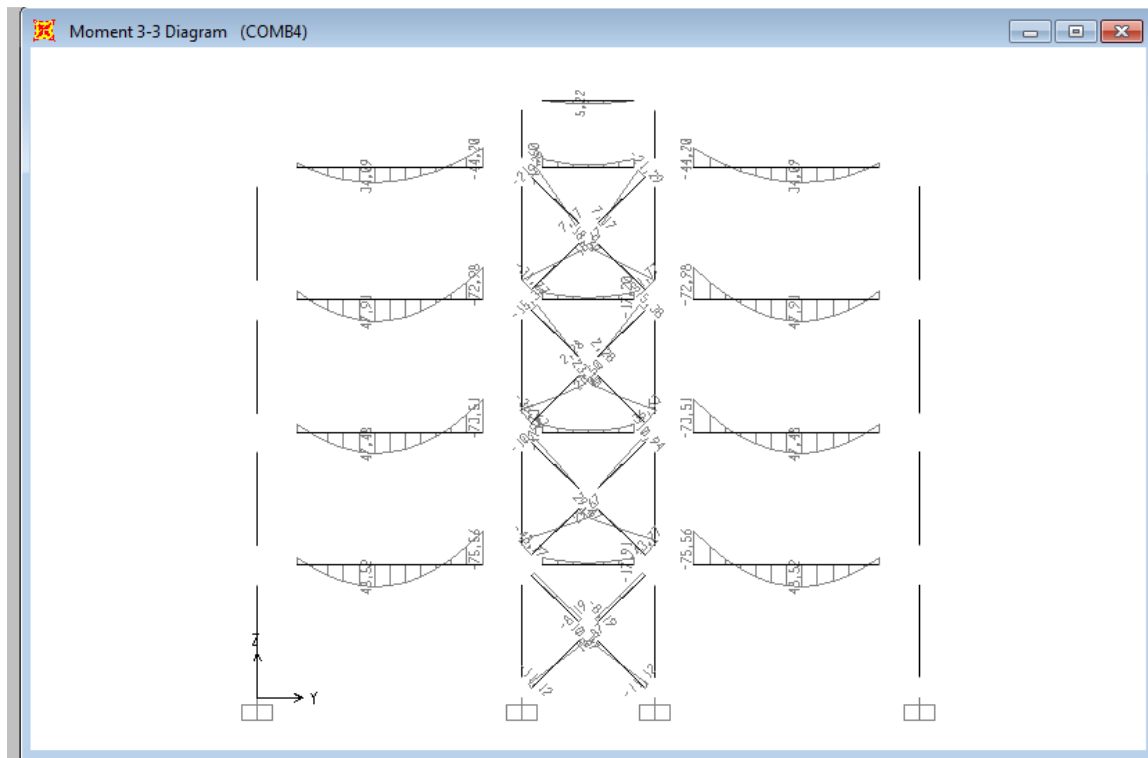


Figura 35 – Momento Eixo 3

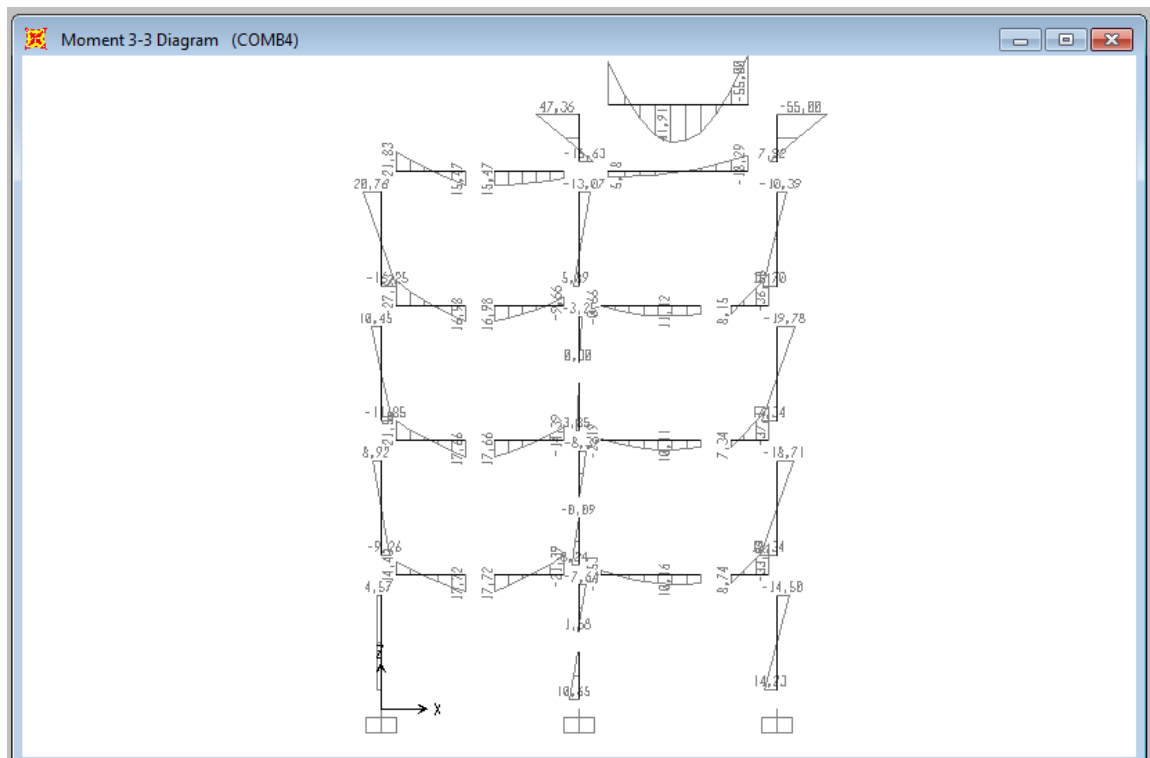


Figura 36 – Momento – Fila A e D

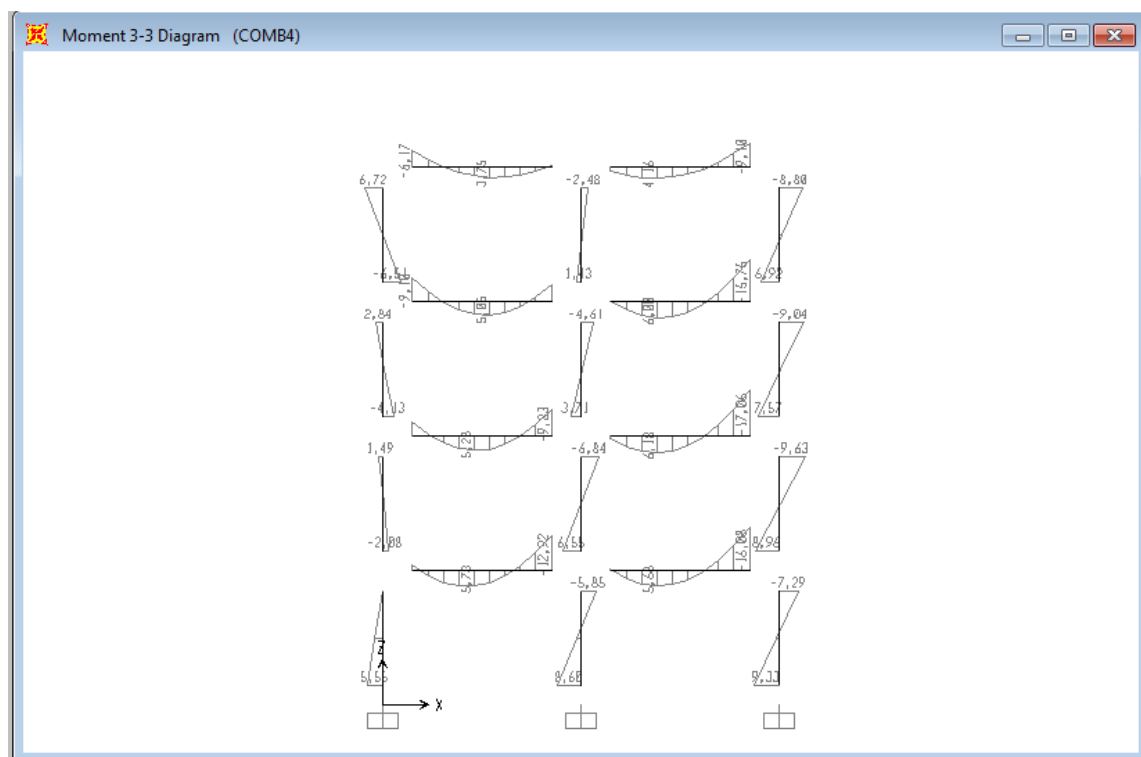


Figura 37 – Momento – Fila B e C

5.1.2. Força Axial

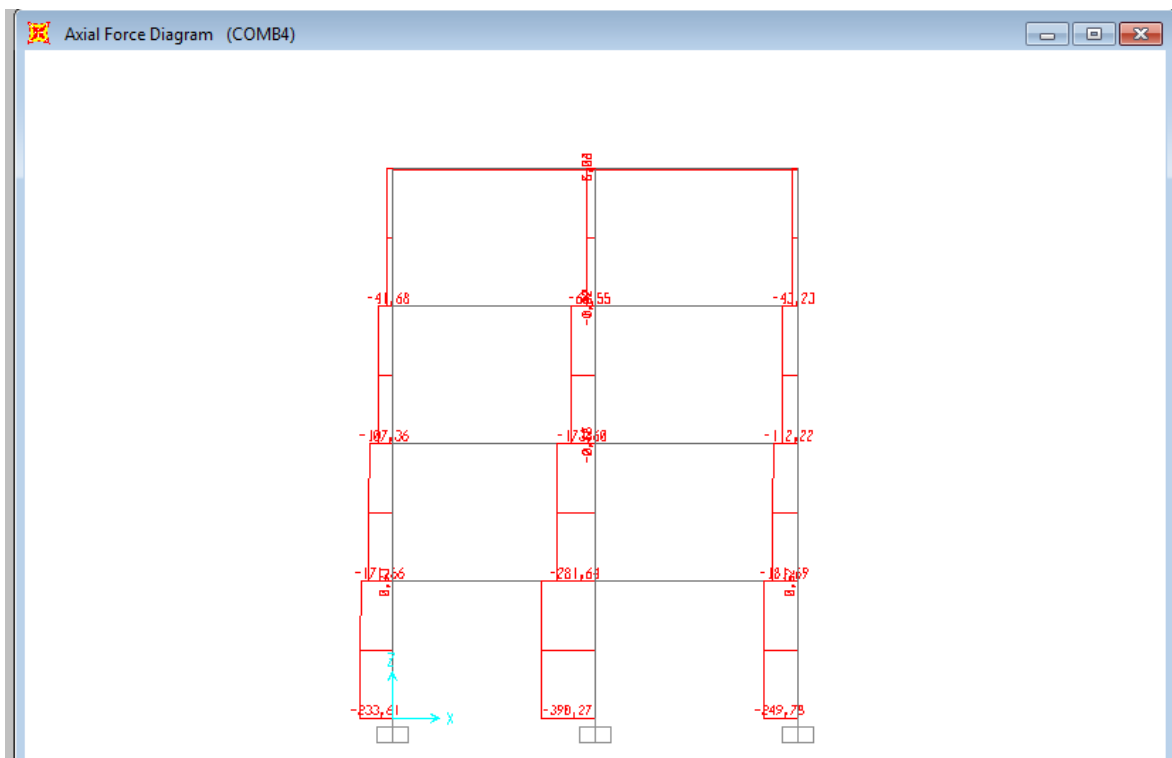


Figura 38 – Força Axial – Eixo A e D

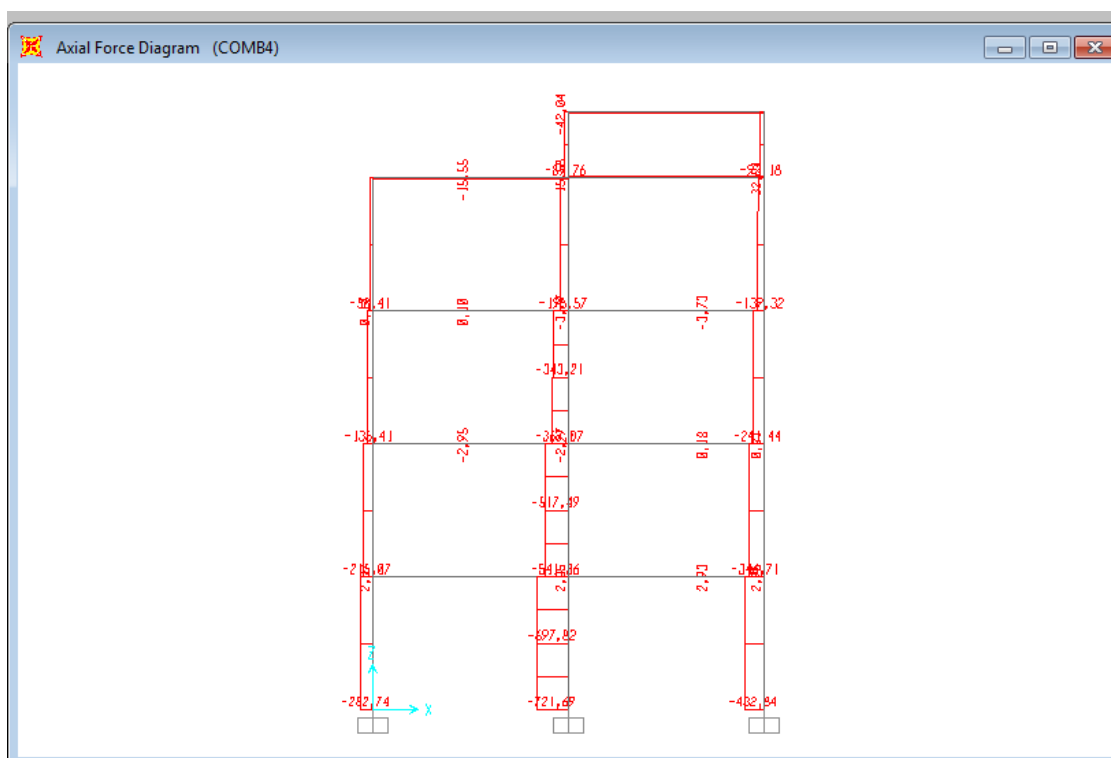


Figura 39 – Força Axial – Eixo B e C

## 6. DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS – PERFIL CX 402X202X25X3,35mm

### 6.1. FLEXÃO

#### 6.1.1. Método da Largura Efetiva

Características de 1 perfil

D=402 mm

B = 101 mm

C = 25mm

T = 3,35mm

Características da seção:

Ag (cm <sup>2</sup> )	Ix (cm <sup>4</sup> )	Wx (cm <sup>3</sup> )	rx (cm)	Iy (cm <sup>4</sup> )	Wy (cm <sup>3</sup> )	ry (cm)	It (cm <sup>4</sup> )	Cw (cm <sup>6</sup> )
42,27	9578,6	476,5	15,05	3039,9	301	8,48	7036,2	58622,1

- **Verificação do flange comprimido (elemento 2)**

$b = [101 - 4 \times (3,35 - 0,036)] \div 10 = 8,774cm$  (comprimento do elemento)

$t = (3,35 - 0,036) \div 10 = 0,3314cm$  (espessura do elemento)

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{E}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{8,774}{0,3314}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{20000}{23}}\right]} = 1,441$$

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

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

$d = (25 \div 10) - 2 \times 0,3314 = 1,837cm$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{1,837^3 \times 0,3314}{12} = 0,171cm^4$$

$I_a = 399t^4(0,487\lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,3314^4 \times (0,487 \times 1,441 - 0,328)^3$

$I_a = 0,2515cm^4$

$I_a \leq t^4(56\lambda_{po} + 5) = 0,3314^4 \times (56 \times 1,441 + 5) = 0,2515cm^4$

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

$n = (0,582 - 0,122 \times 1,441) = 0,4062 \geq 1/3$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{8,774} = 0,285$$

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

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,171}{0,2515} = 0,68 \leq 1,0 \rightarrow OK$$

Cálculo do coeficiente de flambagem local, k:

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

$$k = (4,82 - 5 \times 0,285)(0,68)^{0,4062} + 0,43 = 3,335 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,335$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{8,774}{0,3314}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{3,335 \times 20000}{23}}\right]} = 0,518$$

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

$$b_{ef} = 8,774 \text{ cm}$$

- **Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3)**

$$d_{ef} = [25 - 2 \times (3,35 - 0,036)] \div 10 = 1,837 \text{ cm}$$

$$t = (3,35 - 0,036) \div 10 = 0,3314 \text{ cm}$$

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

$$\lambda_p = \frac{\frac{d}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{1,8370}{0,3314}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{23}}\right]} = 0,302$$

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

$$d_{ef} = 1,837 \text{ cm (largura efetiva do enrijecedor de borda)}$$

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

$$d_s = 0,68 \times 1,837 = 1,251 \leq d_{ef}$$

$$d_s = 1,251 \text{ (largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda)}$$

- **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.

$$b = [402 - 4 \times (3,35 - 0,036)] \div 10 = 38,874\text{cm} \text{ (comprimento do elemento)}$$

$$t = (3,35 - 0,036) \div 10 = 0,3314\text{cm} \text{ (espessura do elemento)}$$

Dados dos cantos

$$R = 1,5xt = 0,497\text{cm}$$

$$R = t = 0,3314\text{cm}$$

$$c = 0,637xR = 0,317\text{cm}$$

$$L = 1,57R = 0,780\text{cm}$$

$$Y = 2t - c = 0,346\text{cm}$$

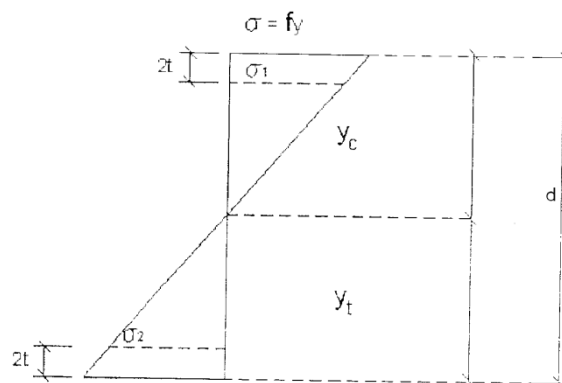
$$I = 0,0183\text{cm}^3$$



<b>Elementos Fixos</b>	<b>L (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>L.y (cm<sup>2</sup>)</b>
Flange Superior	8,774	0,166	1,454
Canto Superior Esquerdo	0,780	0,346	0,270
Canto Superior Direito	0,780	0,346	0,270
Enrijecedor Superior	1,251	1,288	1,612
Elemento Inefetivo da Alma	0,000	0,000	0,000
Alma	38,874	20,100	781,375
Flange Inferior	8,774	40,033	351,261
Enrijecedor Inferior	1,837	38,619	70,950
Canto Inferior Esquerdo	0,780	39,854	31,104
Canto Inferior Direito	0,780	39,854	31,104
<b>Soma Constante: <math>\sum cte=</math></b>	<b>62,633</b>		<b>1269,400</b>

$$y_{cg} = \frac{1269,400}{62,633} = 20,27cm$$

$$y_t = 40,2 - 20,27 = 19,93cm$$



**Figura40 - Tensão na alma do perfil (elemento 1)**

$$\sigma_1 = \frac{f_y(y_{cg} - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (20,27 - 2 \times 0,3314)}{20,27} = 22,25kN/cm^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{f_y(y_t - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (19,93 - 2 \times 0,3314)}{20,27} = -21,87kN/cm^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-21,87}{22,25} = -0,98 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

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

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

$$k = 4 + 2(1 + 0,98)^3 + 2(1 + 0,98) = 23,56$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{38,874}{0,3314}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{23,56 \times 20000}{22,25}}\right]} = 0,85$$

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:

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

$$b_{ef} = \frac{19,60}{1,07} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,85}\right) = 17,11 \text{ cm} \leq b_c = 17,11 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{b_{ef}}{(3 - \psi)} = \frac{17,11}{(3 + 0,98)} = 4,30 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5 b_{ef} = 0,5 \times 17,11 = 8,56 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 4,30 + 8,56 = 12,86 \text{ cm} \leq b_c = 19,60 \text{ cm}$$

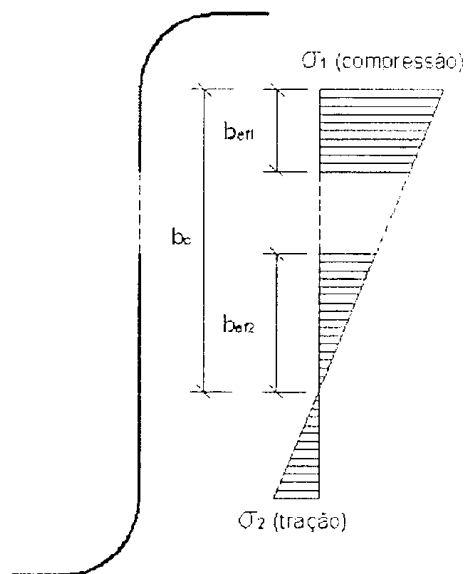


Figura41 – Larguras Efetivas para o Elemento I solicitado por um gradiente de tensão

- Segunda interação: considerando a alma não totalmente efetiva.

A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = (b_{ef1} + b_{ef2}) - b_c = 12,86 - 19,60 = -6,74cm$$

$$y_{inef} = y_{cg} - (b_{ef2} - b_{inef}/2) = 20,27 - (8,56 + 6,74/2) = 8,34cm$$

<b>Elementos Fixos</b>	<b>L (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>L.y (cm<sup>2</sup>)</b>
Flange Superior	8,774	0,166	1,454
Canto Superior Esquerdo	0,780	0,346	0,270
Canto Superior Direito	0,780	0,346	0,270
Enrijecedor Superior	1,251	1,288	1,612
Elemento Inefetivo da Alma	-6,74	8,34	-56,26
Alma	38,874	20,100	781,375
Flange Inferior	8,774	40,033	351,261
Enrijecedor Inferior	1,837	38,619	70,950
Canto Inferior Esquerdo	0,780	39,854	31,104
Canto Inferior Direito	0,780	39,854	31,104
<b>Soma Constante: <math>\sum cte=</math></b>	<b>55,88</b>		<b>1213,14</b>

$$y_{cg} = \frac{1213,14}{55,88} = 21,71cm$$

$$y_t = 40,2 - 21,71 = 18,49cm$$

O eixo neutro mudou de 21,71cm para 18,49cm, resultando em uma diferença de 7,11%. Isto torna necessária a execução de mais interações.

- Terceira interação

$$\sigma_1 = \frac{23 \times (21,71 - 2 \times 0,3314)}{21,71} = 22,30kN/cm^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{23 \times (18,49 - 2 \times 0,3314)}{21,71} = -18,89kN/cm^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{-19,89}{22,30} = -0,85 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

$$k = 4 + 2(1 + 0,85)^3 + 2(1 + 0,85) = 20,30$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{38,874}{0,3314}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{20,30 \times 20000}{22,30}}\right]} = 0,92$$

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:

$$b_c = 21,71 - 2 \times 0,3314 = 21,05 \text{ cm}$$

$$b_{ef} = \frac{21,05}{0,92} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,92}\right) = 17,41 \text{ cm} \leq b_c = 21,05 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{17,41}{(3 + 0,92)} = 4,54 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5 \times 17,41 = 8,73 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 4,54 + 8,73 = 13,27 \text{ cm} \leq b_c = 21,05 \text{ cm}$$

$$b_{inef} = 13,27 - (21,71 - 2 \times 0,3314) = -7,77 \text{ cm}$$

$$y_{inef} = 21,71 - (8,73 + 7,77/2) = 9,09 \text{ cm}$$

<b>Elementos Fixos</b>	<b>L (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>L.y (cm<sup>2</sup>)</b>
Flange Superior	8,774	0,166	1,454
Canto Superior Esquerdo	0,780	0,346	0,270
Canto Superior Direito	0,780	0,346	0,270
Enrijecedor Superior	1,251	1,288	1,612
Elemento Inefetivo da Alma	-7,77	9,09	-70,62
Alma	38,874	20,100	781,375
Flange Inferior	8,774	40,033	351,261
Enrijecedor Inferior	1,837	38,619	70,950
Canto Inferior Esquerdo	0,780	39,854	31,104
Canto Inferior Direito	0,780	39,854	31,104
<b>Soma Constante: <math>\sum cte=</math></b>	<b>54,86</b>		<b>1198,78</b>

$$y_{cg} = \frac{1198,78}{54,86} = 21,85 \text{ cm}$$

O eixo neutro mudou de 21,71cm para 21,85cm, resultando em uma diferença de 0,65%. Logo a convergência é obtida ao final dessa interação, obtendo-se:

$$y_{cg} = 21,71m$$

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

<b>Elementos Fixos</b>	<b>L (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>L.y (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>L.y<sup>2</sup> (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>I'x (cm<sup>3</sup>)</b>
Flange Superior	8,774	0,166	1,454	0,241	-
Canto Superior Esquerdo	0,780	0,346	0,270	0,094	0,018
Canto Superior Direito	0,780	0,346	0,270	0,094	0,018
Enrijecedor Superior	1,251	1,288	1,612	2,076	0,163
Elemento Inefetivo da alma	-7,77	9,09	-70,62	-34347,36	4857,30
Alma	38,874	20,100	781,375	15705,646	4895,644
Flange Inferior	8,774	40,033	351,261	14061,863	-
Enrijecedor Inferior	1,837	38,619	70,950	2739,993	0,517
Canto Inferior Esquerdo	0,780	39,854	31,104	1239,607	0,018
Canto Inferior Direito	0,780	39,854	31,104	1239,607	0,018
<b>Soma Constante: <math>\Sigma L y^2 =</math></b>	<b>54,86</b>		<b>1198,78</b>	<b>34347,36</b>	<b>4857,30</b>

$$I_{x'} = \Sigma L y^2 + \Sigma I'_x - [(y_{cg})^2 \Sigma L] = 34347,36 + 4857,30 - [(21,71^2) \times 54,86]$$

$$I_{x'} = 12087,34cm^4$$

$$I_x = I_{x'} \times t = 12087,34 \times 0,3314 = 4005,74cm^4$$

$I_x$  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:

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{4005,74}{21,71} = 183,26cm^3$$

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

$$M_{rd} = \frac{W_{ef} f_y}{1,1} = \frac{175,00 \times 23}{1,1} = 3833,2kN.cm$$

## 6.2. 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:

$$t_r = 0,018mm$$

$$b_f = b - 2t_r = 101 - 2 \times 0,018 = 100,964mm$$

$$b_w = d - 2t_r = 402 - 2 \times 0,018 = 401,964mm$$

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

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.

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{100,964}{401,964} = 0,251$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{24,964}{401,964} = 0,062$$

Não ok, o método da seção efetiva não é eficaz para esse caso.

### 6.2.1. Momento calculado com base na flambagem lateral com torção

- **Método da Largura Efetiva**

- **Vigas da Largura L = 3m**

Para barras com seção duplamente simétrica ou monossimétricas sujeitas à flexão em torno do eixo de simetria (eixo x), tem-se:

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

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_z)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 3039,90}{(1,00 \times 300)^2} = 6.667,25kN$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \left\{ GJ + \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} \right] \right\} = \frac{1}{17,27^2} \left\{ 7700 \times 7036,2 + \left[ \frac{\pi^2 \times 20000 \times 58622,1}{(300)^2} \right] \right\}$$

$$= 181.987,15kN$$

$N_{ez}$  é a força normal de flambagem elástica por torção.

$$M_e = 1,0 \times 17,27 \times (6667,25 \times 181.987,15)^{0,5} = 601.569,86kN.cm$$

$$W_c = W_x = 476,50cm^3$$

$$\lambda_o = \left[ \frac{(W_c f_y)}{M_e} \right]^{0,5} = \left[ \frac{(476,50 \times 23)}{601.569,86} \right]^{0,5} = 0,135 < 0,6 \rightarrow \chi_{FLT} = 1,0$$

$$\sigma = 23,00 \times 1,00 = 23,00$$

Com o valor da tensão (23kN/cm<sup>2</sup>) não varia, não há necessidade de verificação por Flambagem Lateral por torção.

○ **Vigas da Largura L = 4,425m**

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

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_z)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 3039,90}{(1,00 \times 442,5)^2} = 3.064,52 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \left\{ GJ + \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} \right] \right\} = \frac{1}{17,27^2} \left\{ 7700 \times 7036,2 + \left[ \frac{\pi^2 \times 20000 \times 58622,1}{(442,5)^2} \right] \right\}$$

$$= 181.754,336 \text{ kN}$$

Nez é a força normal de flambagem elástica por torção.

$$M_e = 1,0 \times 17,27 \times (3.064,52 \times 181.754,33)^{0,5} = 407.692,22 \text{ kN.cm}$$

$$W_c = W_x = 476,50 \text{ cm}^3$$

$$\lambda_o = \left[ \frac{(W_c f_y)}{M_e} \right]^{0,5} = \left[ \frac{(476,50 \times 23)}{407.692,22} \right]^{0,5} = 0,164 < 0,6 \rightarrow \chi_{FLT} = 1,0$$

$$\sigma = 23,00 \times 1,00 = 23,00$$

Como o valor da tensão (23kN/cm<sup>2</sup>) não varia, não há necessidade de verificação por Flambagem Lateral por Torção.

○ **Vigas da Largura L = 6,0m**

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

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_z)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 3039,90}{(1,00 \times 600)^2} = 1.666,81 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \left\{ GJ + \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} \right] \right\} = \frac{1}{17,27^2} \left\{ 7700 \times 7036,2 + \left[ \frac{\pi^2 \times 20000 \times 58622,1}{(600)^2} \right] \right\}$$

$$= 181.664,10 \text{ kN}$$

Nez é a força normal de flambagem elástica por torção.

$$M_e = 1,0 \times 17,27 \times (1.666,81 \times 181.664,01)^{0,5} = 300.598,29 \text{ kN.cm}$$

$$W_c = W_x = 476,50 \text{ cm}^3$$

$$\lambda_o = \left[ \frac{(W_c f_y)}{M_e} \right]^{0,5} = \left[ \frac{(476,50 \times 23)}{300.598,29} \right]^{0,5} = 0,164 < 0,6 \rightarrow \chi_{FLT} = 1,0$$

$$\sigma = 23,00 \times 1,00 = 23,00$$

Como o valor da tensão (23kN/cm<sup>2</sup>) não varia, não há necessidade de verificação por Flambagem Lateral por Torção.

### 6.2.2. Método da Seção Efetiva

Como o valor da tensão (23kN/cm<sup>2</sup>) não varia, não há necessidade de verificação por Flambagem Lateral por Torção.

- **Compressão**

Como os esforços de compressão nesse prédio são de valores pequenos, não foi feita a análise de compressão.

- **Método da Resistência Direita**

- **Flambagem Local por torção**

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

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

$$r_o = 15,60 \text{ cm}$$

$$C_b = 1$$

$$N_{ey} = 1.565,76 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = 2.735,78 \text{ kN}$$

$$M_e = 32.289,30 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_o = 0,21$$

Para  $\lambda_o \leq 0,6$ :  $M_{Re} = W \times f_y$

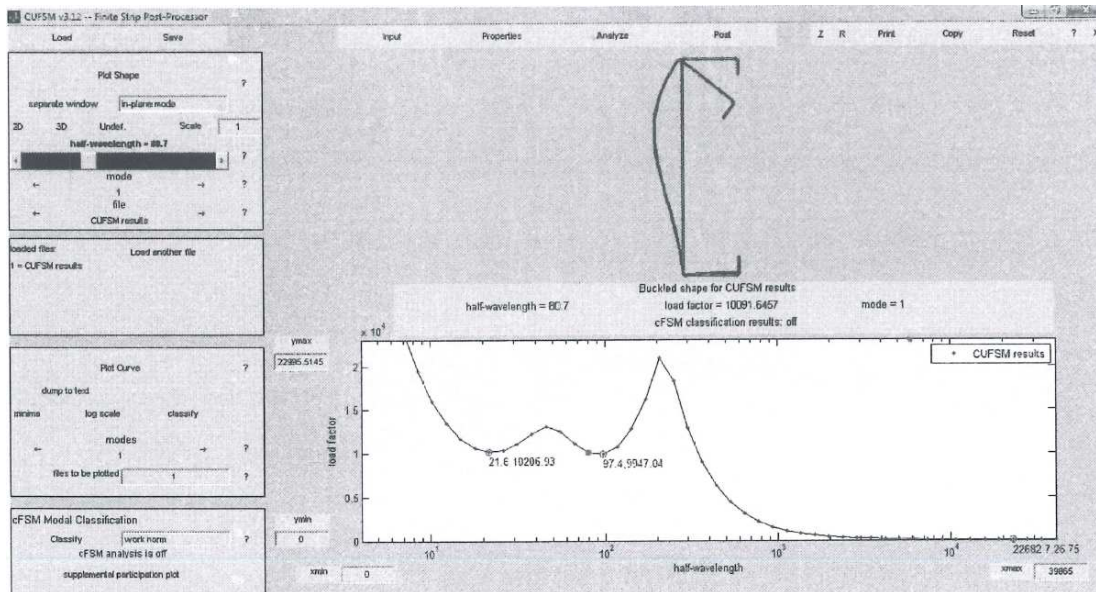
$$M_{Re} = 476,50 \times 23,00 = 10.959,5 \text{ kN.cm}$$

- **Flambagem Local**

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{Re}}{M_l}}$$



$M_l = 20.413,86kN$  (Obtido pelo software CUFSM e multiplicado por 2)



$$\lambda_l = 0,537$$

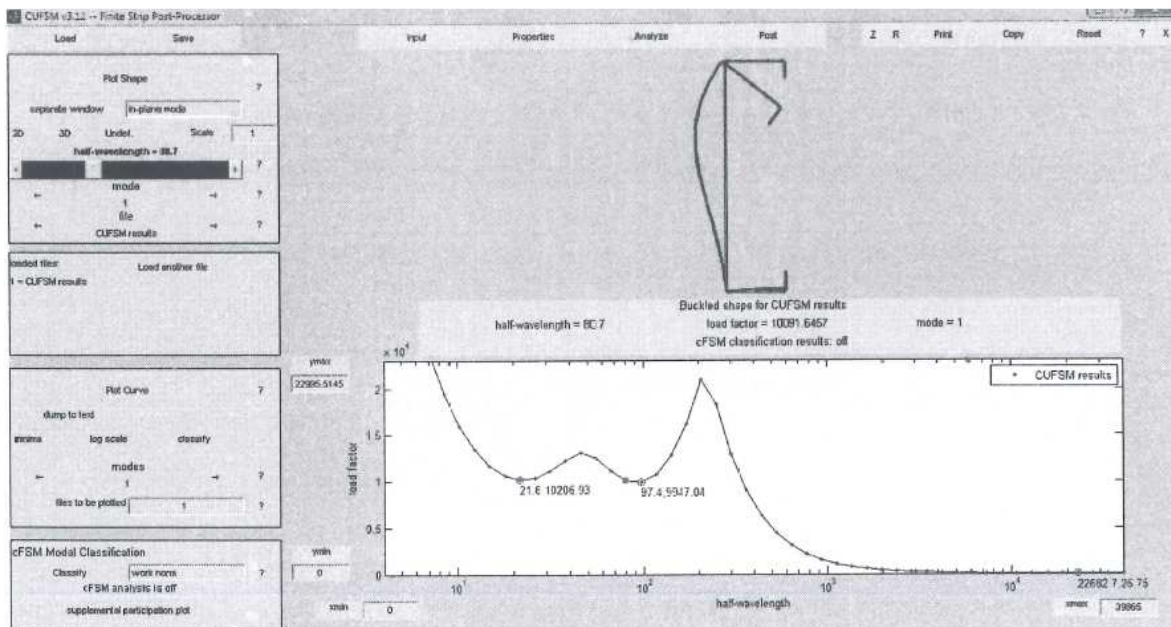
Para  $\lambda_l \leq 0,776$ :  $M_{Rl} = M_{Re}$

$$M_{Rl} = 10.959,5kN.cm$$

- o Flambagem Distorcional

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

$M_{dist} = 20.183,31kN$  (Obtido pelo software CUFSM e multiplicado por 2)



$$\lambda_{dist} = 0,737$$

Para  $\lambda_l \geq 0,673$ :  $M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}}\right) \times \frac{W \times f_y}{\lambda_{dist}}$

$$M_{dist} = 10.431,49kN$$

**Determinação de  $M_{RD}$**

$$M_{RD} \leq M_{Re}, M_{Rl}, M_{Rdist}$$

$$M_{RD} = 10.431,49$$

## 7. DIMENSIONAMENTO DOS PILARES–UE 402X202X25X3,35

Características de 1 perfil

D=402 mm

B = 101 mm

C = 25mm

t = 3,35mm

Características da seção:

Ag (cm <sup>2</sup> )	Ix (cm <sup>4</sup> )	Wx (cm <sup>3</sup> )	rx (cm)	Iy (cm <sup>4</sup> )	Wy (cm <sup>3</sup> )	ry (cm)	It (cm <sup>4</sup> )	Cw (cm <sup>6</sup> )
42,27	9578,6	476,5	15,05	713,9	70,7	8,48	1,581	258.052

### 7.1. COMPRESSÃO

#### 7.1.1. Método da Largura Efetiva

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

a) **Determinação da Tensão**  $\sigma = \chi f_y$

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

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 9578,60}{300^2} = 21008,22kN$$

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

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 713,90}{300^2} = 1565,76kN$$

- Força Normal de flambagem global elástica por torção:

$$N_{ez} = \frac{1}{(r_o)^2} \times \left\{ GJ + \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} \right] \right\}, \text{ onde } r_o^2 = r_x^2 + r_y^2 + x_o^2 + y_o^2$$

$$N_{ez} = \frac{1}{(15,60)^2} \times \left\{ 7700 \times 1,581 + \left[ \frac{\pi^2 \times 20000 \times 298052}{(300)^2} \right] \right\} = 2765,78$$

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

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

$$N_{exz} = \frac{21008,22 + 2735,78}{2[1 - (0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \times 21008,22 \times 2735,78 [1 - (0)^2]}{(21008,22 + 2735,78)^2}} \right] = 1565,76 \text{ kN}$$

Como  $N_{ey} = 1565,76 \text{ kN} < 2735,78 \text{ kN} \rightarrow N_e = 1565,76 \text{ kN}$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{42,27 \times 35,00}{1565,76}} = 0,97$$

Onde  $\lambda_o \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658 \lambda_o^2 = 0,658^{0,97^2} = 0,77$

$\chi$  é o fator de redução associado à flambagem global da barra.

$$\sigma = \chi f_y = 0,77 \times 2300 = 17,74 \text{ kN/cm}^2$$

- b) Determinação da área efetiva  $A_{ef}$

- Verificação da alma (Elemento 1)

$$b = 40,2 - 4 \times \left( \frac{3,35 - 0,036}{10} \right) = 38,874 \text{ cm}$$

$k = 4$  (caso "a" na tabela 4.2)

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[ 0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}} \right]} = \frac{\frac{38,874}{0,3314}}{\left[ 0,95 \sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{17,74}} \right]} = 1,84$$

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

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

$$b_{ef} = 38,874 \frac{1}{1,84} \times \left( 1 - \frac{0,22}{1,84} \right) = 18,614 \text{ cm} \leq b = 38,874$$

$$b_{ef} = 18,614 \text{ cm}$$

- Verificação da mesa (Elemento 2):

$$b = [101 - 4 \times (3,35 - 0,036)] \div 10 = 8,774 \text{ cm}$$

$$t = (3,35 - 0,036) \div 10 = 0,3314 \text{ cm}$$

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[ 0,623 \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right]} = \frac{\frac{8,774}{0,3314}}{\left[ 0,623 \sqrt{\frac{20000}{17,74}} \right]} = 1,27$$

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

$$d = (25 \div 10) - 2 \times 0,3314 = 1,837 \text{ cm}$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{1,837^3 \times 0,3314}{12} = 0,1713 \text{ cm}^4$$

$$I_a = 399 t^4 (0,487 \lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,3314^4 \times (0,487 \times 1,27 - 0,328)^3$$

$$I_a = 0,115 \text{ cm}^4$$

$$I_a \leq t^4 (56 \lambda_{po} + 5) = 0,3314^4 \times (56 \times 1,27 + 5) = 0,918 \text{ cm}^4$$

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

$$n = (0,582 - 0,122 \times 2,138) = 0,4276 \geq 1/3$$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{8,774} = 0,285$$

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

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,1713}{0,115} = 1,49 \geq 1,0 \rightarrow \text{Adotar } 1,0$$

Cálculo do coeficiente de flambagem local, k:

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

$$k = (4,82 - 5 \times 0,285) (1,00)^{0,4276} + 0,43 = 3,285 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,285$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{8,774}{0,3314}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{3,285 \times 20000}{17,74}}\right]} = 0,424$$

Como  $\lambda_p < 0,673$ , não haverá flambagem local no elemento 2.

$$\lambda_p = 8,774 \text{ cm}$$

- Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3)

$$d_{ef} = [25 - 2 \times (3,35 - 0,036)] \div 10 = 1,837 \text{ cm}$$

$$t = (3,35 - 0,036) \div 10 = 0,3314 \text{ cm}$$

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

$$\lambda_p = \frac{\frac{d}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{1,8370}{0,3314}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{17,74}}\right]} = 0,265$$

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

$$d_{ef} = 1,837 \text{ cm (largura efetiva do enrijecedor de borda)}$$

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

$$d_s = 1,00 \times 1,837 = 1,837 \leq d_{ef}$$

$d_s = 1,837$  (largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda)

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

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

$$A_{inef} = 6,714 \text{ cm}^2$$

$$A_{ef} = 42,27 - 2 \times 6,714 = 35,556 \text{ cm}^2$$

c) Determinação de  $N_{c,Rd}$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma} = \frac{0,77 \times 35,556 \times 23,00}{1,2} = 426,28 \text{ kN}$$

7.1.2. 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:

$$\chi = 0,77 \text{ (Calculado anteriormente)}$$

$$t_r = 0,018mm$$

$$b_f = b - 2t_r = 101 - 2 \times 0,018 = 100,964mm$$

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

Onde  $b_f$ ,  $b_w$  e  $D$  são 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.

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{100,964}{401,964} = 0,251$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{24,964}{401,964} = 0,062 \rightarrow 0,1 < \frac{D}{D_w} < 0,3, \text{ não OK!}$$

O método da seção efetiva não é eficaz para esse caso.

7.1.3. Método da Resistência Direta

**a) Flambagem Global da barra por flexão, torção ou flexo-torção**

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{Af_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{21,13 \times 23,00}{1565,76}} = 0,557$$

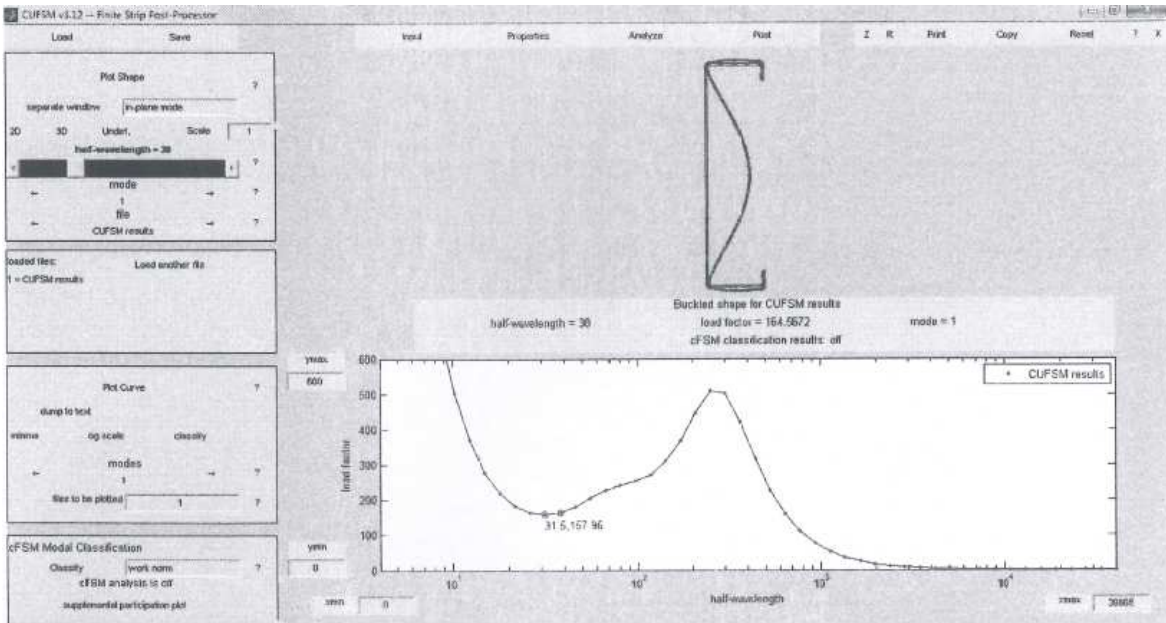
Para  $\lambda_o \leq 1,5$ :  $N_{c,Re} = (0,658^{\lambda_o^2})21,13 \times 23,00$

$$N_{c,Re} = 426,81kN$$

**b) Flambagem Local**

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{N_{c,Re}}{N_l}}$$

$M_l = 315,92kN$  (Obtido pelo software CUFSM e multiplicado por 2)



$$\lambda_l = \sqrt{\frac{426,81}{315,92}} = 1,16$$

Para  $\lambda_l > 0,776$ :  $N_{c,RI} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_o^{0,8}}\right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_l^{0,8}}$

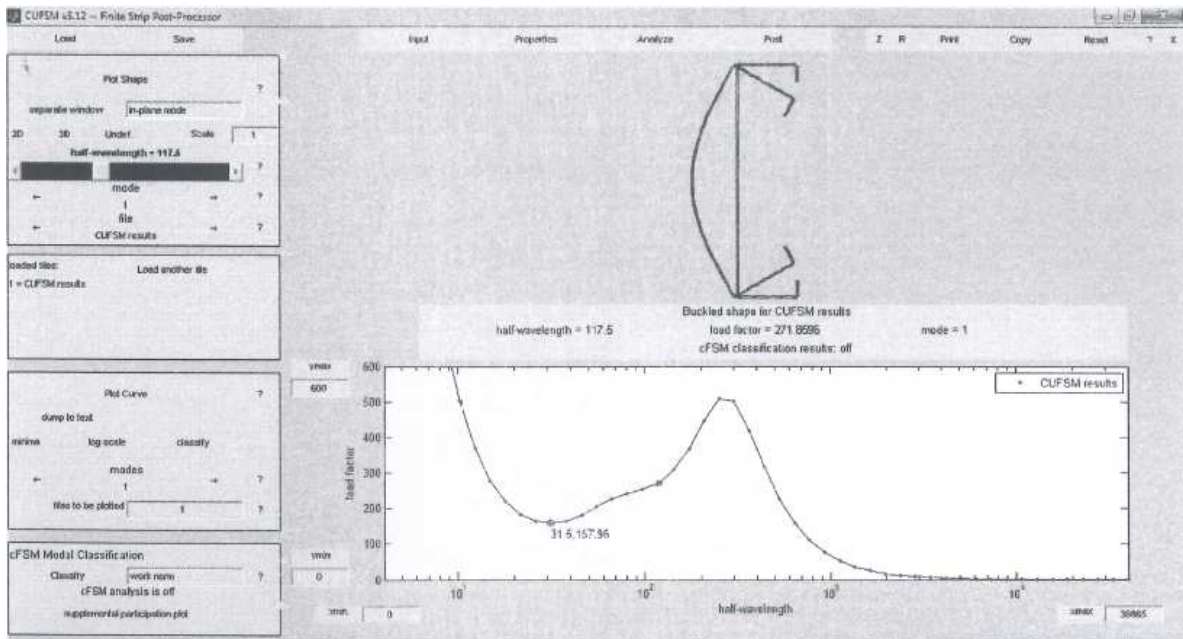
$$N_{c,RI} = \left(1 - \frac{0,15}{0,557^{0,8}}\right) \frac{426,81}{1,16^{0,8}} = 288,23kN$$

**c) Flambagem Distorcional**

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{dist}}}$$

$N_{dist} = 315,92kN$  (Obtido pelo software CUFSM e multiplicado por 2)





$$\lambda_{dist} = 1,54$$

$$\text{Para } \lambda_{dist} = 1,54: N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{A \times f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}$$

$$N_{c,Rdist} = 247,35kN$$

#### d) Determinação de $N_{RD}$

$$N_{RD} \leq N_{Re}, N_{Rl}, N_{Rdist}$$

$$N_{RD} = 247,35kN$$

## 7.2. FLEXÃO

### 7.2.1. Método da Largura Efetiva

#### a) Verificação do flange comprimido (elemento 2)

$$b = [101 - 4 \times (3,35 - 0,036)] \div 10 = 8,774cm \text{ (comprimento do elemento)}$$

$$t = (3,35 - 0,036) \div 10 = 0,3314cm \text{ (espessura do elemento)}$$

$$\lambda_{po} = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{E}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{8,774}{0,3314}}{\left[0,623 \sqrt{\frac{20000}{23}}\right]} = 1,441$$

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

$$d = (25 \div 10) - 2 \times 0,3314 = 1,837cm$$

$$I_s = \frac{d^3 t}{12} = \frac{1,837^3 \times 0,3314}{12} = 0,171cm^4$$

$$I_a = 399t^4(0,487\lambda_{po} - 0,328)^3 = 399 \times 0,3314^4 \times (0,487 \times 1,441 - 0,328)^3$$

$$I_a = 0,2515cm^4$$

$$I_a \leq t^4(56\lambda_{po} + 5) = 0,3314^4 \times (56 \times 1,441 + 5) = 0,2515cm^4$$

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

$$n = (0,582 - 0,122 \times 1,441) = 0,4062 \geq 1/3$$

$$\frac{D}{b} = \frac{2,5}{8,774} = 0,285$$

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

$$\frac{I_s}{I_a} = \frac{0,171}{0,2515} = 0,68 \leq 1,0 \rightarrow OK!$$

Cálculo do coeficiente de flambagem local, k:

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

$$k = (4,82 - 5 \times 0,285)(0,68)^{0,4062} + 0,43 = 3,335 \leq 4 \rightarrow \text{Adotar } k = 3,335$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{8,774}{0,3314}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{3,335 \times 20000}{23}}\right]} = 0,518$$

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

$$b_{ef} = 8,774m$$

### b) Verificação do Enrijecedor de borda (Elemento 3)

$$d_{ef} = [25 - 2 \times (3,35 - 0,036)] \div 10 = 1,837cm$$

$$t = (3,35 - 0,036) \div 10 = 0,3314cm$$

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

$$\lambda_p = \frac{\frac{d}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}\right]} = \frac{\frac{1,8370}{0,3314}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{0,43 \times 20000}{23}}\right]} = 0,302$$

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

$d_{ef} = 1,837 \text{ cm}$  (largura efetiva do enrijecedor de borda)

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

$$d_s = 0,68 \times 1,837 = 1,251 \leq d_{ef}$$

$d_s = 1,251$  (largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda)

### c) 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.**

$$b = [402 - 4 \times (3,35 - 0,036)] \div 10 = 38,874 \text{ cm} \text{ (comprimento do elemento)}$$

$$t = (3,35 - 0,036) \div 10 = 0,3314 \text{ cm} \text{ (espessura do elemento)}$$

Dados dos cantos

$$R = 1,5xt = 0,497 \text{ cm}$$

$$R = t = 0,3314 \text{ cm}$$

$$c = 0,637xR = 0,317 \text{ cm}$$

$$L = 1,57R = 0,780\text{cm}$$

$$Y = 2t - c = 0,346\text{cm}$$

$$I = 0,0183\text{cm}^3$$

<b>Elementos Fixos</b>	<b>L (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>L.y (cm<sup>2</sup>)</b>
Flange Superior	8,774	0,166	1,454
Canto Superior Esquerdo	0,780	0,346	0,270
Canto Superior Direito	0,780	0,346	0,270
Enrijecedor Superior	1,251	1,288	1,612
Alma	38,874	20,100	781,375
Elemento Inefetivo da Alma	0,000	0,000	0,000
Flange Inferior	8,774	40,033	351,261
Enrijecedor Inferior	1,837	38,619	70,950
Canto Inferior Esquerdo	0,780	39,854	31,104
Canto Inferior Direito	0,780	39,854	31,104
<b>Soma Constante: <math>\sum cte=</math></b>	<b>62,633</b>		<b>1269,400</b>

$$y_{cg} = \frac{1269,400}{62,633} = 20,27\text{cm}$$

$$y_t = 40,2 - 20,27 = 19,93\text{cm}$$

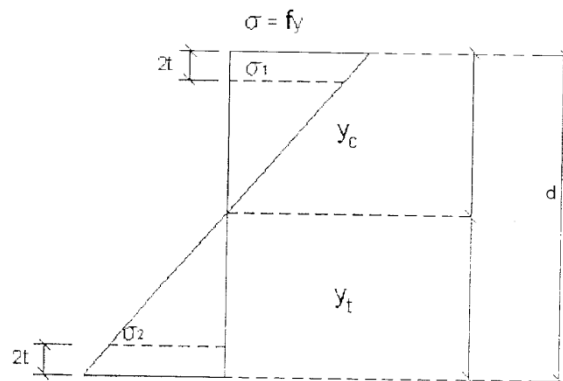


Figura42 - Tensão na alma do perfil (elemento 1)

$$\sigma_1 = \frac{f_y(y_{cg} - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (20,27 - 2 \times 0,3314)}{20,27} = 22,25\text{kN/cm}^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{f_y(y_t - 2t)}{y_{cg}} = \frac{23 \times (19,93 - 2 \times 0,3314)}{20,27} = -21,87\text{kN/cm}^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-21,87}{22,25} = -0,98 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

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

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

$$k = 4 + 2(1 + 0,98)^3 + 2(1 + 0,98) = 23,56$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{38,874}{0,3314}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{23,56 \times 20000}{22,25}}\right]} = 0,85$$

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:

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

$$b_{ef} = \frac{19,60}{1,07} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,85}\right) = 17,11 \text{ cm} \leq b_c = 17,11 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} = \frac{b_{ef}}{(3 - \psi)} = \frac{17,11}{(3 + 0,98)} = 4,30 \text{ cm}$$

$$b_{ef2} = 0,5b_{ef} = 0,5 \times 17,11 = 8,56 \text{ cm}$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 4,30 + 8,56 = 12,86 \text{ cm} \leq b_c = 19,60 \text{ cm}$$

- **Segunda interação: considerando a alma não totalmente efetiva.**

A parte inefetiva da alma é:

$$b_{inef} = (b_{ef1} + b_{ef2}) - b_c = 12,86 - 19,60 = -6,74 \text{ cm}$$

$$y_{inef} = y_{cg} - (b_{ef2} - b_{inef}/2) = 20,27 - (8,56 + 6,74/2) = 8,34 \text{ cm}$$

<b>Elementos Fixos</b>	<b>L (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>L.y (cm<sup>2</sup>)</b>
Flange Superior	8,774	0,166	1,454
Canto Superior Esquerdo	0,780	0,346	0,270
Canto Superior Direito	0,780	0,346	0,270
Enrijecedor Superior	1,251	1,288	1,612
Elemento Inefetivo da Alma	-6,74	8,34	-56,26
Alma	38,874	20,100	781,375
Flange Inferior	8,774	40,033	351,261
Enrijecedor Inferior	1,837	38,619	70,950
Canto Inferior Esquerdo	0,780	39,854	31,104
Canto Inferior Direito	0,780	39,854	31,104
<b>Soma Constante: <math>\sum cte=</math></b>	<b>55,88</b>		<b>1213,14</b>

$$y_{cg} = \frac{1213,14}{55,88} = 21,71cm$$

$$y_t = 40,2 - 21,71 = 18,49cm$$

O eixo neutro mudou de 21,71cm para 18,49cm, resultando em uma diferença de 7,11%. Isto torna necessária a execução de mais interações.

- Terceira interação

$$\sigma_1 = \frac{23 \times (21,71 - 2 \times 0,3314)}{21,71} = 22,30kN/cm^2 \text{ (Compressão)}$$

$$\sigma_2 = \frac{23 \times (18,49 - 2 \times 0,3314)}{21,71} = -18,89kN/cm^2 \text{ (Tração)}$$

$$\psi = \frac{-19,89}{22,30} = -0,85 \quad (\psi \text{ é a relação } \sigma_2/\sigma_1 \text{ empregada no cálculo de } K)$$

$$k = 4 + 2(1 + 0,85)^3 + 2(1 + 0,85) = 20,30$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma_1}}\right]} = \frac{\frac{38,874}{0,3314}}{\left[0,95 \sqrt{\frac{20,30 \times 20000}{22,30}}\right]} = 0,92$$

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:

$$b_c = 21,71 - 2 \times 0,3314 = 21,05cm$$

$$b_{ef} = \frac{21,05}{0,92} \times \left(1 - \frac{0,22}{0,92}\right) = 17,41cm \leq b_c = 21,05cm$$

$$b_{ef1} = \frac{17,41}{(3 + 0,92)} = 4,54cm$$

$$b_{ef2} = 0,5 \times 17,41 = 8,73cm$$

$$b_{ef1} + b_{ef2} = 4,54 + 8,73 = 13,27cm \leq b_c = 21,05cm$$

$$b_{inef} = 13,27 - (21,71 - 2 \times 0,3314) = -7,77cm$$

$$y_{inef} = 21,71 - (8,73 + 7,77/2) = 9,09cm$$

<b>Elementos Fixos</b>	<b>L (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>L.y (cm<sup>2</sup>)</b>
Flange Superior	8,774	0,166	1,454
Canto Superior Esquerdo	0,780	0,346	0,270
Canto Superior Direito	0,780	0,346	0,270
Enrijecedor Superior	1,251	1,288	1,612
Elemento Inefetivo da Alma	-7,77	9,09	-70,62
Alma	38,874	20,100	781,375
Flange Inferior	8,774	40,033	351,261
Enrijecedor Inferior	1,837	38,619	70,950
Canto Inferior Esquerdo	0,780	39,854	31,104
Canto Inferior Direito	0,780	39,854	31,104
<b>Soma Constante: <math>\sum cte=</math></b>	<b>54,86</b>		<b>1198,78</b>

$$y_{cg} = \frac{1198,78}{54,86} = 21,85cm$$

O eixo neutro mudou de 21,71cm para 21,85cm, resultando em uma diferença de 0,65%. Logo a convergência é obtida ao final dessa interação, obtendo-se:

$$y_{cg} = 21,71m$$

Calculando as propriedades da seção efetiva, tem-se:

<b>Elementos Fixos</b>	<b>L (cm)</b>	<b>y (cm)</b>	<b>L.y (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>L.y<sup>2</sup> (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>I'<sub>x</sub> (cm<sup>3</sup>)</b>
Flange Superior	8,774	0,166	1,454	0,241	-
Canto Superior Esquerdo	0,780	0,346	0,270	0,094	0,018
Canto Superior Direito	0,780	0,346	0,270	0,094	0,018
Enrijecedor Superior	1,251	1,288	1,612	2,076	0,163
Elemento Inefetivo da alma	-7,77	9,09	-70,62	-34347,36	4857,30
Alma	38,874	20,100	781,375	15705,646	4895,644
Flange Inferior	8,774	40,033	351,261	14061,863	-
Enrijecedor Inferior	1,837	38,619	70,950	2739,993	0,517
Canto Inferior Esquerdo	0,780	39,854	31,104	1239,607	0,018
Canto Inferior Direito	0,780	39,854	31,104	1239,607	0,018
<b>Soma Constante: <math>\square</math>cte =</b>	<b>54,86</b>		<b>1198,78</b>	<b>34347,36</b>	<b>4857,30</b>

$$I_{x'} = \Sigma Ly^2 + \Sigma I'_x - [(y_{cg})^2 \Sigma L] = 34347,36 + 4857,30 - [(21,71^2) \times 54,86]$$

$$I_{x'} = 12087,34 \text{ cm}^4$$

$$I_x = I_{x'} \times t = 12087,34 \times 0,3314 = 4005,74 \text{ cm}^4$$

$I_{x'}$  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:

$$W_{ef} = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{4005,74}{21,71} = 183,26 \text{ cm}^3$$

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

$$M_{rd} = \frac{W_{ef} f_y}{1,1} = \frac{175,00 \times 23}{1,1} = 3833,2 \text{ kN.cm}$$

### 7.2.2. 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:

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

$$b_f = b - 2t_r = 101 - 2 \times 0,018 = 100,964 \text{ mm}$$



$$b_w = d - 2t_r = 402 - 2 \times 0,018 = 401,964mm$$

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

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.

$$\eta = \frac{b_f}{b_w} = \frac{100,964}{401,964} = 0,251$$

$$\mu = \frac{D}{b_w} = \frac{24,964}{401,964} = 0,062$$

Não ok, o método da seção efetiva não é eficaz para esse caso.

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

- **Método d Largura Efetiva**

Para barras com seção duplamente simétrica ou monosimétricas sujeitas à flexão em torno do eixo de simetria (eixo x).

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

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_z)^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 242,7}{(1,00 \times 300)^2} = 1565,76kN$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \left\{ GJ + \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} \right] \right\} = \frac{1}{15,60^2} \left\{ 7700 \times 1,58 + \left[ \frac{\pi^2 \times 20000 \times 298052,0}{(300)^2} \right] \right\}$$

$$= 2735,78kN$$

$N_{ez}$  é a força normal de flambagem elástica por torção.

$$M_e = 1,0 \times 15,60 \times (1565,76 \times 2735,78)^{0,5} = 32289,3kN.cm$$

$$W_c = W_x = 476,50cm^3$$

$$\lambda_o = \left[ \frac{(W_c f_y)}{M_e} \right]^{0,5} = \left[ \frac{(476,50 \times 23)}{407.692,22} \right]^{0,5} = 0,164 < 0,6 \rightarrow \chi_{FLT} = 1,0$$

$$\sigma = 23,00 \times 1,00 = 23,00$$

Como o valor da tensão (23kN/cm<sup>2</sup>) não varia, não há necessidade de verificação por Flambagem Lateral por Torção.

- **Método da Seção Efetiva**

Como o valor da tensão (23kN/cm<sup>2</sup>) não varia, não há necessidade de verificação por flambagem lateral por torção.

- **Método da Resistência Direta**

- **Flambagem Local por torção**

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

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

$$r_o = 16,54 \text{ cm}$$

$$C_b = 1$$

$$N_{ey} = 6667,25 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = 181.987 \text{ kN}$$

$$M_e = 601.731,05 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_o = 0,135$$

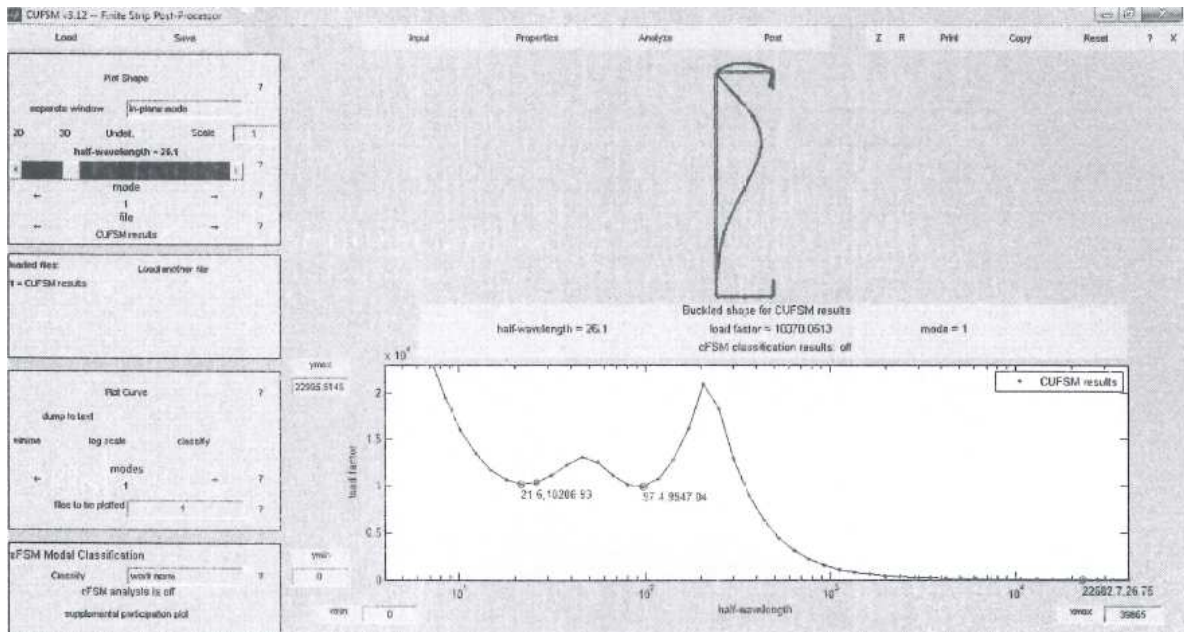
Para  $\lambda_o \leq 0,6$ :  $M_{Re} = W \times f_y$

$$M_{Re} = 476,50 \times 23,00 = 10.959,5 \text{ kN.cm}$$

- **Flambagem Local**

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{Re}}{M_l}}$$

$$M_l = 20.413,86 \text{ kN} \text{ (Obtido pelo software CUFSM e multiplicado por 2)}$$



$$\lambda_l = 0,537$$

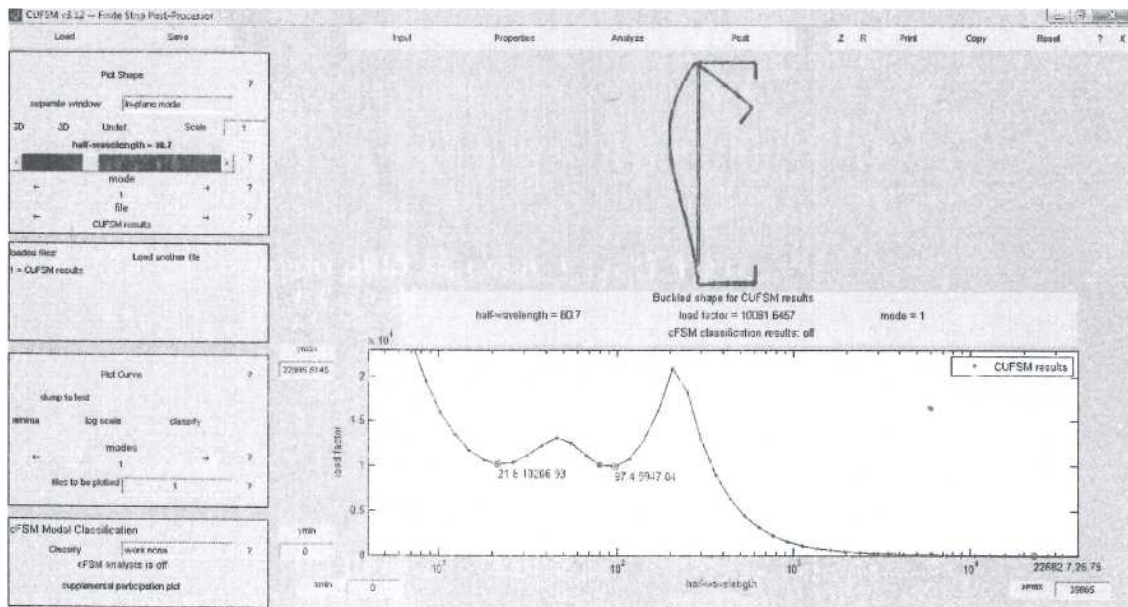
Para  $\lambda_l \leq 0,776$ :  $M_{Rl} = M_{Re}$

$$M_{Rl} = 10.959,5kN.cm$$

○ **Flambagem Distorcional**

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

$M_{dist} = 20.183,31kN$  (Obtido pelo software CUFSM e multiplicado por 2)



$$\lambda_{dist} = 0,737$$

Para  $\lambda_l \geq 0,673$ :  $M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}}\right) \times \frac{W \times f_y}{\lambda_{dist}}$

$$M_{dist} = 10.431,49kN$$

**Determinação de  $M_{RD}$**

$$M_{RD} \leq M_{Re}, M_{Rl}, M_{Rdist}$$

$$M_{RD} = 10.431,49$$

## 8. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 8.1. VIGAS

#### 8.1.1. Resistência a Flexão

MLE –  $M_{RD} = 3.833,1\text{kN.cm}$

MSE – O método não é adequado

MRD –  $M_{RD} = 10.431,49\text{kN}$

Resumo dos Esforços solicitantes do SAP

Momento Fletor (kN.m)							
VIGA	V1	V1A	V2	V2AM	V3	V3B	V3D
EL. 3,00 a 9,00	17,06	37,11	75,53	88,13	11,44	51,88	17,23

Momento Fletor (kN.m)						
VIGA	V1C	V1AC	V2C	V2AC	V3C	V3AC
EL. 12,00	9,1	21,83	44,2	56,65	19,6	39,37

Momento Fletor (kN.m)		
VIGA	V1C	V1AC
EL. 13,50	55,00	5,22

Tomando com critério o menor de ( $MRD=38,331\text{kN.m}$ ) as vigas V2, V2AM, V3B, V2C, V2AC, V3AC e V2CX não poderiam ser adotadas no projeto. Dessa forma, outro perfil deve ser usado. Porém, analisando o catálogo da Metform, percebe-se que apenas um perfil que possui todas as características semelhantes a adotadas nesse projeto, exceto pela espessura ser de 3,75mm e não 3,50mm como apresentado nesse projeto. Como a variação das propriedades geométricas é pouco, não foi verificada uma nova análise para esse perfil e nesse caso a solução seria a utilização de vigas mistas nessas seções, a utilização de perfis oferecidos por outros catálogos ou a utilização de perfis laminados ou soldados. Para uma análise menos rígida, poderia ser adotado o MRD como critério de cálculo e dessa forma todas as vigas estariam aptas a serem usadas. Vale ressaltar que para o dimensionamento das vigas foi verificado apenas à flexão, pelo fato da força de compressão nela ser praticamente nula.

## 8.2. PILARES

### 8.2.1. Resistência a Flexão

MLE –  $M_{RD} = 3.833,1\text{kN.cm}$

MSE – O método não é adequado

MRD –  $M_{RD} = 10.431,49\text{kN}$

### 8.2.2. Resistência a Compressão

MLE –  $N_{RD} = 426,28\text{kN.cm}$

MSE – O método não é adequado

MRD –  $M_{RD} = 247,35\text{kN}$

### 8.2.3. Verificação Flexo-Compressão

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

MLE –  $M_{RD} = 3.833,1\text{kN.cm}$

MSE – O método não é adequado

MRD –  $M_{RD} = 10.431,49\text{kN}$

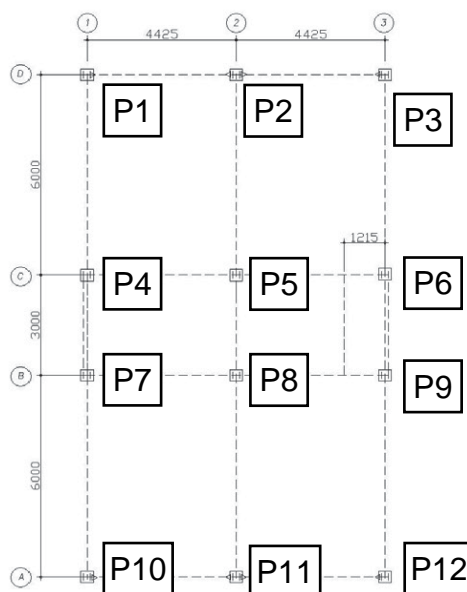


Figura 43 - Convenção da nomenclatura dos pilares

- 1ª Análise considerando os esforços resistentes do MLE

MLE – NRD = 426,28kN

MLE – NRD = 3.833,1kN.cm

	Pilar	Momento Fletor My(kN.m)	Momento Fletor Mx(kN.m)	Força Axial (kN)	Verificação	
Pilares entre EL.0,00 e 3,00	P1=P10	5,55	7,87	233,61	0,90	OK!
	P2=P11	8,60	12,37	390,23	1,46	Não OK!
	P3=P12	9,33	8,04	249,78	1,04	Não OK!
	P4=P7	4,57	1,48	282,74	0,82	OK!
	P5=P8	10,65	11,11	721,69	2,26	Não OK!
	P6=P9	14,50	1,19	432,84	1,42	Não OK!
Pilares entre EL.0,00 e 3,00	P1=P10	2,08	11,22	171,56	0,75	OK!
	P2=P11	6,84	18,19	281,64	1,31	Não OK!
	P3=P12	9,63	11,37	181,89	0,97	OK!
	P4=P7	9,26	2,47	216,07	0,81	OK!
	P5=P8	8,39	10,25	697,82	2,12	Não OK!
	P6=P9	18,71	2,23	346,71	1,36	Não OK!
Pilares entre EL.0,00 e 3,00	P1=P10	4,13	11,02	107,36	0,65	OK!
	P2=P11	4,61	18,19	173,60	1,00	Não OK!
	P3=P12	9,04	11,44	112,22	0,80	OK!
	P4=P7	11,85	2,44	135,41	0,69	OK!
	P5=P8	3,65	10,40	367,07	1,23	Não OK!
	P6=P9	19,78	2,10	241,44	1,14	Não OK!
Pilares entre EL.0,00 e 3,00	P1=P10	10,34	6,72	41,68	0,54	OK!
	P2=P11	15,76	2,48	66,55	0,63	OK!
	P3=P12	10,14	8,80	13,23	0,60	OK!
	P4=P7	2,47	20,76	58,41	0,74	OK!
	P5=P8	8,28	13,07	195,57	1,02	Não OK!
	P6=P9	2,13	15,70	139,22	0,79	OK!

- 2ª Análise considerando os esforços resistentes do MRD

MRD – NRD = 247,35kN

MRD – MRD = 10431,49kN.cm

	Pilar	Momento Fletor My(kN.m)	Momento Fletor Mx(kN.m)	Força Axial (kN)	Verificação	
Pilares entre EL.0,00 e 3,00	P1=P10	5,55	7,87	233,61	1,07	Não OK!
	P2=P11	8,60	12,37	390,23	1,78	Não OK!
	P3=P12	9,33	8,04	249,78	1,18	Não OK!
	P4=P7	4,57	1,48	282,74	1,20	Não OK!
	P5=P8	10,65	11,11	721,69	3,13	Não OK!
	P6=P9	14,50	1,19	432,84	1,90	Não OK!
Pilares entre EL.0,00 e 3,00	P1=P10	2,08	11,22	171,56	0,82	OK!
	P2=P11	6,84	18,19	281,64	1,38	Não OK!
	P3=P12	9,63	11,37	181,89	0,94	OK!
	P4=P7	9,26	2,47	216,07	0,99	OK!
	P5=P8	8,39	10,25	697,82	3,00	Não OK!
	P6=P9	18,71	2,23	346,71	1,60	Não OK!
Pilares entre EL.0,00 e 3,00	P1=P10	4,13	11,02	107,36	0,58	OK!
	P2=P11	4,61	18,19	173,60	0,92	OK!
	P3=P12	9,04	11,43	112,22	0,65	OK!
	P4=P7	11,85	2,44	135,41	0,68	OK!
	P5=P8	3,65	10,40	367,07	1,62	Não OK!
	P6=P9	19,78	2,10	241,44	1,19	Não OK!
Pilares entre EL.0,00 e 3,00	P1=P10	10,34	6,72	41,68	0,33	OK!
	P2=P11	15,76	2,48	66,55	0,44	OK!
	P3=P12	10,14	8,80	43,23	0,60	OK!
	P4=P7	2,47	20,76	58,41	0,46	OK!
	P5=P8	8,28	13,07	195,57	1,00	OK!
	P6=P9	2,13	15,70	139,22	0,73	OK!

Pode perceber-se pela análise dos resultados que não houve resultados que pudessem determinar quais pilares estão dentro do aceitável, visto que seria necessário que ele mantivesse o mesmo perfil em todas as elevações, porém os resultados mostram que para um mesmo pilar, os resultados variam de acordo com a elevação. Dessa pode-se concluir que deverá ser adotado um novo perfil de outro catálogo, visto que o aqui adotado é um dos maiores do catalogo da Metform. Além disso, podem-se adotar mais elementos de contraventamento que pudessem reduzir os esforços. Além disso, a adoção de pilares mistos ou com perfis laminados ou soldados poderiam também ser utilizados nos pilares.



## 9. CONCLUSÕES

Após a comparação dos esforços solicitantes com os esforços resistentes de cálculo foi possível concluir que as seções usadas no dimensionamento do prédio não foram suficientes para atender as exigências das normas, principalmente no que diz respeito aos pilares. A solução a ser feita a mudança do tipo de perfil adotando seções do catálogo da Metform ou semelhante. Além disso, podem-se usar seções mistas, perfis laminados ou soldados.

Não foi abordado nesse trabalho soluções para que a estrutura atendesse aos critérios de cálculo visto que o objetivo desse trabalho se resume em mostrar as várias formas de se obter resultados de esforços resistentes através de vários métodos e compará-los com os esforços solicitantes. Dessa forma, esse trabalho serve com uma experiência das ferramentas, normas e critérios de cálculos usados no dimensionamento de estruturas de aço com perfis formados a frio.