

**PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTA LUZIA/MG**

**MEMÓRIA DE CÁLCULO**

**Cálculo Estrutural - Princípios, Conceitos, Critérios e Resultados**

**PROJETO EXECUTIVO PASSARELAS 3A E 3B**

**PONTE 3 – AV. BRASÍLIA/AV. FRIMISA.**

**PROJETO ESTRUTURAL**

**NOVEMBRO/2021**

**VOLUME I**

## Sumário

<b>1 PARTE I – PONTE 3A .....</b>	<b>3</b>
1.1 Objetivo .....	3
1.2 Normas usadas no cálculo.....	3
1.3 Softwares e livros utilizados .....	3
1.4 Materiais empregados .....	3
1.5 Cargas na estrutura .....	4
1.6 Cálculo da Estrutura de aço.....	6
1.7 Aparelhos de Apoio.....	37
1.8 Cálculo das Fundações.....	39
<b>2 PARTE II – PONTE 3B.....</b>	<b>44</b>
2.1 Objetivo .....	44
2.2 Normas usadas no cálculo.....	44
2.3 Softwares e livros Utilizados .....	44
2.4 Materiais Empregados .....	44
2.5 Cargas na estrutura .....	45
2.6 Cálculo da estrutura de aço.....	47
2.7 Aparelhos de Apoio.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.8 Cálculo das fundações.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

## **1 PARTE I – PONTE 3A**

### **1.1 Objetivo**

O objetivo deste volume é a apresentar a Memória do Cálculo Estrutural correspondente à Passarela 3A adjacente à Ponte 03, na Av. Frimisa, na cidade de Santa Luzia - MG.

### **1.2 Normas usadas no cálculo**

Estamos usando as seguintes Normas:

- Norma NBR 8800, 1986, Projeto e Cálculo de Estruturas de Aço;
- Norma NBR 6120, Projeto e Execução de obras de Concreto Armado;
- Norma NBR 6122, Projeto e Execução de Fundações;
- Norma NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento;
- Norma NBR 14762 (2009) – Dimensionamento de estruturas de aço construídas por perfis conformados a frio;
- Norma NBR 7187- Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido.

### **1.3 Softwares e livros utilizados**

Programas da STABILE para cálculo e dimensionamento de estruturas de aço.

Livros: Belley, Ildoni: Edifícios de Aço, Projeto e Cálculo; editora PINI.

### **1.4 Materiais empregados**

A estrutura é em aço UsiSac 300, fabricado pela USIMINAS, com tensão de escoamento,  $F_Y = 300\text{MPa}$ , e de ruptura,  $F_U = 410\text{MPa}$ , ou similar. Temos usado esses aços resistentes à corrosão atmosférica desde 1970. São apropriados sob atmosferas não agressivas. Têm baixo custo de pintura, quando são pintados. E, praticamente, dispensam manutenção, mas devem ser inspecionados anualmente como toda obra

de arte. Periodicamente a sujeira deve ser removida não só por razões estéticas. O acúmulo de pó na estrutura pode provocar corrosão dependendo do tipo de poeira acumulada.

Resíduos de enxofre expulsos pelo cano de descarga dos veículos, acumulados na estrutura, podem desenvolver ambiente ácido (sulfúrico) provocando corrosão química nas peças estruturais.

Estamos usando concreto armado  $F_{ck}=25$  MPa. Armaduras em aço CA 50.

Pintura: a estrutura de aço deverá ser limpa manualmente com solventes e as juntas estruturais devem ser calafetadas usando pasta automotiva, impedindo a penetração de água no interior das vigas, que são ocas; a estrutura pode ser pintada com apenas uma demão, fundo-acabamento, de tinta BEMA para aço resistente à corrosão, cor escolhida pelo cliente. Observe que esta especificação simplificada, que permite limpeza manual das peças estruturais usando solventes e a aplicação de apenas uma demão de tinta se deve ao fato de estarmos usando aço resistente à corrosão atmosférica, com adição de cobre ou de nióbio.

## **1.5 Cargas na estrutura**

### **1.5.1 Peso próprio**

O peso-próprio da estrutura de aço foi calculado automaticamente pelo software e computado em valores rigorosamente reais no dimensionamento estrutural.

### **1.5.2 ESTADO 1 Piso da passarela**

=>200 kgf/m<sup>2</sup> =>corresponde ao peso de uma laje de concreto de 8cm de espessura; piso de aço que pesa 100 kgf/m<sup>2</sup>, aproximadamente.

### **1.5.3 ESTADO 2 Sobrecarga na passarela**

=>500 kgf/m<sup>2</sup>; conforme NBR 7187.

#### 1.5.4 ESTADO 3 Outras cargas adicionais

=>20 kgf/m em cada viga.

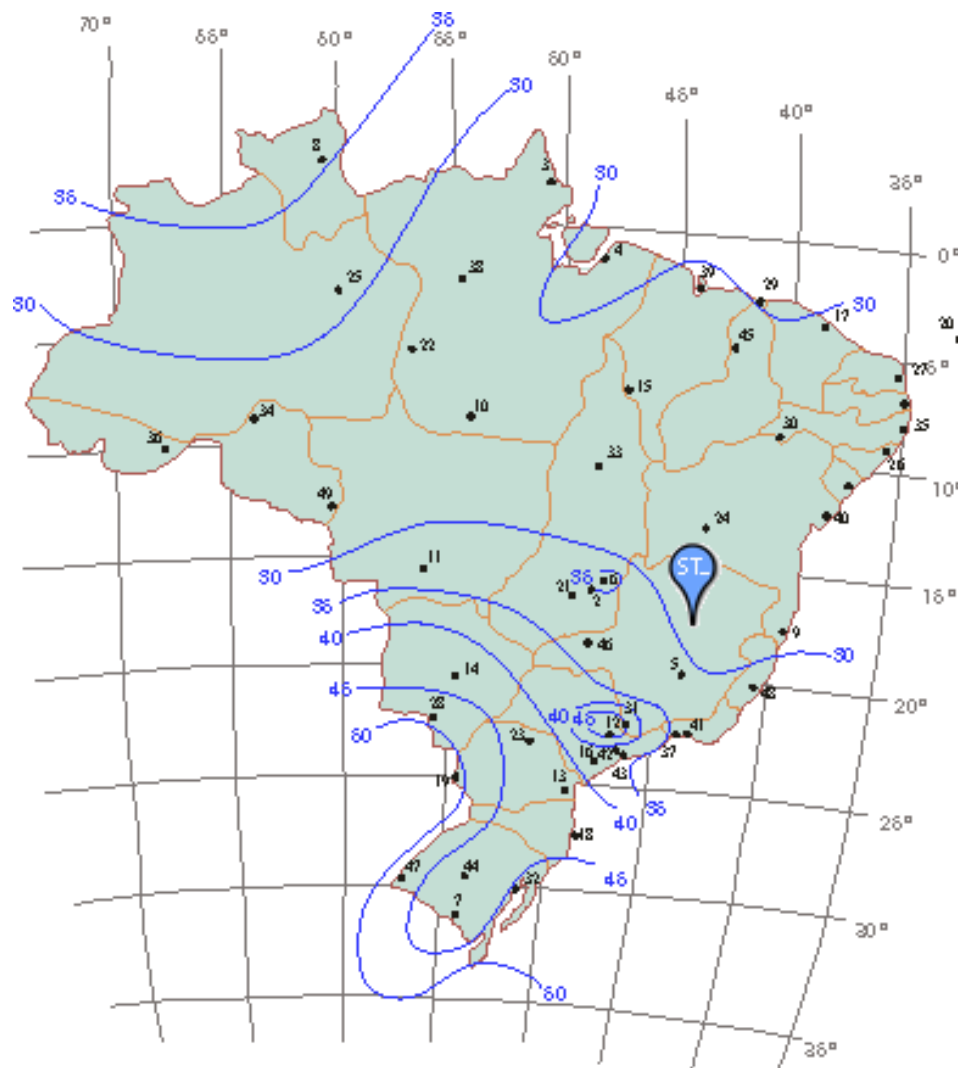
#### 1.5.5 ESTADO 4 Vento

Conforme NBR 6123.

##### 1.5.5.1 Ação do vento na edificação

##### 1.5.5.1.1 Determinação da pressão dinâmica do vento

##### 1.5.5.1.1.1 Velocidade básica do vento



$V_0 = 30 \text{ m/s}$

##### 1.5.5.1.1.2 Fator topográfico $S_1$

$$S_1 = 1,00$$

Terreno plano ou fracamente acidentado

#### **1.5.5.1.1.3 Fator que relaciona rugosidade, dimensões da edificação e altura sobre o terreno $S_2$**

Rugosidade do terreno: categoria III

Dimensões da edificação: classe B

$$Z = 1,60\text{m} \quad \text{Altura acima do terreno}$$

$$S_2 = 0,86$$

#### **1.5.5.1.1.4 Fator estatístico $S_3$**

Edificação Grupo 3

$$S_3 = 0,95$$

#### **1.5.5.1.1.5 Pressão dinâmica**

$$V_0 = 30 \text{ m/s} \quad \text{Velocidade básica do vento}$$

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 = 24,41 \text{ m/s} \quad \text{Velocidade característica do vento}$$

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 = 37,24 \text{ kgf/m}^2$$

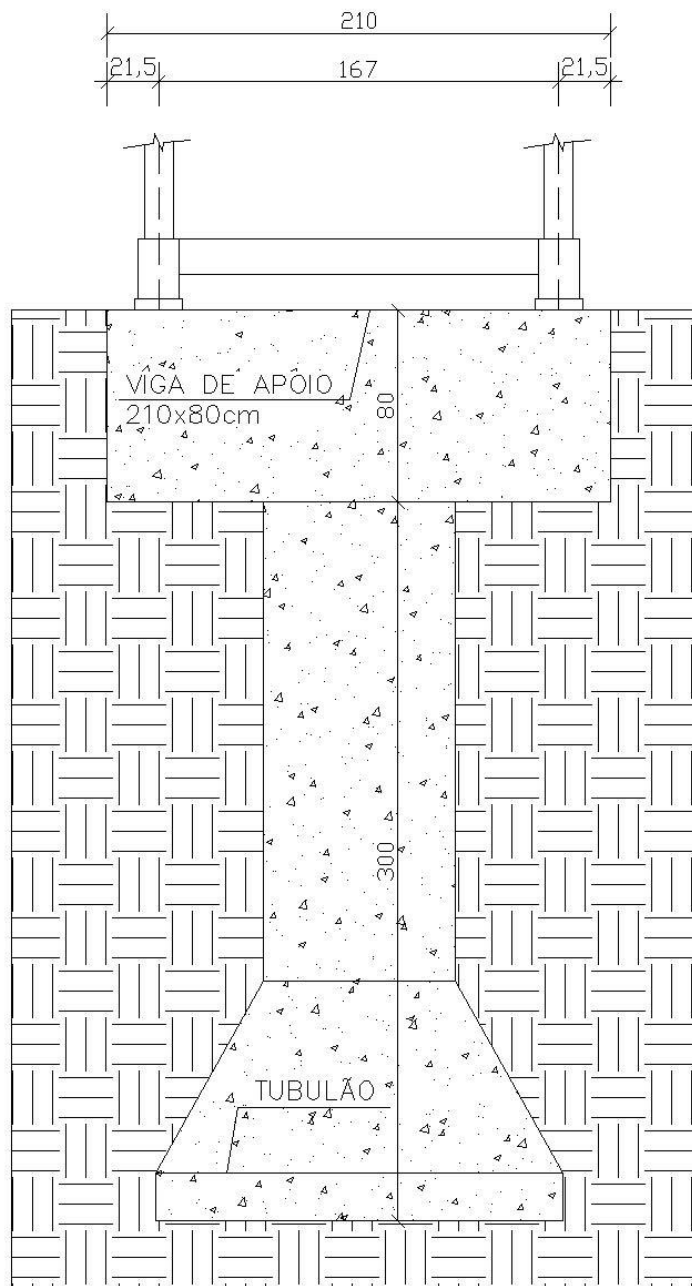
=> Vento perpendicular à lateral da passarela => coeficientes de pressão e sucção =>  $(0,7 + 0,5) \times 37,24 = 44,7 \text{ kgf/m}^2$ .

No Brasil Central a ação do vento nesse tipo de obra não é significativa. Seja devido à baixa velocidade do vento, apenas 30m/s; seja pelo tipo de obra posicionado ao rés do chão; seja pela viga em treliça que deixa o vento passar; seja pela preponderância da sobrecarga de 500kgf/m<sup>2</sup>.

## **1.6 Cálculo da Estrutura de aço**

### **1.6.1 Desenhos da passarela**





FUNDAÇÃO – VIGA DE APOIO E TUBULÃO  
ESCALA 1:20

### 1.6.2 Cálculo de corda superior da Viga principal

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

#### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 300 x 85 x 20 x 4.75



Aço: USI-SAC 300       $f_y = 300\text{MPa}$        $f_u = 400\text{ MPa}$

### COMPRIMENTOS DA BARRA

$K_x L_x = 200\text{ cm}$        $K_z L_z = 200\text{ cm}$   
 $K_y L_y = 200\text{ cm}$        $L_b = 200\text{ cm}$

#### 1.6.2.1 Cálculo da Tração

$$C_T = 1,00 \quad \text{Coeficiente de redução da área líquida}$$

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = \frac{122290,91 \text{ kgf}}{1,10} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = \frac{108703,03 \text{ kgf}}{1,65} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 108703,03 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 1.6.2.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 2771711,74 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 1091596,13 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 19037272,02 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{x_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 2771711,74 \text{ kgf}$$

$$N_e = 1091596,13 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,35$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,95$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 36,61 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 86919,57 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 36,24 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 90609,03 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 86919,57 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,66 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.2.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

#### 1.6.2.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 44,84 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 5616,66 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,00 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 15,00 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 5616,66 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 374,44 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 1021211,32 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

### 1.6.2.3.2 Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 60836848,55 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 260,24 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,11 \quad \lambda_o \leq 0,6 \quad \text{então} \quad \chi_{FLT} = 1,0$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } W_{cef} \text{ na tensão} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$A_{ef} = 44,84 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 5616,66 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,00 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 15,00 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 5616,66 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{cef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 374,44 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 1021211,32 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}$$

$$M_{Rdx} = 1021211,32 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,13 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.2.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$A_{ef} = 40,54 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 1853,01 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

$$d = 0,88 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$x_{G \text{ final}} = x_G + d = 9,38 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 1821,90 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 194,32 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 529950,71 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.2.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 31,79 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento}$$

$\lambda \leq \lambda_p$  então

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdy} = 23473,64 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.2.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 59,16 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento}$$

$\lambda \leq \lambda_p$  então

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 43682,73 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.2.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,79$$

$$\frac{N_{cSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,79$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,13$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,13$$

### 1.6.3 Cálculo de Corda Inferior da Viga principal

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

#### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 250 x 85 x 20 x 4.75

Aço: USI-SAC-300       $f_y = 300\text{MPa}$        $f_u = 400\text{ MPa}$

#### COMPRIMENTOS DA BARRA

$K_x L_x = 200\text{ cm}$        $K_z L_z = 200\text{ cm}$

$K_y L_y = 200\text{ cm}$        $L_b = 200\text{ cm}$

#### 1.6.3.1 Cálculo da Tração

$C_T = 1,00$       Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = \frac{109336,36\text{ kgf}}{1,10} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = \frac{97187,88\text{ kgf}}{1,65} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 97187,88\text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,59 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 1.6.3.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 1789683,84 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 931527,63 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 18335259,47 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 1789683,84 \text{ kgf}$$

$$N_e = 931527,63 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,36$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,95$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 35,70 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 84561,95 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 35,37 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 88423,58 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 84561,95 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.3.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

### 1.6.3.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 40,09 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 3626,66 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 12,50 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 3626,66 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 290,13 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 791270,77 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

### 1.6.3.3.2 Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem lateral com torção

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 48954319,33 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 222,08 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,12 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0 \\
 \chi_{FLT} &= 1,00 && \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção} \\
 \text{Cálculo de } W_{cef} \text{ na tensão } \sigma &= \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2 \\
 A_{ef} &= 40,09 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 3626,66 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 12,50 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 3626,66 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 290,13 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 791270,77 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT} \\
 M_{Rdx} &= 791270,77 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,09 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

#### 1.6.3.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$A_{ef} = 37,73 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 1705,70 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

$$d = 0,52 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$X_{G \text{ final}} = X_G + d = 9,02 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 1695,62 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{X_{G \text{ final}}} = 188,05 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 512862,23 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 1.6.3.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 31,79 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdy} = 23473,64 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$



### 1.6.3.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 48,63 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 35910,00 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.3.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,09$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,68$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,50$$

### 1.6.4 Cálculo da Diagonal Comprimida, no Apoio

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

#### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 75 x 40 x 15 x 3

Aço: USI-SAC-300  $f_y = 300\text{MPa}$   $f_u = 400\text{ MPa}$

## COMPRIMENTOS DA BARRA

$$K_x L_x = 128,06 \text{ cm} \quad K_z L_z = 128,06 \text{ cm}$$

$$K_y L_y = 128,06 \text{ cm} \quad L_b = 128,06 \text{ cm}$$

### 1.6.4.1 Cálculo da Tração

$$C_T = 1,00 \quad \text{Coeficiente de redução da área líquida}$$

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 26345,45 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 23418,18 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 23418,18 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.4.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 97739,42 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 98326,50 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 6447970,06 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{x_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 97739,42 \text{ kgf}$$

$$N_e = 97739,42 \text{ kgf}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,54$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_0)^2 = 0,88$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 9,66 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 21331,46 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 9,66 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 24150,00 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 21331,46 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,36 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.4.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

#### 1.6.4.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 9,66 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 81,20 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,00 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 3,75 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 81,20 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 21,65 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{FL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 59056,04 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

### 1.6.4.3.2 Cálculo do momento resistente devido ao estado limite

#### Flambagem Lateral com Torção

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 7226037,05 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 20,42 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = \begin{matrix} \lambda_o \leq 0,6 \\ 0,09 \end{matrix} \quad \text{então} \quad \chi_{FLT} = 1,0$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } \frac{W_{cef}}{\text{na tensão}} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$A_{ef} = 9,66 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 81,20 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,00 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 3,75 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 81,20 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{cef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 21,65 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 59056,04 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}$$

$$M_{Rdx} = 59056,04 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,04 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.4.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 9,66 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{yef} &= 81,69 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 X_{G \text{ final}} &= X_G + d = 4,00 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 81,69 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{X_{G \text{ final}}} = 20,42 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdy} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 55697,59 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,01 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

#### 1.6.4.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{h}{t} = 22,67 && \text{Parâmetro de esbeltez} \\
 k_v &= 5,00 && \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento} \\
 \lambda_p &= 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação} \\
 \lambda_r &= 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \\
 V_{Rd} &= \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10} && \lambda \leq \lambda_p \text{ então} \\
 V_{Rdy} &= 6676,36 \text{ kgf} && \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

#### 1.6.4.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 21,00 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento}$$

$\lambda \leq \lambda_p$  então

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 6185,45 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,01 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 1.6.4.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,42$$

$$\frac{N_{cSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,42$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,05$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,05$$

#### 1.6.5 Montante nos Apoios

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

#### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 150 x 60 x 20 x 2.25

Aço: COS-CIVIL 300  $f_y = 300 \text{ MPa}$   $f_u = 400 \text{ MPa}$

## COMPRIMENTOS DA BARRA

$$K_x L_x = 160 \text{ cm} \quad K_z L_z = 160 \text{ cm}$$

$$K_y L_y = 160 \text{ cm} \quad L_b = 160 \text{ cm}$$

### 1.6.5.1 Cálculo da Tração

$$C_T = 1,00 \quad \text{Coeficiente de redução da área líquida}$$

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 35836,36 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 31854,55 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 31854,55 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.5.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 349855,76 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 219587,03 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 9984028,15 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 349855,76 \text{ kgf}$$

$$N_e = 219587,03 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,42$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,93$$

Elemento A.A. com b/t > 60.

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 10,02 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 23238,76 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

Elemento A.A. com  $b/t > 60$ .

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 9,79 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 24480,22 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 23238,76 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

### 1.6.5.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

#### 1.6.5.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 12,58 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 423,32 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,33 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$Y_{G \text{ final}} = Y_G + d = 7,83 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{Y_{G \text{ final}}} = 53,91 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 147029,11 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

#### 1.6.5.3.2 Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção



$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 24198876,67 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 47,46 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = \frac{0,08}{0,08} \leq 0,6 \quad \text{então} \quad \chi_{FLT} = 1,0$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } \frac{W_{cef}}{\text{na tensão}} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$A_{ef} = 12,58 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 423,32 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,33 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 7,83 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{cef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = \frac{421,97}{7,83} = 53,91 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = \frac{1,00 \cdot 53,91 \cdot 3000}{1,10} = 147029,11 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}$$

$$M_{Rdx} = 147029,11 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = \frac{147029,11}{147029,11} = 1,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 1.6.5.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$A_{ef} = 12,02 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 238,55 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

$$d = 0,55 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$x_{G \text{ final}} = x_G + d = 6,55 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 234,95 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = \frac{234,95}{6,55} = 35,89 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = \frac{35,89 \cdot 3000}{1,10} = 97877,47 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = \frac{97877,47}{97877,47} = 1,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.5.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 49,33 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento}$$

$$\lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdy} = 8173,64 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.5.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 62,67 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento}$$

$$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad \text{então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,65 \cdot t^2 \cdot \sqrt{k_v \cdot f_y \cdot E}}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 10362,78 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,02 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.5.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,39$$

$$\frac{N_{cSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,39$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,16$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,16$$

### 1.6.6 Montantes

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

#### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 75 x 40 x 15 x 2.25

Aço: USI-SAC-300       $f_y = 300 \text{ MPa}$        $f_u = 400 \text{ MPa}$

#### COMPRIMENTOS DA BARRA

$K_x L_x = 160 \text{ cm}$        $K_z L_z = 160 \text{ cm}$

$K_y L_y = 160 \text{ cm}$        $L_b = 160 \text{ cm}$

#### 1.6.6.1 Cálculo da Tração

$C_T = 1,00$       Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 20495,45 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 18218,18 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 18218,18 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,02 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.6.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 50235,39 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 49435,20 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 5824656,95 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 50235,39 \text{ kgf}$$

$$N_e = 49435,20 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,68$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_0)^2 = 0,83$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 7,51 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 15522,82 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 7,51 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 18787,50 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 15522,82 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.6.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

#### 1.6.6.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 7,51 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 65,15 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 3,75 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 65,15 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 17,37 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{PL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 47382,42 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

#### 1.6.6.3.2 Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 5029628,46 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 16,03 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,10 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0
 \end{aligned}$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } \frac{W_{cef}}{\text{na tensão}} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 7,51 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 65,15 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 3,75 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico}
 \end{aligned}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 65,15 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{cef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 17,37 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 47382,42 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}$$

$$M_{Rdx} = 47382,42 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,10 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 1.6.6.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 7,51 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{yef} &= 64,11 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 X_{G \text{ final}} &= X_G + d = 4,00 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 64,11 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{X_{G \text{ final}}} = 16,03 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdy} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 43713,45 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \\
 \frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,01 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

#### 1.6.6.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{h}{t} = 31,56 && \text{Parâmetro de esbeltez} \\
 k_v &= 5,00 && \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento} \\
 \lambda_p &= 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação} \\
 \lambda_r &= 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \\
 V_{Rd} &= \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10} && \lambda \leq \lambda_p \text{ então} \\
 V_{Rdy} &= 5228,18 \text{ kgf} && \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y} \\
 \frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} &= \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

#### 1.6.6.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 29,33 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento}$$

$\lambda \leq \lambda_p$  então

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 4860,00 \text{ kqf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,01 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.6.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,10$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,12$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,09$$

### 1.6.7 Transversinas

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

#### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 150 x 60 x 20 x 2.25

Aço: COS-CIVIL 300  $f_y = 300 \text{ MPa}$   $f_u = 400 \text{ MPa}$

#### COMPRIMENTOS DA BARRA

$K_x L_x = 170 \text{ cm}$   $K_z L_z = 170 \text{ cm}$

$K_y L_y = 170 \text{ cm}$   $L_b = 170 \text{ cm}$

### 1.6.7.1 Cálculo da Tração

$C_T = 1,00$  Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 35836,36 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 31854,55 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 31854,55 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.7.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 309906,83 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 194513,07 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 9984028,15 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{x_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 309906,83 \text{ kgf}$$

$$N_e = 194513,07 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,45$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,92$$

Elemento A.A. com b/t > 60.

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 10,05 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 23082,97 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$



Elemento A.A. com  $b/t > 60$ .

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 9,79 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 24480,22 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 23082,97 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 1.6.7.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

#### 1.6.7.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 12,58 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 423,32 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,33 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 7,83 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 53,91 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{FL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 147029,11 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

#### 1.6.7.3.2 Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 11910078,53 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 47,46 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,11 \quad \lambda_o \leq 0,6 \quad \text{então} \quad \chi_{FLT} = 1,0$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } \frac{W_{cef}}{\text{na tensão}} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$A_{ef} = 12,58 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 423,32 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,33 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 7,83 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{cef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 53,91 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 147029,11 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}$$

$$M_{Rdx} = 147029,11 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,48 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 1.6.7.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$A_{ef} = 12,02 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 238,55 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

$$d = 0,55 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$x_{G \text{ final}} = x_G + d = 6,55 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 234,95 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 35,89 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 97877,47 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 1.6.7.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 49,33 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento}$$

$\lambda \leq \lambda_p$  então

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdy} = 8173,64 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 1.6.7.6 Cálculo da Resistência ao Cortante - eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 62,67 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento}$$

$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$  então

$$V_{Rd} = \frac{0,65 \cdot t^2 \cdot \sqrt{k_v \cdot f_y \cdot E}}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 10362,78 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,16 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 1.6.7.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,49$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,49$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,49$$

### 1.6.8 Piso de Aço

=>Sobrecarga no piso conforme NBR7187 =>500 kgf/m<sup>2</sup> =>com majoração =>1,4x500=700 kgf/m<sup>2</sup>; peso-próprio da chapa 50 kgf/m<sup>2</sup>.

A chapa de 6,35mm, que é a parte principal do piso, funciona como uma viga continua sobre 5 apoios como mostrado no desenho abaixo. Assim, uma faixa de 100cm de largura estará carregada com (1,4x700) kgf/m de sobrecarga mais (50x1,25) kgf/m de peso-próprio, que representam o carregamento majorado.

Os carregamentos sem majoração nas vigas do piso serão:

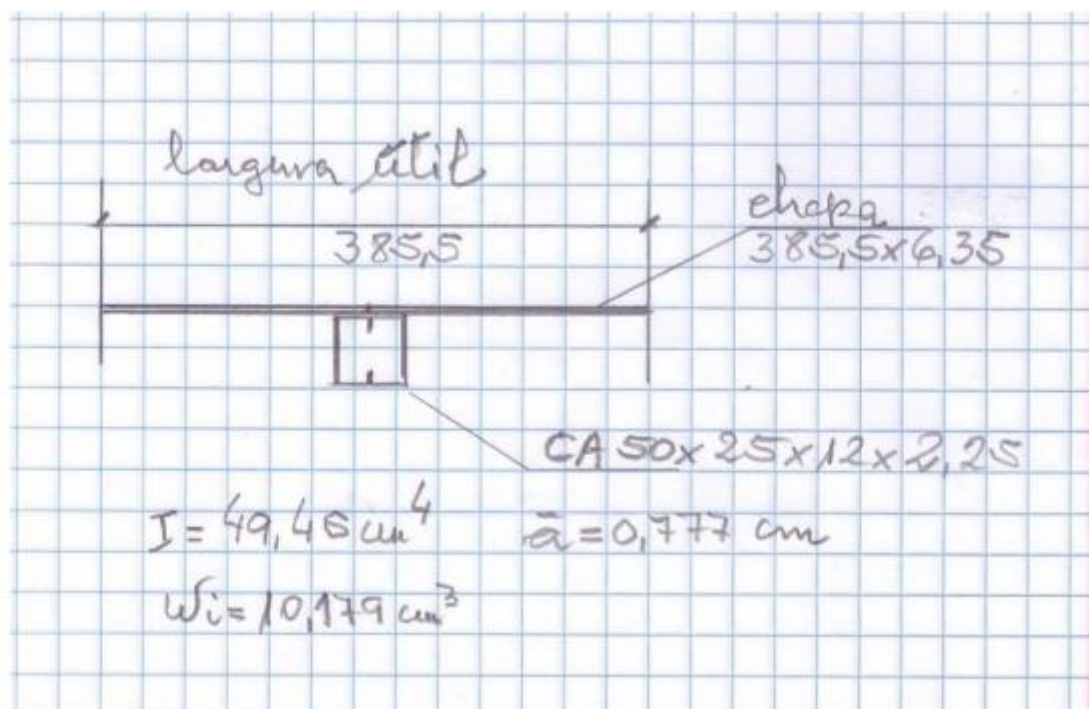
$$\Rightarrow R1=74 \text{ kg/m}$$

$$\Rightarrow R2=237 \text{ kg/m}$$

$$\Rightarrow R3=229 \text{ kg/m}$$

O máximo fletor majorado na viga será:

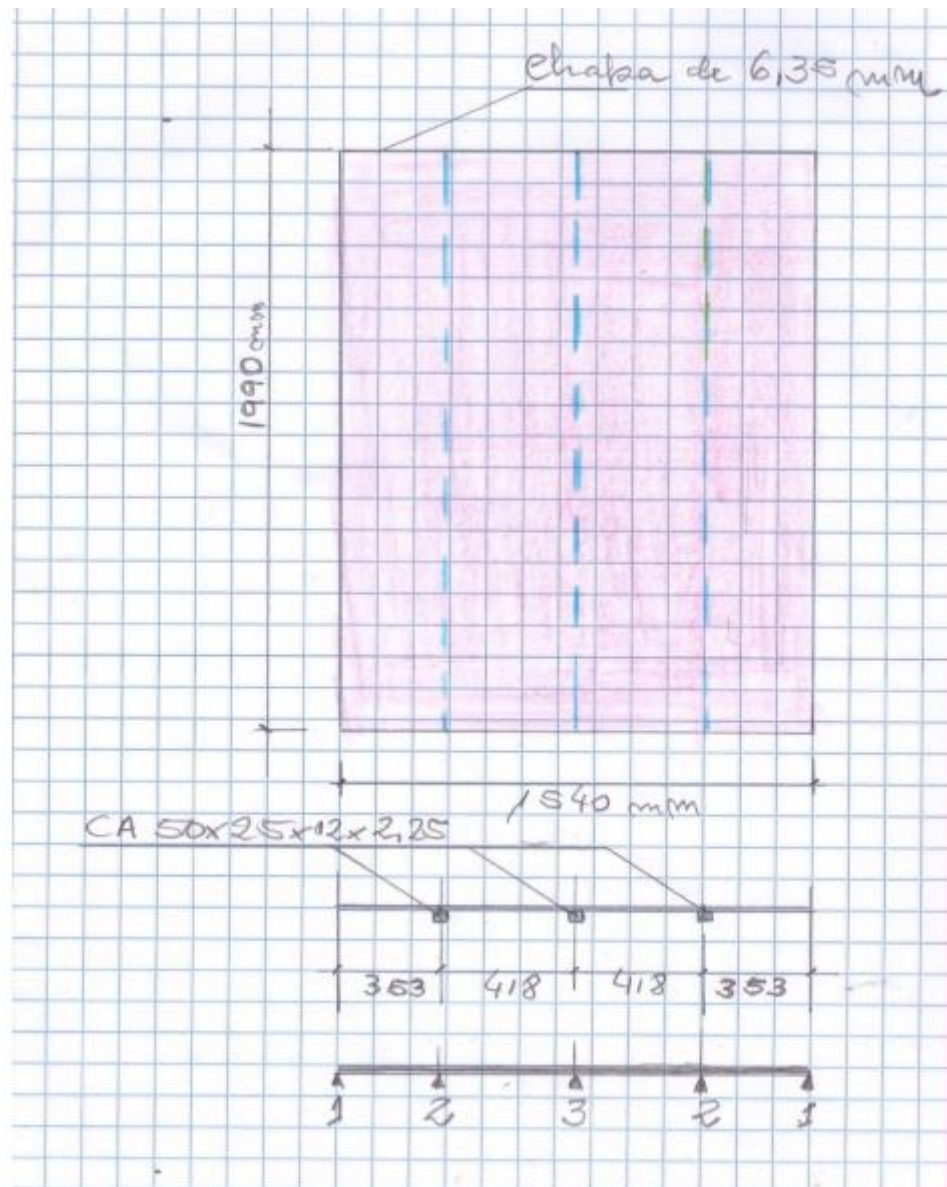
$$\Rightarrow_{\max} Msd = (237 \times 1,4) \times 1,99^2 / 8 = 164,3 \text{ kgf.m} = 16,43 \text{ tf.cm}$$



$$\text{Momento resistente} \Rightarrow M_{RY} = 10,179 \times 2,5 / 1,1 = 23,14 \text{ tf.cm}$$

$$\Rightarrow 16,43 / 23,14 = 0,71 < 1,0.$$

Neste cálculo usamos chapa xadrez com tensão de escoamento  $F_y=250\text{MPa}$ , embora o perfil seja em aço  $F_y=300\text{MPa}$ . Acreditamos ser difícil encontrar a chapa xadrez resistente à corrosão. Este piso em chapa é escolha do cliente. Pode, todavia, ser usado um piso de 8cm de concreto.



## 1.7 Aparelhos de Apoio

### 1.7.1 Deslocamentos devido à temperatura e à flexão.

=>Consideramos apoios de neoprene fretado, vale dizer, semimóveis, ou semifixos, se preferir.

=>Deslocamento longitudinal devido à temperatura:

$$\Rightarrow d_{XT} = (\pm 0,012 \times 24,26 \times 35) \times 0,5 = \pm 5,1 \text{ mm};$$

=>Deslocamento devido à flexão da viga principal:

$$\Rightarrow d_x = 10,43/2 = + 5,22 \text{ mm}$$

Resumo dos deslocamentos=>  $dx = (5,1 + 5,22) = + 10,32 \text{ mm}; dx = - 5,1 \text{ mm}$

### 1.7.2 Escolha do Aparelho de Apoio

Máxima carga vertical=>  $N_c = 8,6 \times 1,4 = 12 \text{ tf}$  (com majoração).

Usando a TABELA da RUBBERFLEX, (fabricação MEPEL)

Resumo dos deslocamentos=>  $dx = (5,1 + 5,22) = +10,32 \text{ mm}; dx = - 5,1 \text{ mm}$

Resumo deste item:

- Duas dimensões de aparelhos de apoio podem ser usadas, ou uma ou outra, dependendo da conveniência da compra:

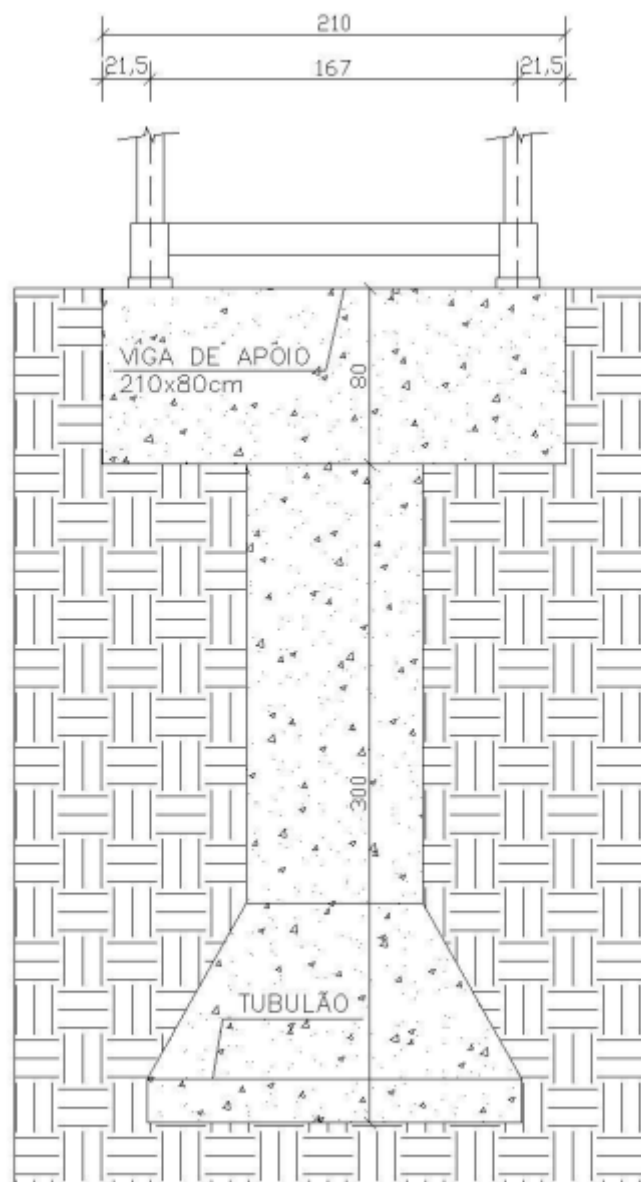
=> de 100x150mm por 28mm de espessura; deslocamento máximo de 14mm; carga de 15 tf;

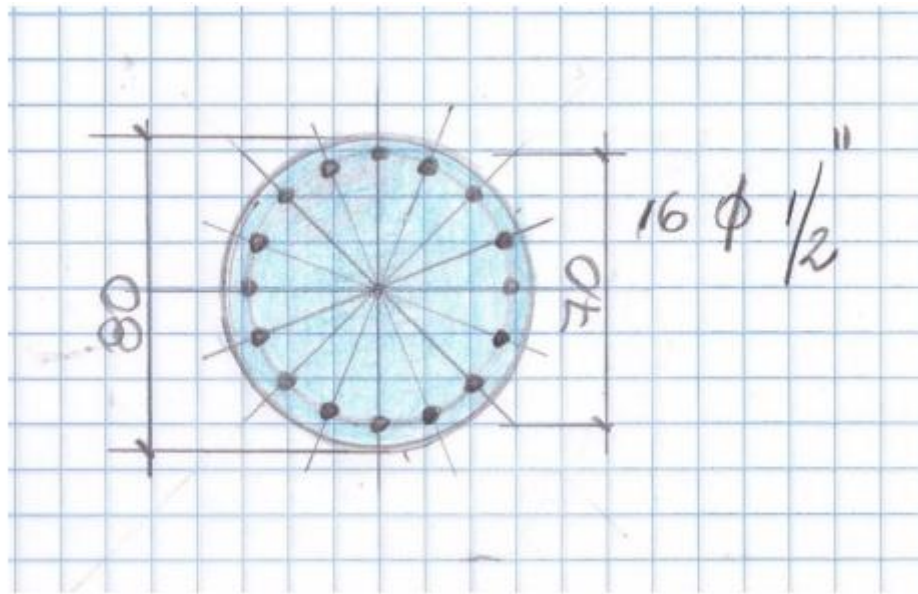
=> de 150x200mm por 28mm de espessura; deslocamento máximo de 14mm; carga de 30 tf;



## 1.8 Cálculo das Fundações

### 1.8.1 Desenhos das Fundações





Diâmetro da base => 1,60m; diâmetro do fuste => 0,8m.

Reações nos apoios não majoradas, para passarela 3A.

=> Apoios =>  $R1 = 2 \times 11,2$  tf.

Carga no tubulão =>

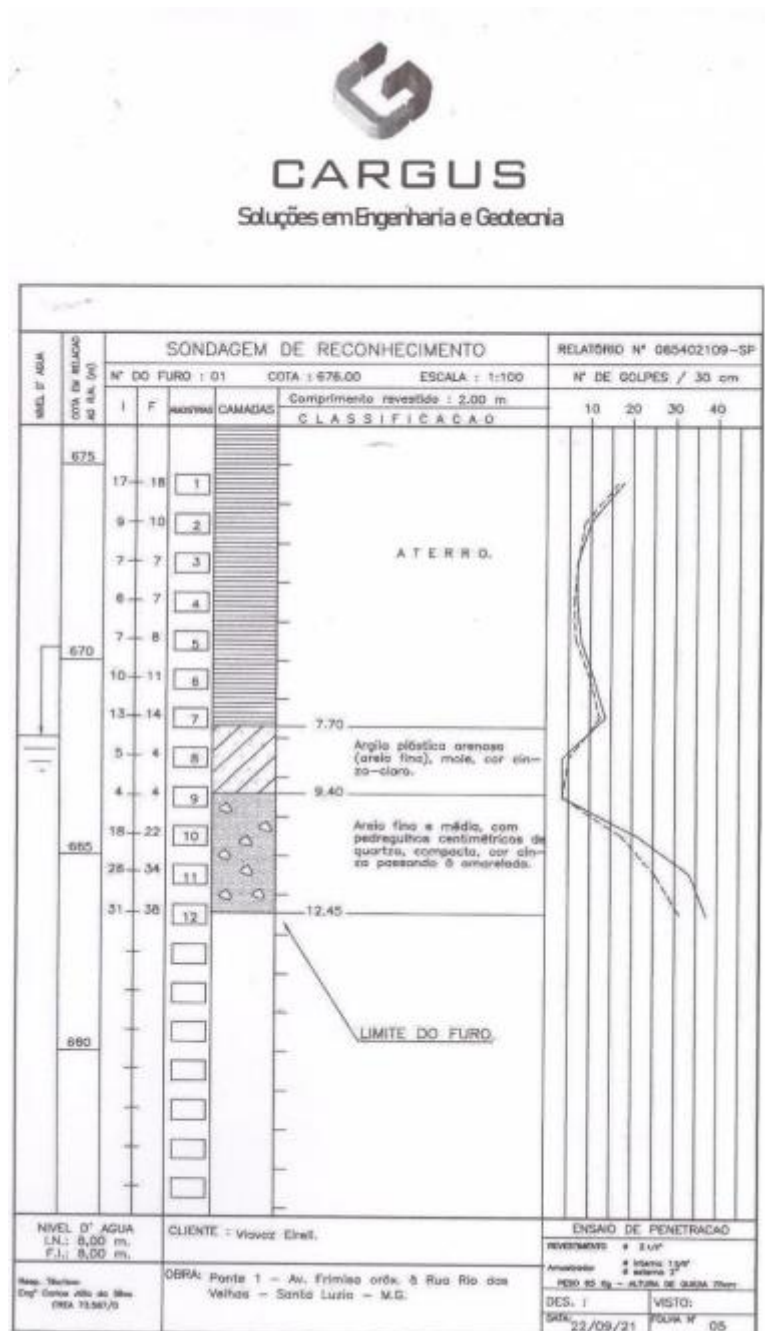
=>  $R_{\text{tubulão}} = (11,2 \times 2) \times 1,4 + (2,1 \times 0,8 \times 0,8 \times 2,5) \times 1,4 + (3,77 + 1,00 + 2,51) \times 1,4 = 31,36 + 4,7 + 10,2 = 46,26$  tf

=> Carga para dimensionamento do solo (sem majoração) = 33 tf

### 1.8.2 Cálculo da resistência do solo para passarela 3A e 3B

Resultado da sondagem de reconhecimento realizada pela CARGUS em 23.09.2021.





Valores da sondagem de reconhecimento levados ao algoritmo de resistência do solo usando o método de AOKI-VELOSO.



Do desenho no item 3A.8.1=>

$R=11,2 \times 1,4=15,68$  tf=>Momento fletor máximo na viga sobre o tubulão=>

$\max M_{sd}= 15,68 \times (167 \times 0,5 - 30) + 1,4 \times 0,016 \times 0,5 \times (53,5)^2 = 839 + 32 = 871$  tf.cm

**Armadura**=> $MR=4 \times 3,031 \times 70=$  848 tf.cm>674

tf.cm>674/848=0,80<1,0

**Estribos**=>  $\max V= 8,6 \times 1,4 + 1,4 \times 0,016 \times 53,5= 13,24$  tf

$13,24 / (2,136 \times 2) = 3,1$  ferros cada 70cm=>**4,43 ferros de 8mm por metro ou um estribo de 8mm cada 20cm.**

#### 1.8.4 Cálculo do tubulão

$\max N_{sd}= 37,7$  tf=> Força normal resistente do tubulão, com concreto

$F_{ck} = 20$  Mpa=> $NR= (802 \times 0,25 \times \pi) \times 0,20 \times 0,85 / 1,4 + 16 \times 5,383 = 696$  tf>37,7 tf

=> $37,7 / 696 = 0,055 < 1,0$

**Nota:** o tubulão está com a armadura mínima exigida pela Norma, ou seja,  $(0,004 \times A) = (0,25 \times 3,1415 \times 802) \times 0,004 = 20,1$  cm<sup>2</sup>=>

=>**16 ferros de ½”=>16x1,266=20,25cm<sup>2</sup>>20,1 cm<sup>2</sup>**

**Estribos=> 1 ferro de 8mm cada 20cm**

## **2 PARTE II – PONTE 3B**

### **2.1 Objetivo**

O objetivo deste volume é a apresentar a Memória do Cálculo Estrutural correspondente à Passarela 3B adjacente à Ponte 03, na Av. Frimisa, na cidade de Santa Luzia - MG.

### **2.2 Normas usadas no cálculo**

#### **Estamos usando as seguintes Normas:**

- Norma NBR 8800, 1986, Projeto e Cálculo de Estruturas de Aço;
- Norma NBR 6120, Projeto e Execução de obras de Concreto Armado;
- Norma NBR 6122, Projeto e Execução de Fundações;
- Norma NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento;
- Norma NBR 14762 (2009) – Dimensionamento de estruturas de aço construídas por perfis conformados a frio.
- Norma NBR 7187- Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido.

### **2.3 Softwares e livros Utilizados**

Programas da STABILE para cálculo e dimensionamento de estruturas de aço.

Livros: Belley, Ildoni: Edifícios de Aço, Projeto e Cálculo; editora PINI;

### **2.4 Materiais Empregados**

A estrutura é em aço UsiSac 300, fabricado pela USIMINAS, com tensão de escoamento,  $F_Y = 300\text{MPa}$ , e de ruptura,  $F_U = 410\text{MPa}$ , ou similar. Temos usado esses aços resistentes à corrosão atmosférica desde 1970. São apropriados sob atmosferas não agressivas. Têm baixo custo de pintura, quando são pintados. E, praticamente, dispensam manutenção, mas devem ser inspecionados anualmente como toda obra de arte. A

sujeira deve ser removida não só por razões estéticas. O acúmulo de pó na estrutura pode provocar corrosão dependendo do tipo de poeira acumulada. Resíduos de enxofre expulsos pelo cano de descarga dos veículos, acumulados na estrutura, podem desenvolver ambiente ácido (sulfúrico) provocando corrosão química nas peças estruturais.

Estamos usando concreto armado  $F_{ck}=25$  MPa. Armaduras em aço CA 50.

Pintura: a estrutura de aço deverá ser limpa manualmente com solventes e as juntas estruturais devem ser calafetadas usando pasta automotiva, impedindo a penetração de água no interior das vigas, que são ocas; a estrutura pode ser pintada com apenas uma demão, fundo-acabamento, de tinta BEMA para aço resistente à corrosão, cor escolhida pelo cliente. Observe que esta especificação simplificada, que permite limpeza manual das peças estruturais usando solventes e a aplicação de apenas uma demão de tinta, se deve ao fato de estarmos usando aço resistente à corrosão atmosférica, com adição de cobre ou de nióbio.

## **2.5 Cargas na estrutura**

### **2.1.1 Peso próprio**

O peso-próprio da estrutura de aço foi calculado automaticamente pelo software e computado em valores rigorosamente reais no dimensionamento estrutural.

### **2.1.2 -ESTADO 1-piso da passarela**

=>200 kgf/m<sup>2</sup>

Corresponde ao peso de uma laje de concreto de 8cm de espessura; o cliente solicitou um piso de aço que pesa 100 kgf/m<sup>2</sup>, aproximadamente.

### **2.1.3 -ESTADO 2 – Sobrecarga na passarela**

=>500kgf/m<sup>2</sup>; conforme NBR 7187.

### **2.1.4 -ESTADO 3 – Outras cargas adicionais**

=>70 kgf/m em cada viga.

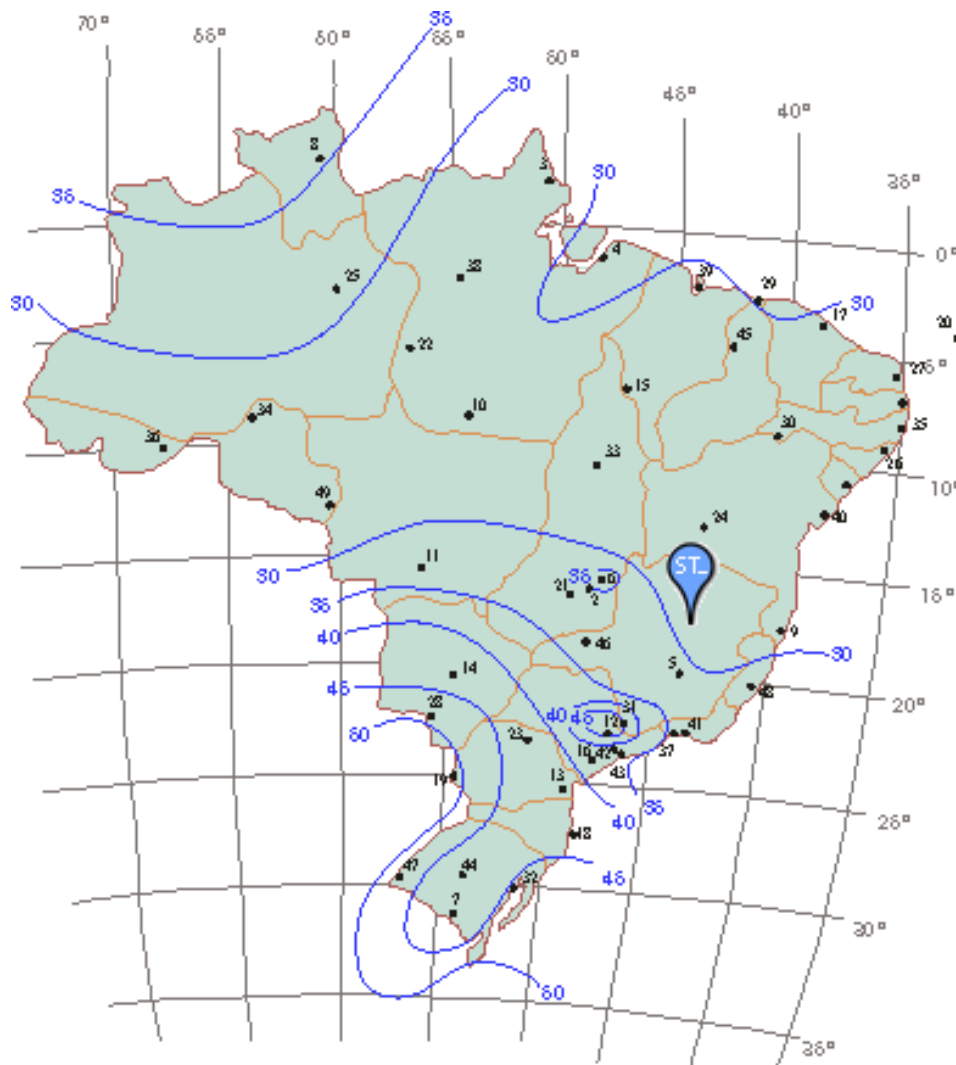
## 2.1.5 -ESTADO 4 – Vento

Conforme NBR 6123.

### 2.1.5.1 Ação do vento na edificação

#### 2.1.5.1.1 Determinação da pressão dinâmica do vento

##### 2.1.5.1.1.1 Velocidade básica do vento



$V_0=30\text{m/s}$

##### 2.1.5.1.1.2 Fator topográfico $S_1$

$S_1=1,00$

Terreno plano ou fracamente acidentado

### **2.1.5.1.1.3 Fator que relaciona rugosidade, dimensões da edificação e altura sobre o terreno $S_2$**

Rugosidade do terreno: categoria III

Dimensões da edificação: classe B

$Z = 1,60 \text{ m}$                       Altura acima do terreno

$S_2 = 0,86$

### **2.1.5.1.1.4 Fator estatístico $S_3$**

Edificação Grupo 3

$S_3 = 0,95$

### **2.1.5.1.1.5 Pressão dinâmica**

$V_0 = 30 \text{ m/s}$                       Velocidade básica do vento

$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 = 24,41 \text{ m/s}$               Velocidade característica do vento

$q = 0,613 \cdot V_k^2 = 37,24 \text{ kgf/m}^2$

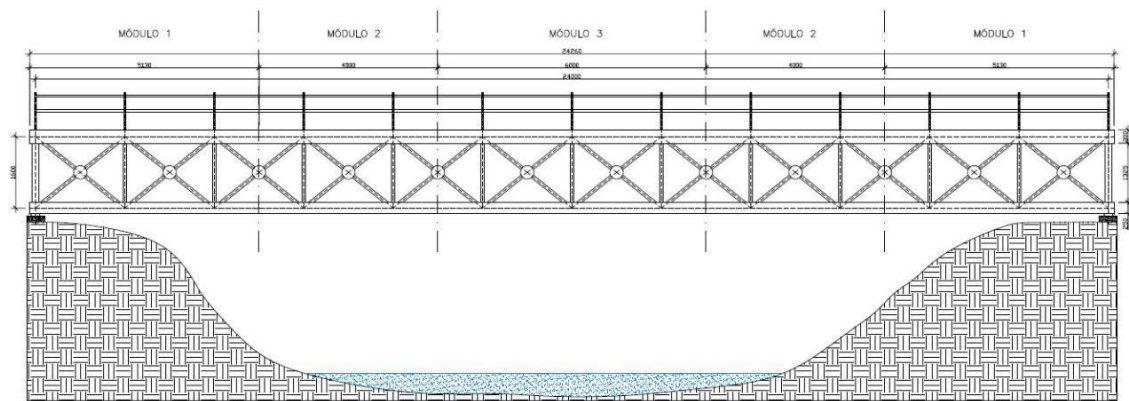
=> Vento perpendicular à lateral da passarela => coeficientes de pressão e sucção =>  $(0,7 + 0,5) \times 37,24 = 44,7 \text{ kgf/m}^2$

No Brasil Central a ação do vento nesse tipo de obra não é significativa. Seja devido à baixa velocidade do vento, apenas 30m/s; seja pelo tipo de obra posicionado ao rés do chão; seja pela viga em treliça que deixa o vento passar; seja pela preponderância da sobrecarga de 500kgf/m<sup>2</sup>.

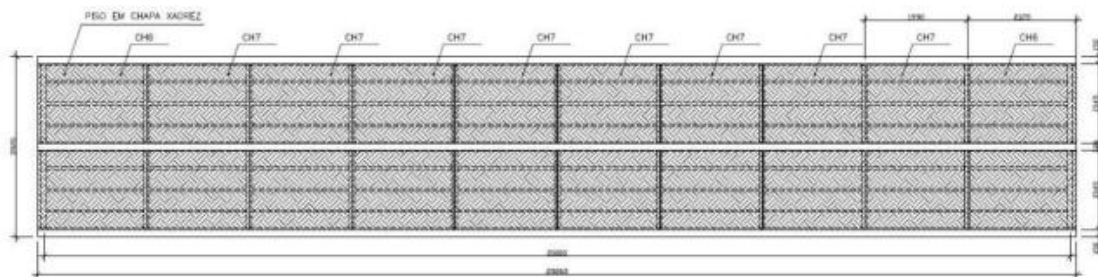
## **2.6 Cálculo da estrutura de aço**

### **2.1.6 Desenhos da passarela e fundação**



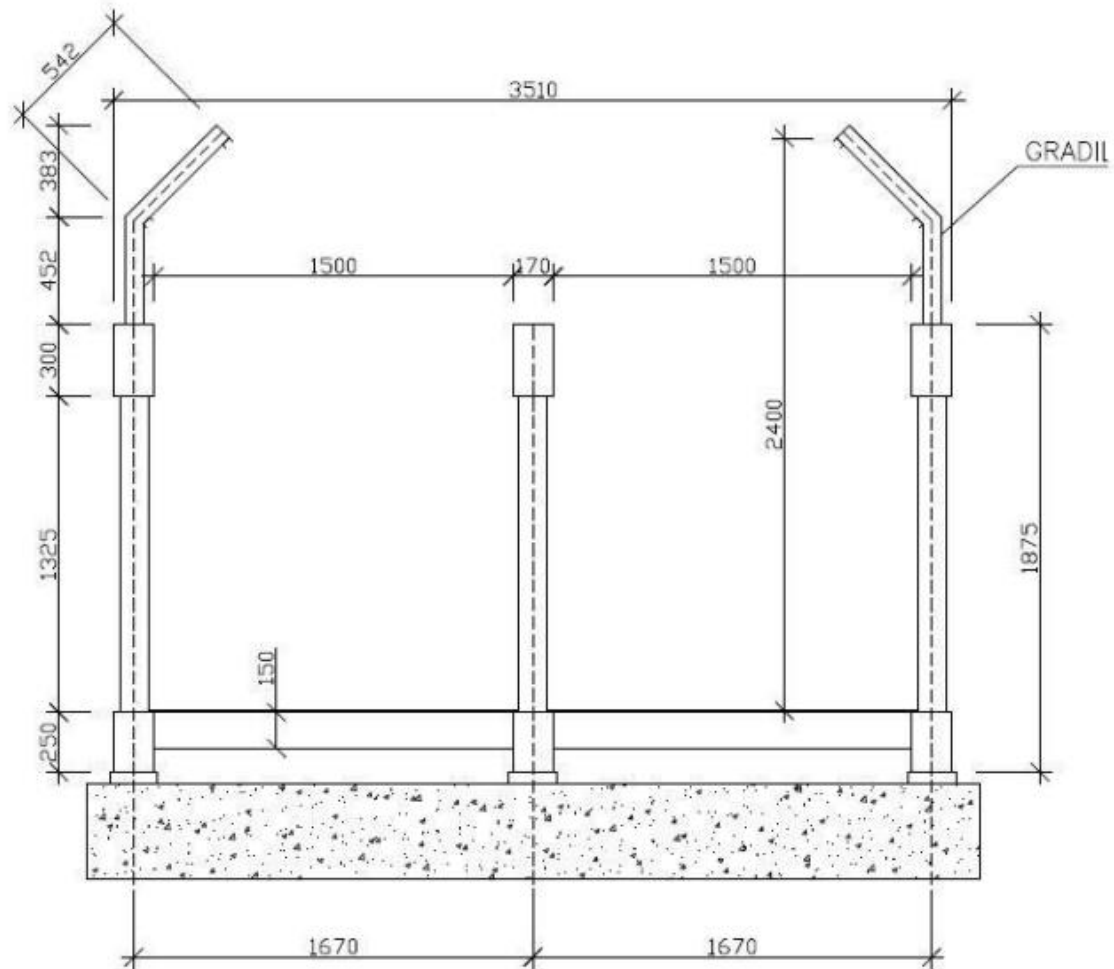


VISTA LATERAL - ESTRUTURA  
ESCALA 1:40



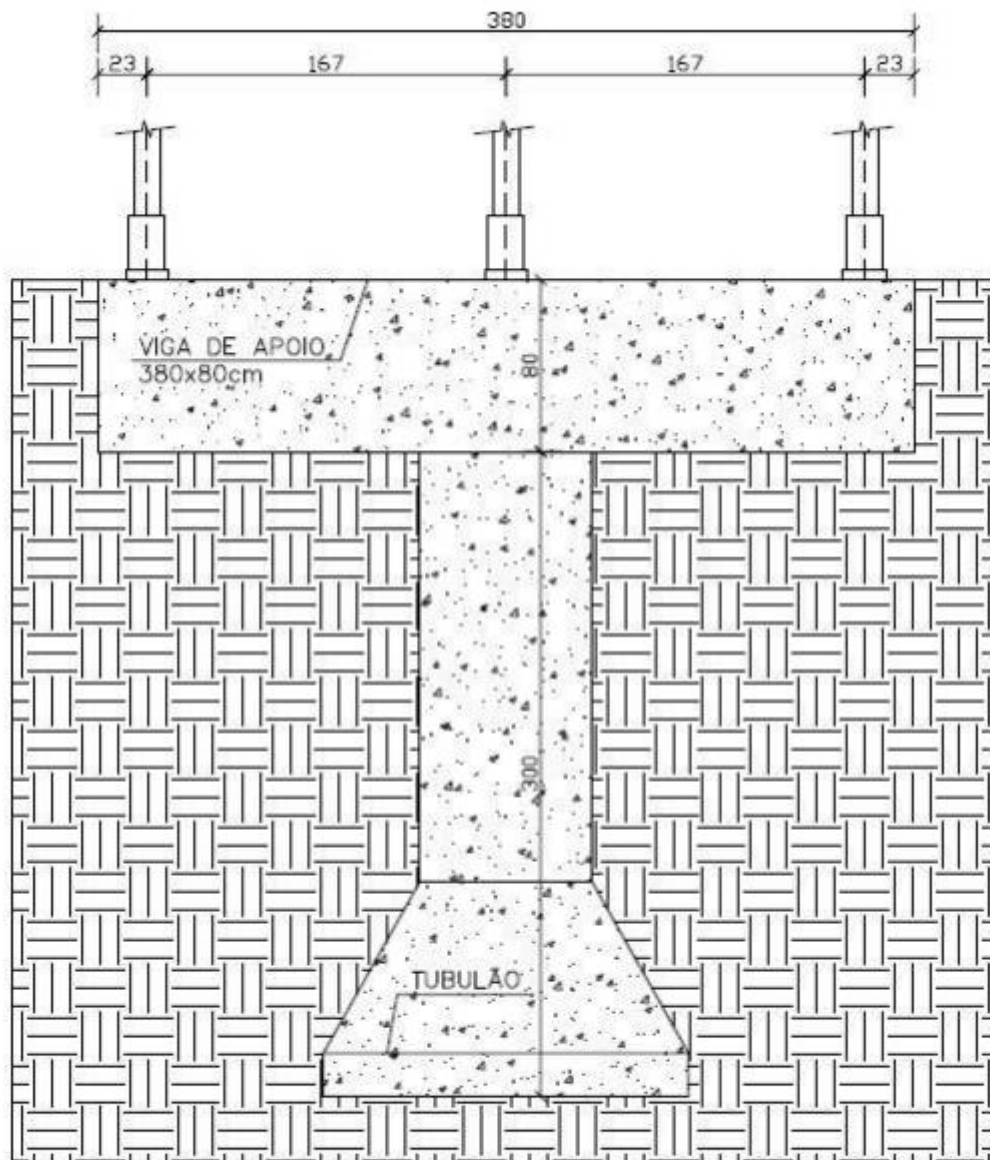
VISTA SUPERIOR - PISO  
ESCALA 1:40



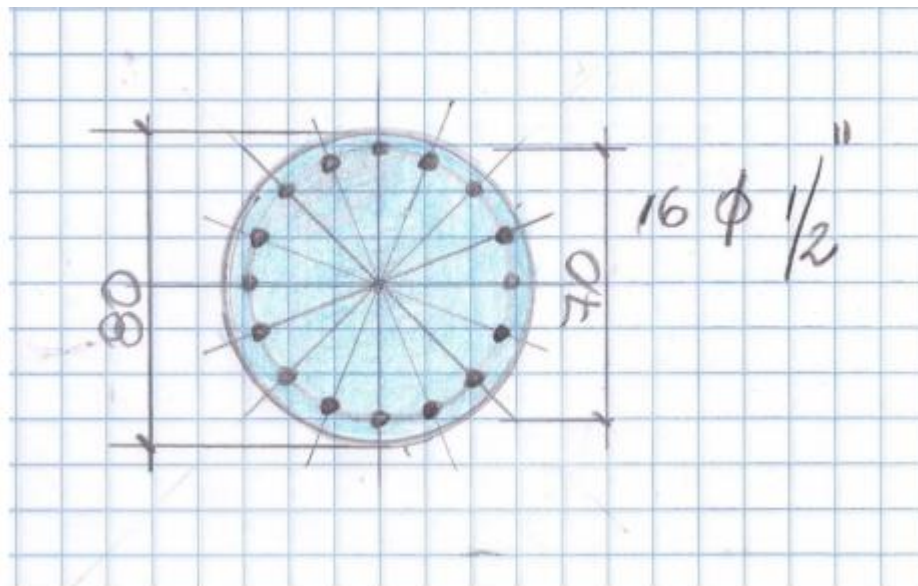


VISTA FRONTAL

ESCALA 1:20



FUNDAÇÃO – VIGA DE APOIO E TUBULÃO  
ESCALA 1:20

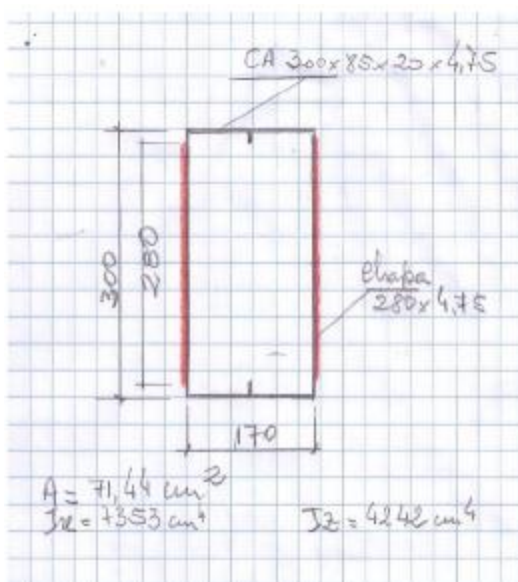


### 2.1.7 Cálculo da Corda Superior da Viga Principal

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

Corda Superior da viga central

Veja o reforço



### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 300 x 85 x 20 x 4.75

Aço: USI-SAC-300       $f_y = 300\text{MPa}$        $f_u = 400\text{ MPa}$

## COMPRIMENTOS DA BARRA

$$K_x L_x = 200 \text{ cm} \quad K_z L_z = 200 \text{ cm}$$

$$K_y L_y = 200 \text{ cm} \quad L_b = 200 \text{ cm}$$

### 2.1.7.1 Cálculo da Tração

$$C_T = 1,00 \quad \text{Coeficiente de redução da área líquida}$$

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 122290,91 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento} \Rightarrow \text{correção} \Rightarrow 194,8 \text{ tf}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 108703,03 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 108703,03 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração} \Rightarrow \text{correção} \Rightarrow 173,1 \text{ tf}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.7.2 Cálculo de Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 2771711,74 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 1091596,13 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 19037272,02 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{x_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 2771711,74 \text{ kgf}$$

$$N_e = 1091596,13 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,35$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,95$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 36,61 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 86919,57 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 36,24 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 90609,03 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 86919,57 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão} \Rightarrow \text{correção} \Rightarrow 138 \text{ tf}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 1,01 > 1,00 \quad \text{ERRO!} \Rightarrow \text{correção} \Rightarrow 0,64 < 1,0$$

### 2.1.7.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

#### 2.6.2.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 44,84 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 5616,66 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,00 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 15,00 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 5616,66 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 374,44 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 1021211,32 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

#### 2.6.2.3.2 Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 61439193,58 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 260,24 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástica da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,11 \quad \lambda_o \leq 0,6 \quad \text{então} \quad \chi_{FLT} = 1,0$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } W_{cef} \text{ na tensão} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$A_{ef} = 44,84 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 5616,66 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,00 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 15,00 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 5616,66 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{cef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 374,44 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 1021211,32 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}$$

$$M_{Rdx} = 1021211,32 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,11 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.7.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$A_{ef} = 40,54 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 1853,01 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

$$d = 0,88 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$x_{G \text{ final}} = x_G + d = 9,38 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 1821,90 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 194,32 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 529950,71 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.7.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 31,79 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdy} = 23473,64 \text{ kqf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.7.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 59,16 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 43682,73 \text{ kqf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.7.7 Equações de Interação



$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 1,12 - 1,01 + 0,64 = 0,75 < 1,00$$

$$\frac{N_{oSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 1,12 - 1,01 + 0,64 = 0,75 < 1,00$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,11$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,11$$

### 2.1.8 Cálculo da Corda Superior da Viga

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

Corda superior da viga lateral não tem reforço.

#### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 250 x 85 x 20 x 4.75

Aço: USI-SAC-300       $f_y = 300\text{MPa}$        $f_u = 400\text{ MPa}$

#### COMPRIMENTOS DA BARRA

$K_x L_x = 200\text{cm}$        $K_z L_z = 200\text{cm}$

$K_y L_y = 200\text{cm}$        $L_b = 200\text{cm}$

#### 2.1.8.1 Cálculo da tração

$C_T = 1,00$  Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = \frac{122290,91 \text{ kgf}}{1,10} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = \frac{108703,03 \text{ kgf}}{1,65} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 108703,03 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.8.2 Cálculo da Compressão



$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 2771711,74 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 1091596,13 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 19037272,02 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{x_e^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ex1} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 2771711,74 \text{ kgf}$$

$$N_e = 1091596,13 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,35$$

$$\lambda_n \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,95$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 36,61 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{CRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 86919,57 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à fl}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 36,24 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{CRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 90609,03 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à fla}$$

$$N_{CRd} = 86919,57 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{CRd}} = 0,79 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.8.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

#### 2.1.8.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 44,84 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 5616,66 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 15,00 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 5616,66 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 374,44 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 1021211,32 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

### 2.1.8.3.2 Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 60234503,51 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 260,24 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,11 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0 \\
 \chi_{FLT} &= 1,00 && \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção} \\
 \text{Cálculo de } W_{cef} &\text{ na tensão } \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2 \\
 A_{ef} &= 44,84 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 5616,66 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 15,00 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 5616,66 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 374,44 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 1021211,32 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT} \\
 M_{Rdx} &= 1021211,32 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,10 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

### 2.1.8.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 40,54 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{yef} &= 1853,01 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\
 d &= 0,88 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 x_{G \text{ final}} &= x_G + d = 9,38 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 1821,90 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 194,32 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdy} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 529950,71 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,01 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

#### 2.1.8.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 31,79 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$\begin{aligned}
 k_v &= 5,00 && \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento} \\
 \lambda_p &= 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação} \\
 \lambda_r &= 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então} \\
 V_{Rd} &= \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{Rdy} &= 23473,64 \text{ kgf} && \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

#### 2.1.8.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 59,16 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 43682,73 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.8.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,90$$

$$\frac{N_{cSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,90$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,11$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,11$$

### 2.1.9 Cálculo da Corda Inferior da Viga Central e Lateral

Corda inferior viga central

#### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 250 x 85 x 20 x 4.75

Aço: ASTM A36  $f_y = 300\text{MPa}$   $f_u = 400\text{ MPa}$

## COMPRIMENTOS DA BARRA

$$KxLx = 200\text{cm} \quad KzLz = 200\text{cm}$$

$$KyLy = 200\text{cm} \quad Lb = 200\text{cm}$$

### 2.1.9.1 Cálculo da tração

$$\bar{C}_T = 1,00 \quad \text{Coeficiente de redução da área líquida}$$

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 109336,36 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{\bar{C}_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 97187,88 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 97187,88 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,31 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.9.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 1789683,84 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 931527,63 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 18335259,47 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 1789683,84 \text{ kgf}$$

$$N_e = 931527,63 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,36$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,95$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 35,70 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 84561,95 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 35,37 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 88423,58 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 84561,95 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.9.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

#### 2.6.4.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 40,09 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 3626,66 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 12,50 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 3626,66 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 290,13 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{PL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 791270,77 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

#### 2.6.4.3.2 Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 49439015,56 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 222,08 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,12 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0
 \end{aligned}$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } W_{cef} \text{ na tensão } \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 40,09 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 3626,66 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 12,50 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 3626,66 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}
 \end{aligned}$$

$$W_{cef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 290,13 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 791270,77 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}$$

$$M_{Rdx} = 791270,77 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,09 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.9.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 37,73 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{yef} &= 1705,70 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\
 d &= 0,52 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 x_{G \text{ final}} &= x_G + d = 9,02 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 1695,62 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 188,05 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdy} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 512862,23 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,00 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

#### 2.1.9.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{h}{t} = 31,79 && \text{Parâmetro de esbeltez} \\
 k_v &= 5,00 && \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento} \\
 \lambda_p &= 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação} \\
 \lambda_r &= 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então} \\
 V_{Rd} &= \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10} \\
 V_{Rdy} &= 23473,64 \text{ kgf} && \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

#### 2.1.9.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{h}{t} = 48,63 && \text{Parâmetro de esbeltez} \\
 k_v &= 5,00 && \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}
 \end{aligned}$$



$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 35910,00 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,01 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.9.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,09$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,40$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,22$$

### 2.1.10 Corda inferior viga lateral

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

#### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 250 x 85 x 20 x 4,75

Aço: USI-SAC-300  $f_y = 300\text{MPa}$   $f_u = 400\text{ MPa}$

#### COMPRIMENTOS DA BARRA

$K_x L_x = 200\text{ cm}$   $K_z L_z = 200\text{ cm}$

$K_y L_y = 200\text{ cm}$   $L_b = 200\text{ cm}$

#### 2.1.10.1 Cálculo da Tração

$C_T = 1,00$  Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 109336,36 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 97187,88 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 97187,88 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,38 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.10.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 1789683,84 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 931527,63 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 18335259,47 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 1789683,84 \text{ kgf}$$

$$N_e = 931527,63 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,36$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_0)^2 = 0,95$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 35,70 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 84561,95 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 35,37 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 88423,58 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 84561,95 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.10.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

#### 2.6.5.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 40,09 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 3626,66 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,00 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 12,50 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 3626,66 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 290,13 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{FL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 791270,77 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

#### 2.6.5.3.2 Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 48954319,33 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 222,08 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = \quad \lambda_o \leq 0,6 \quad \text{então } \chi_{FLT} = 1,0$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } W_{cef} \text{ na tensão } \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$A_{ef} = 40,09 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 3626,66 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,00 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 12,50 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 3626,66 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{cef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 290,13 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 791270,77 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}$$

$$M_{Rdx} = 791270,77 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,09 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.10.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$A_{ef} = 37,73 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 1705,70 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

$$d = 0,52 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$x_{G \text{ final}} = x_G + d = 9,02 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 1695,62 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 188,05 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 512862,23 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,01 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.10.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 31,79 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdy} = 23473,64 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.10.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 48,63 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 35910,00 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.10.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,09$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,47$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,29$$

### 2.1.11 Cálculo da Diagonal Comprimida, no Apoio, Viga central e lateral

Diagonal no apoio, viga central.

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

#### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 75 x 40 x 12 x 3

Aço: USI-SAC-300       $f_y = 300\text{MPa}$        $f_u = 400\text{ MPa}$

#### COMPRIMENTOS DA BARRA

$K_x L_x = 128,06\text{ cm}$        $K_z L_z = 128,06\text{ cm}$

$K_y L_y = 128,06\text{ cm}$        $L_b = 128,06\text{ cm}$

#### 2.1.11.1 Cálculo da Tração

$C_T = 1,00$       Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = \frac{25363,64\text{ kgf}}{1,10} = 23057,85\text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = \frac{22545,45\text{ kgf}}{1,65} = 13663,91\text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 22545,45\text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.11.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 95240,26 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 98313,50 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 6466492,42 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{x_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 95240,26 \text{ kgf}$$

$$N_e = 95240,26 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,54$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,88$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 9,30 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 20567,12 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 9,30 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 23250,00 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 20567,12 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,87 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.11.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

#### 2.6.6.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 9,30 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 79,13 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 Y_{G \text{ final}} &= Y_G + d = 3,75 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 79,13 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{Y_{G \text{ final}}} = 21,10 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 57546,00 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

#### 2.6.5.3.2 Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 6067363,54 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 20,42 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,10 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0
 \end{aligned}$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } \frac{W_{cef}}{\text{na tensão}} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 9,30 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 79,13 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 Y_{G \text{ final}} &= Y_G + d = 3,75 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 79,13 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}
 \end{aligned}$$



$$W_{cef} = \frac{I_G}{Y_{G \text{ final}}} = \frac{21,10 \text{ cm}^3}{\text{Módulo elástico efetivo}}$$

$$M_{Rdx}^{FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = \frac{57546,00 \text{ kgf.cm}}{\text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}}$$

$$M_{Rdx} = 57546,00 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,06 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.11.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$A_{ef} = 9,30 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 81,68 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

$$d = 0,00 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$\chi_{G \text{ final}} = \chi_G + d = 4,00 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 81,68 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{\chi_{G \text{ final}}} = \frac{20,42 \text{ cm}^3}{\text{Módulo elástico efetivo}}$$

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = \frac{55690,23 \text{ kgf.cm}}{\text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,01 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.11.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 22,67 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdy} = 6676,36 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.11.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 21,00 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 6185,45 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,01 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.11.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,94$$

$$\frac{N_{cSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,94$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,07$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,07$$

### 2.1.12 Diagonal no apoio, viga lateral

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

#### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 75 x 40 x 12 x 3

Aço: USI-SAC-300  $f_y = 300\text{MPa}$   $f_u = 400\text{ MPa}$

#### COMPRIMENTOS DA BARRA

$KxLx = 128,06 \text{ cm}$   $KzLz = 128,06 \text{ cm}$

$$K_y L_y = 128,06 \text{ cm}$$

$$L_b = 128,06 \text{ cm}$$

### 2.1.12.1 Cálculo da Tração

$$C_T = 1,00 \quad \text{Coeficiente de redução da área líquida}$$

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 25363,64 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 22545,45 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 22545,45 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.12.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 95240,26 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 98313,50 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 6466492,42 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{x_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 95240,26 \text{ kgf}$$

$$N_e = 95240,26 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,54$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,88$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 9,30 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 20567,12 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 9,30 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 23250,00 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 20567,12 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,56 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.12.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

#### 2.6.7.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 9,30 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 79,13 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,00 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 3,75 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 79,13 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 21,10 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{FL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 57546,00 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

#### 2.6.7.3.2 Cálculo do momento resistente devido ao estado limite

##### Flambagem Lateral com Torção

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 3547584,15 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 20,42 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,13 \quad \lambda_o \leq 0,6 \quad \text{então} \quad \chi_{FLT} = 1,0$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } \frac{W_{cef}}{\text{na tensão}} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 9,30 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 79,13 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 3,75 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 79,13 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 21,10 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 57546,00 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT} \\
 M_{Rdx} &= 57546,00 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,03 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

#### 2.1.12.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 9,30 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{yef} &= 81,68 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 x_{G \text{ final}} &= x_G + d = 4,00 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 81,68 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 20,42 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdy} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 55690,23 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,04 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

#### 2.1.12.5 Cálculo da Resistência ao Cortante - eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 22,67 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdy} = 6676,36 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.12.6 Cálculo da Resistência ao Cortante - eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 21,00 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 6185,45 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.12.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,63$$

$$\frac{N_{cSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,63$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,07$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,07$$

### 2.1.13 Montantes nos apoios

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

#### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 150 x 60 x 17 x 2.25

Aço: COS-CIVIL 300  $f_y = 300$  MPa  $f_u = 400$  MPa

#### COMPRIMENTOS DA BARRA

$K_x L_x = 160$  cm  $K_z L_z = 160$  cm

$K_y L_y = 160$  cm  $L_b = 160$  cm

#### 2.1.13.1.1 Cálculo da tração

$C_T = 1,00$  Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 35100,00 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 31200,00 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 31200,00 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.13.1.2 Cálculo da compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 343208,35 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 219583,51 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 10039473,55 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 343208,35 \text{ kgf}$$

$$N_e = 219583,51 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,42$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,93$$

Elemento A.A. com b/t > 60.

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 9,75 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 22636,56 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

Elemento A.A. com b/t > 60.

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 9,52 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 23805,22 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 22636,56 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,26 < 1,00 \quad \text{OK!}$$



### 2.1.13.1.3 Cálculo da Resistência à flexão – eixo Y

#### 3.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,31 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 414,69 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 413,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 52,76 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{PL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 143883,03 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

#### 3.2. Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 21356419,52 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 47,46 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,08 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0 \\
 \chi_{FLT} &= 1,00 && \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção} \\
 \text{Cálculo de } W_{cef} &\text{ na tensão } \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2 \\
 A_{ef} &= 12,31 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 414,69 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 413,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 52,76 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 143883,03 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}
 \end{aligned}$$

$$M_{Rdx} = 143883,03 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,21 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.13.1.4 Cálculo da resistência à Flexão – eixo Z

$$A_{ef} = 11,75 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 238,36 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

$$d = 0,56 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$X_{G \text{ final}} = X_G + d = 6,56 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 234,69 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{X_{G \text{ final}}} = 35,78 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 97578,67 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,11 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.13.1.5 Cálculo da resistência ao cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 49,33 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento}$$

$\lambda \leq \lambda_p$  então

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdy} = 8173,64 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.13.1.6 Cálculo da resistência ao cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 62,67 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento}$$

$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$  então

$$V_{Rd} = \frac{0,65 \cdot t^2 \cdot \sqrt{k_v \cdot f_y \cdot E}}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 10362,78 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,03 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.13.1.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,57$$

$$\frac{N_{cSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,57$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,31$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,31$$

### 2.1.14 Montantes

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

#### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 75 x 40 x 15 x 2.25

Aço: USI-SAC-300  $f_y = 300$  MPa  $f_u = 400$  MPa

#### COMPRIMENTOS DA BARRA

$K_x L_x = 160$  cm  $K_z L_z = 160$  cm

$K_y L_y = 160$  cm  $L_b = 160$  cm

#### 2.1.14.1.1 Cálculo da tração

$C_T = 1,00$  Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = \frac{20495,45 \text{ kgf}}{1,10} = 18632,23 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = \frac{18218,18 \text{ kgf}}{1,65} = 11041,32 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 11041,32 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = \frac{11041,32}{11041,32} = 1,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.14.1.2 Cálculo à compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 50235,39 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 49435,20 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 5824656,95 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 50235,39 \text{ kgf}$$

$$N_e = 49435,20 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,68$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,83$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 7,51 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 15522,82 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 7,51 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 18787,50 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 15522,82 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.14.1.3 Cálculo da resistência à flexão – eixo Y

#### 3.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 7,51 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 65,15 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 3,75 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 65,15 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 17,37 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 47382,42 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

#### 3.2. Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 4873843,50 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 16,03 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,10 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0
 \end{aligned}$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } \frac{W_{cef}}{\text{na tensão}} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } \frac{W_{cef}}{\text{na tensão}} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 7,51 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 65,15 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 3,75 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 65,15 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}
 \end{aligned}$$

$$W_{cef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 17,37 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 47382,42 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}$$

$$M_{Rdx} = 47382,42 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,17 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.14.1.4 Cálculo da resistência à flexão – eixo Z

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 7,51 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{yef} &= 64,11 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 X_{G \text{ final}} &= X_G + d = 4,00 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 64,11 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{X_{G \text{ final}}} = 16,03 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdy} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 43713,45 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,01 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

#### 2.1.14.1.5 Cálculo da resistência ao cortante – eixo Y

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{h}{t} = 31,56 && \text{Parâmetro de esbeltez} \\
 k_v &= 5,00 && \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento} \\
 \lambda_p &= 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação} \\
 \lambda_r &= 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então} \\
 V_{Rd} &= \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10} \\
 V_{Rdy} &= 5228,18 \text{ kgf} && \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

#### 2.1.14.1.6 Cálculo da resistência ao cortante – eixo Z

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{h}{t} = 29,33 && \text{Parâmetro de esbeltez} \\
 k_v &= 5,00 && \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}
 \end{aligned}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 4860,00 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,02 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.14.1.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,17$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,29$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,06$$

#### 2.1.15 Transversinas **central e nos apoios**

##### **Transversina central**

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

##### **Perfil Caixa (Formado a frio)**

Perfil: CA 150 x 60 x 20 x 2.25

Aço: COS-CIVIL 300  $f_y = 300 \text{ MPa}$   $f_u = 400 \text{ MPa}$

##### **COMPRIMENTOS DA BARRA**

$K_x L_x = 162,5 \text{ cm}$   $K_z L_z = 162,5 \text{ cm}$

$K_y L_y = 162,5 \text{ cm}$   $L_b = 162,5 \text{ cm}$



### 2.1.15.1.1 Cálculo da tração

$C_T = 1,00$  Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 35836,36 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 31854,55 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 31854,55 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.15.1.2 Cálculo da compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 339173,77 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 212882,48 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 9984028,15 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 339173,77 \text{ kgf}$$

$$N_e = 212882,48 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,43$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,93$$

Elemento A.A. com b/t > 60.

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 10,03 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 23200,61 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

Elemento A.A. com  $b/t > 60$ .

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 9,79 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 24480,22 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 23200,61 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,38 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.15.1.3 Cálculo da resistência à flexão – eixo Y

#### 3.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 12,58 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{x_{ef}} = 423,32 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,33 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 7,83 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{x_{ef}} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 53,91 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 147029,11 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

#### 3.2. Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 12459774,46 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 47,46 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,11 \quad \lambda_o \leq 0,6 \quad \text{então} \quad \chi_{FLT} = 1,0$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

Cálculo de  $W_{cef}$  na tensão  $\sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$

$A_{ef} = 12,58 \text{ cm}^2$  Área efetiva da seção  
 $I_{xef} = 423,32 \text{ cm}^4$  Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y  
 $d = 0,33 \text{ cm}$  Rebaixamento total do eixo baricêntrico  
 $y_{G \text{ final}} = y_G + d = 7,83 \text{ cm}$  Posição final do eixo baricêntrico  
 $I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4$  Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico  
 $W_{cef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = \frac{421,97}{7,83} = 53,91 \text{ cm}^3$  Módulo elástico efetivo  
 $M_{Rdx}^{FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = \frac{3000,00 \cdot 53,91}{1,10} = 147029,11 \text{ kgf.cm}$  Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT  
 $M_{Rdx} = 147029,11 \text{ kgf.cm}$  Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y  
 $\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = \frac{97877,47}{147029,11} = 0,66 < 1,00$  OK!

#### 2.1.15.1.4 Cálculo da resistência à flexão – eixo Z

$A_{ef} = 12,02 \text{ cm}^2$  Área efetiva da seção  
 $I_{yef} = 238,55 \text{ cm}^4$  Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z  
 $d = 0,55 \text{ cm}$  Rebaixamento total do eixo baricêntrico  
 $x_{G \text{ final}} = x_G + d = 6,55 \text{ cm}$  Posição final do eixo baricêntrico  
 $I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 234,95 \text{ cm}^4$  Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico  
 $W_{ef} = \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = \frac{234,95}{6,55} = 35,89 \text{ cm}^3$  Módulo elástico efetivo  
 $M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = \frac{35,89 \cdot 3000,00}{1,10} = 97877,47 \text{ kgf.cm}$  Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z  
 $\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = \frac{2996,33}{97877,47} = 0,03 < 1,00$  OK!

#### 2.1.15.1.5 Cálculo da resistência ao cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 49,33 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdy} = 8173,64 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.15.1.6 Cálculo da resistência ao cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 62,67 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \text{ então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,65 \cdot t^2 \cdot \sqrt{k_v \cdot f_y \cdot E}}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 10362,78 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,20 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.15.1.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 1,07$$

$$\frac{N_{cSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 1,07$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,69$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,69$$

## Transversina nos apoios

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

### Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 150 x 60 x 20 x 2.25

Aço: COS-CIVIL 300  $f_y = 300$  MPa  $f_u = 400$  MPa

### COMPRIMENTOS DA BARRA

$K_x L_x = 162,5$  cm  $K_z L_z = 162,5$  cm

$K_y L_y = 162,5$  cm  $L_b = 162,5$  cm

#### 2.1.15.1.8 Cálculo da tração

$C_T = 1,00$  Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 35836,36 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 31854,55 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 31854,55 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

#### 2.1.15.1.9 Cálculo da compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 339173,77 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 212882,48 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 9984028,15 \text{ kgf}$$

$$H = 1 - \frac{x_o^2}{r_o^2} = 1,00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 339173,77 \text{ kgf}$$

$$N_e = 212882,48 \text{ kgf}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,43$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_0)^2 = 0,93$$

Elemento A.A. com b/t > 60.

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 10,03 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 23200,61 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

Elemento A.A. com b/t > 60.

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 9,79 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 24480,22 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 23200,61 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

## 2.1.15.1.10 Cálculo da resistência à flexão – eixo Y

### 3.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,58 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 423,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 53,91 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 147029,11 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

### 3.2. Cálculo do momento resistente devido ao estado limite Flambagem Lateral com Torção

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 19345439,30 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 47,46 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,09 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0
 \end{aligned}$$

$$\chi_{FLT} = 1,00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } \frac{W_{cef}}{\text{na tensão}} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,58 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 423,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 53,91 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 147029,11 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT} \\
 M_{Rdx} &= 147029,11 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,57 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

### 2.1.15.1.11 Cálculo da resistência à flexão – eixo Z

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,02 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{yef} &= 238,55 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\
 d &= 0,55 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 X_{G \text{ final}} &= X_G + d = 6,55 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 234,95 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{X_{G \text{ final}}} = 35,89 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdy} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 97877,47 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,03 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

### 2.1.15.1.12 Cálculo da resistência ao cortante – eixo Y

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{h}{t} = 49,33 && \text{Parâmetro de esbeltez} \\
 k_v &= 5,00 && \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento} \\
 \lambda_p &= 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação} \\
 \lambda_r &= 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então} \\
 V_{Rd} &= \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10} \\
 V_{Rdy} &= 8173,64 \text{ kgf} && \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

### 2.1.15.1.13 Cálculo da resistência ao cortante – eixo Z

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,02 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{yef} &= 238,55 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\
 d &= 0,55 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 X_{G \text{ final}} &= X_G + d = 6,55 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 234,95 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{X_{G \text{ final}}} = 35,89 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdy} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 97877,47 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,03 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$



### 2.1.15.1.14 Cálculo da resistência ao cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 49,33 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10}$$

$$V_{Rdy} = 8173,64 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

### 2.1.15.1.15 Cálculo da resistência ao cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 62,67 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \text{ então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,65 \cdot t^2 \cdot \sqrt{k_v \cdot f_y \cdot E}}{1,10}$$

$$V_{Rdz} = 10362,78 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,23 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

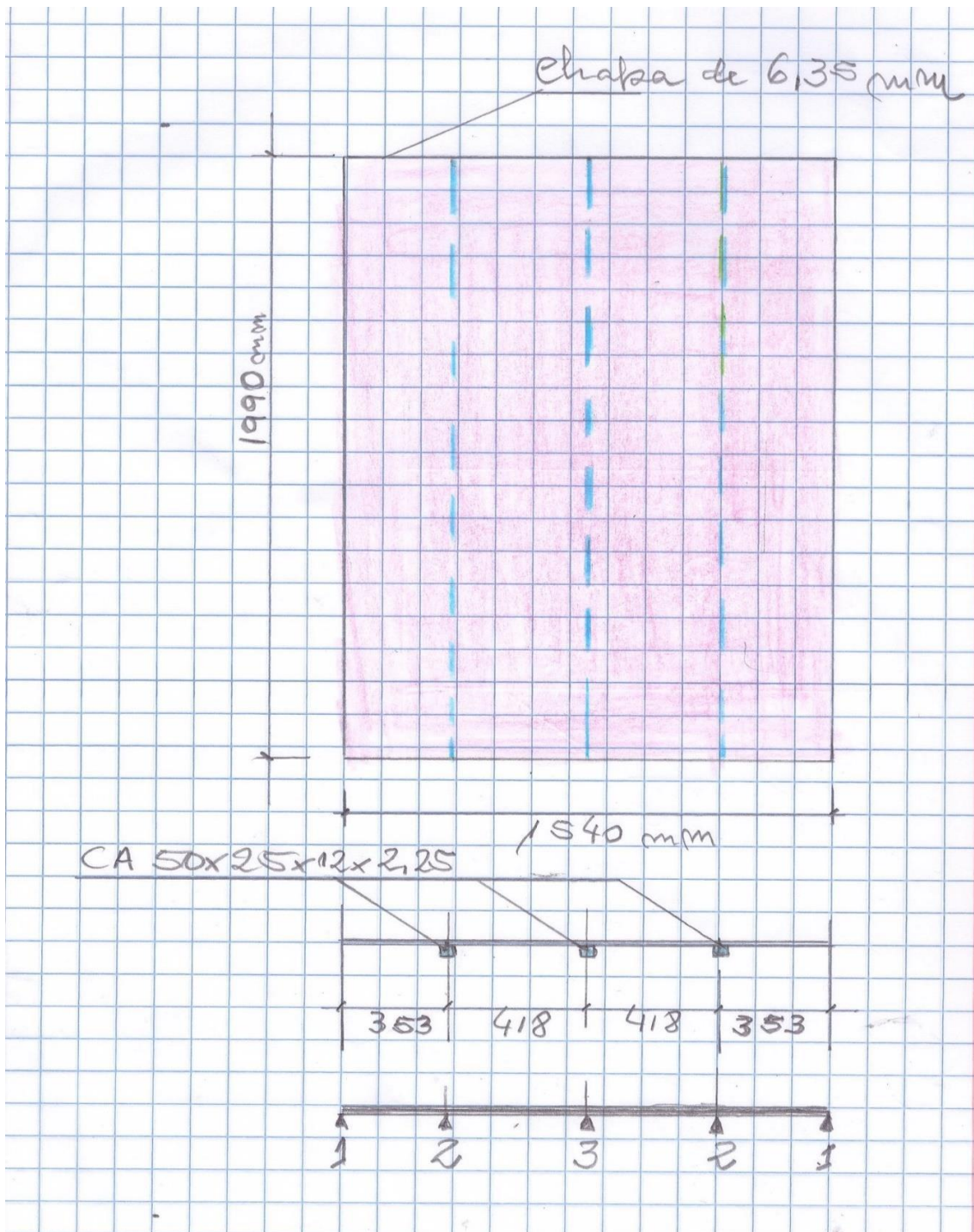
### 2.1.15.1.16 Equações de interação

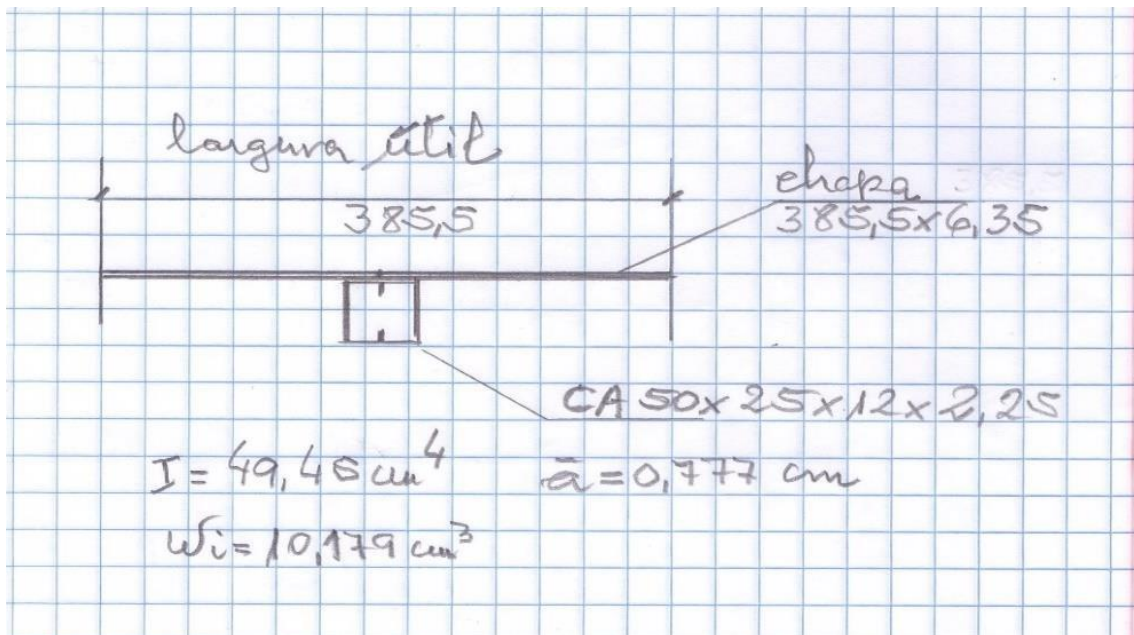
$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,60$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,60$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,60$$

### 2.1.16 Piso de aço





=>Sobrecarga no piso conforme NBR7187=>500 kgf/m<sup>2</sup>=>com majoração=> =>1,4x500=700 kgf/m<sup>2</sup>; peso-próprio da chapa 50 kgf/m<sup>2</sup>.

A chapa de 6,35mm, que é a parte principal do piso, funciona como uma viga continua sobre 5 apoios como mostrado no desenho abaixo. Assim, uma faixa de 100cm de largura estará carregada com (1,4x700) kgf/m de sobrecarga mais (50x1,25) kgf/m de peso-próprio, que representam o carregamento majorado.

Os carregamentos sem majoração nas vigas do piso serão=>

$$\Rightarrow R1=74 \text{ kg/m}$$

$$\Rightarrow R2=237 \text{ kg/m}$$

$$\Rightarrow R3=229 \text{ kg/m}$$

O máximo fletor majorado na viga será=>

$$\Rightarrow \max M_{sd} = (237 \times 1,4) \times 1,992 / 8 = 164,3 \text{ kgf.m} = 16,43 \text{ tf.cm}$$

$$\text{Momento resistente} \Rightarrow M_{RY} = W_x F_y / 1,1 =$$

$$= 10,179 \times 2,5 / 1,1 = 23,14 \text{ tf.cm} \Rightarrow 16,43 / 23,14 = 0,71 < 1,0.$$

**Neste cálculo usamos chapa xadrez com tensão de escoamento  $F_y=250\text{MPa}$ , embora o perfil seja em aço  $F_y=300\text{MPa}$ .**

## 2.7 Aparelhos de apoio

### 2.7.1.1.1 Deslocamentos devido à temperatura e à flexão.

=> Consideramos apoios de neoprene fretado, vale dizer, semimóveis, ou semifixos, se preferir.

=> deslocamento longitudinal devido à temperatura:

$$\Rightarrow d_{XT} = (\pm 0,012 \times 24,26 \times 35) \times 0,5 = \pm 5,1 \text{ mm};$$

=> deslocamento devido à flexão da viga principal:

$$\Rightarrow dx = 10,43 / 2 = +5,3 \text{ mm}$$

**Resumo dos deslocamentos** =>  $dx = (5,1 + 5,3) = +10,4 \text{ mm}; dx = - 5,1 \text{ mm}$

### 2.7.1.1.2 Escolha dos aparelhos de apoio

Máxima carga vertical =>  $N_C = 19 \times 1,4 = 26,6 \text{ tf}$  (com majoração) < 30 tf

Usando a TABELA da RUBBERFLEX, (fabricação MEPEL)

**Resumo dos deslocamentos** =>  $dx = 10,4 \text{ mm}; dx = - 5,1 \text{ mm}$

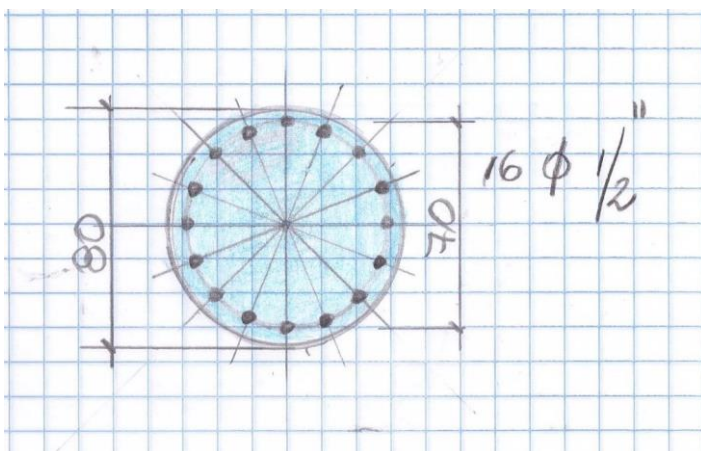
**Resumo deste item:** -aparelho de apoio escolhido:

=> de 150x200mm por 28mm de espessura; deslocamento máximo de 14mm; carga de 30 tf;

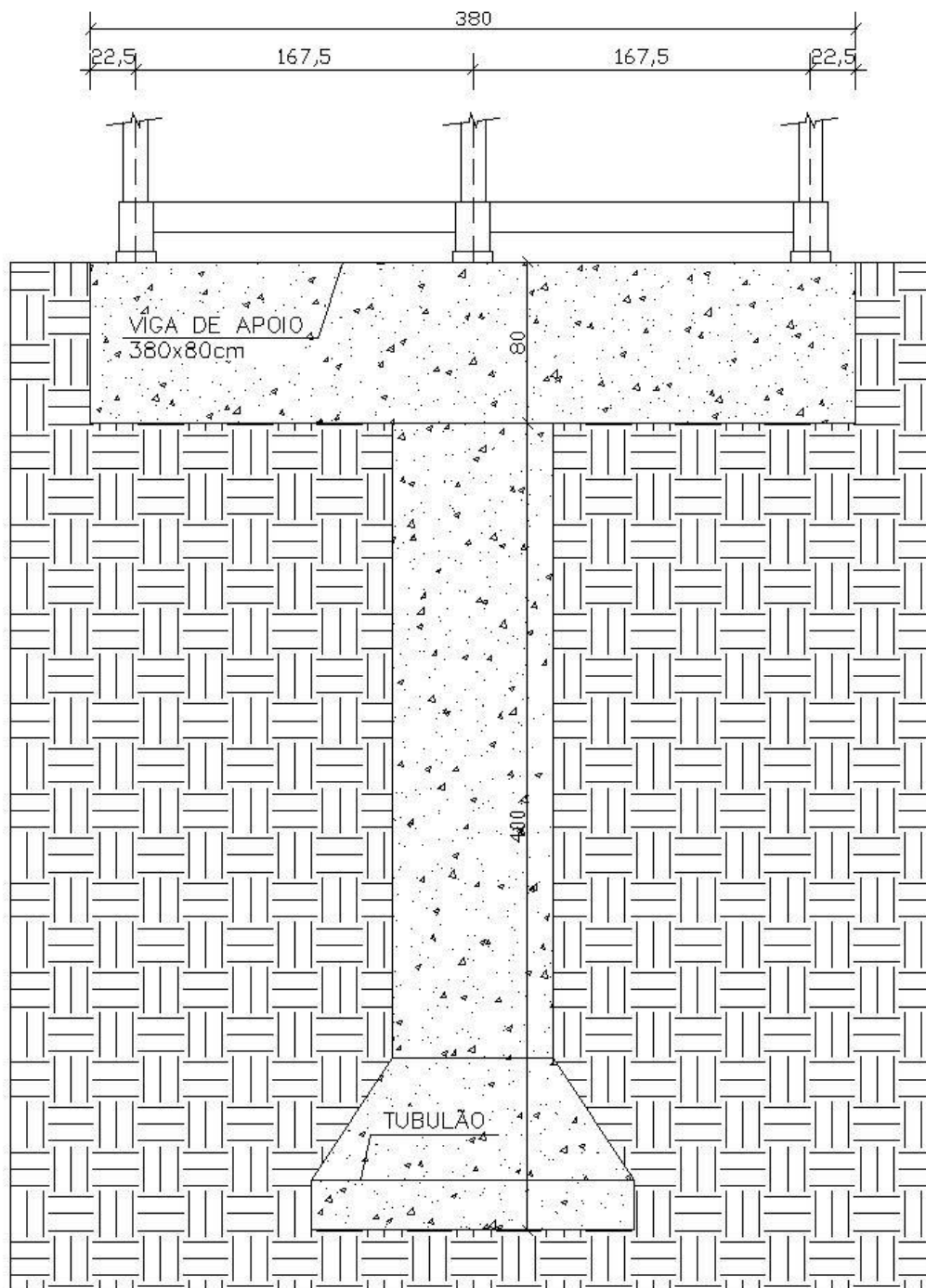
## 2.8 Cálculo das fundações

Desenhos das fundações.

TUBULÃO







FUNDAÇÃO — VIGA DE APOIO E TUBULÃO  
ESCALA 1:20

**Diâmetro da base=>1,60m; diâmetro do fuste=>0,8m.**  
**Reações nos apoios não majoradas**

=>Apoios laterais => $R_1 = 11,3$  tf

=>Apoio central=> $R_2 = 19$  tf

Carga no tubulão, majorada=>

=> $R_{\text{tubulão}} = (11,3 \times 2 + 19) \times 1,4 + (3,8 \times 0,8 \times 0,8 \times 2,5) \times 1,4 +$

$(3,77 + 1,00 + 2,51) \times 1,4 =$

$= 58,24 + 8,51 + 10,2 = 76,95$  tf

=>Carga para dimensionamento do solo (sem majoração)=>55 tf

#### **2.8.1.1.1 Cálculo da resistência do solo para passarelas 3A e 3B**

**Resultado da sondagem de reconhecimento realizada pela CARGUS  
em 23.09.2021.**

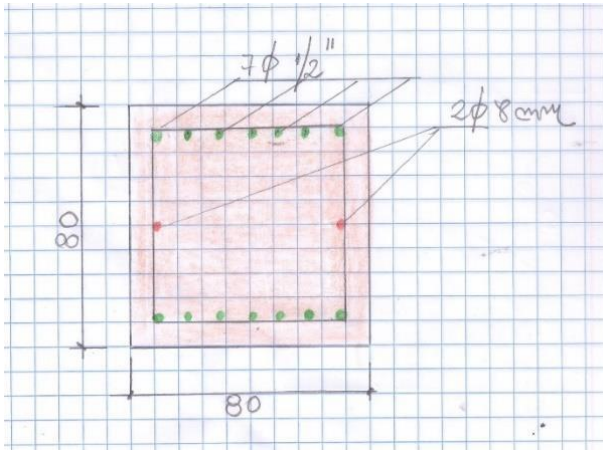
Soluções em Engenharia e Geotecnia







### 2.8.1.1.2 Cálculo da viga transversal sobre tubulão



Do desenho no item 3B.8.1=>

$R=11,3 \times 1,4=15,82$  tf=>Momento fletor máximo na viga sobre o tubulão=>

$$\max M_{sd} = 15,82 \times (167,5 - 30) + 1,4 \times 0,016 \times 0,5 \times (137,5)^2 = 2175 + 212 = 2387 \text{ tf.cm}$$

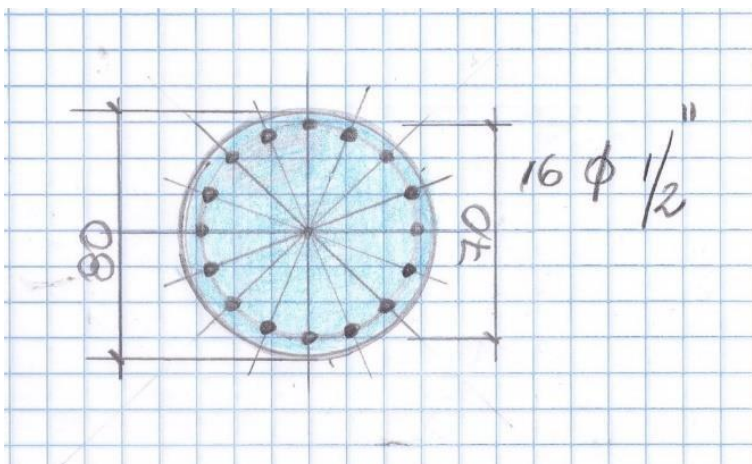
**Armadura**=> $M_R=7 \times 5,383 \times 70= 2637 \text{ tf.cm} > 2387$

$$\text{tf.cm} \Rightarrow 2387 / 2637 = 0,91 < 1,0$$

**Estribos**=>  $\max V = 11,3 \times 1,4 + 1,4 \times 0,016 \times 137,5 = 18,9$  tf

$18,90 / (2,136 \times 2) = 4,43$  ferros cada 70cm=>**6,32 ferros de 8mm por metro ou um estribo de 8mm cada 15cm.**

### 2.8.1.1.3 Cálculo do tubulão



**maxNsd= 76,95 tf=> Força normal resistente do tubulão, com concreto Fck =20 Mpa=>NR=**  
 **$(802 \times 0,25 \times \pi) \times 0,20 \times 0,85 / 1,4 + 16 \times 5,383 = 696 \text{ tf} > 76,95 \text{ tf}$**   
**=>76,95/696=0,11<1,0**

**Nota:** o tubulão está com a armadura mínima exigida pela Norma, ou seja,  $(0,004 \times A) = (0,25 \times 3,1415 \times 802) \times 0,004 = 20,1 \text{ cm}^2 =>$

**=>16 ferros de ½”=>16x1,266=20,25cm²>20,1 cm²**

**Estribos=> 1 ferro de 8mm cada 20cm**

**Resistencia à flexão do tubulão=>MR=1507 tf.cm**