

PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTA LUZIA/MG

MEMÓRIA DE CÁLCULO

Cálculo Estrutural - Princípios, Conceitos, Critérios e Resultados

PROJETO EXECUTIVO PASSARELAS 1A E 1B

PONTE 1 – AV. BRASÍLIA/AV. FRIMISA.

PROJETO ESTRUTURAL

NOVEMBRO/2021

VOLUME I

Sumário

1	PARTE I – PONTE 1A	3
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
2	PARTE II – PONTE 1B	44
2.1	Objetivo	44
2.2	Normas usadas no cálculo	44
2.3	Softwares e livros Utilizados	45
2.4	Materiais Empregados	45
2.5	Cargas na estrutura	46
2.6	Cálculo da estrutura de aço	48
2.7	Aparelhos de Apoio	81
2.8	Cálculo das fundações	81

1 PARTE I – PONTE 1A

1.1 Objetivo

O objetivo deste volume é apresentar a Memória do Cálculo Estrutural correspondente à Passarela 1A adjacente à Ponte 01, 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

$\Rightarrow 200 \text{ kgf/m}^2 \Rightarrow$ corresponde ao peso de uma laje de concreto de 8cm de espessura; piso de aço que pesa 100 kgf/m^2 , aproximadamente.

1.5.3 ESTADO 2 Sobrecarga na passarela

$\Rightarrow 500 \text{ kgf/m}^2$; conforme NBR 7187.

1.5.4 ESTADO 3 Outras cargas adicionais

=>20 kgf/m em cada viga.

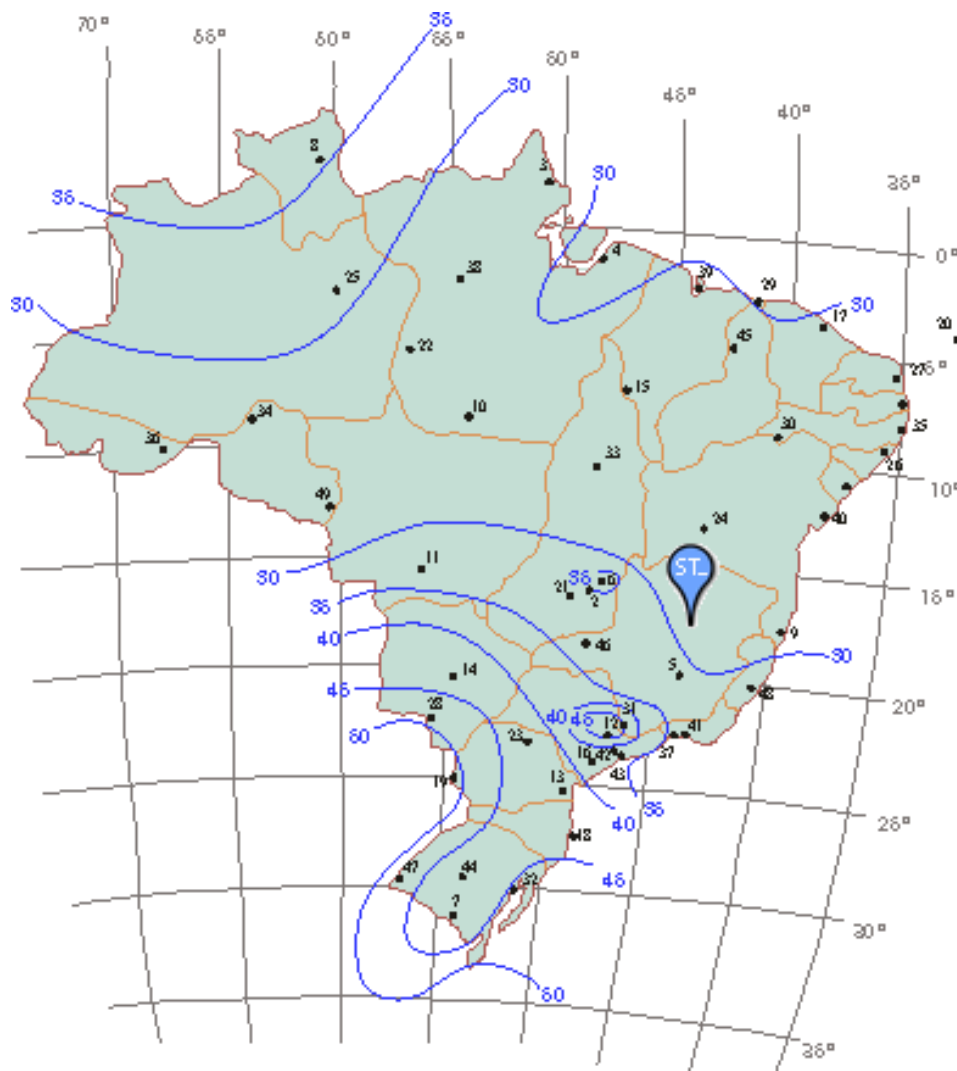
1.5.5 ESTADO 4 Vento

Conforme NBR 6123.

1.5.5.1 Ação do vento na edificação

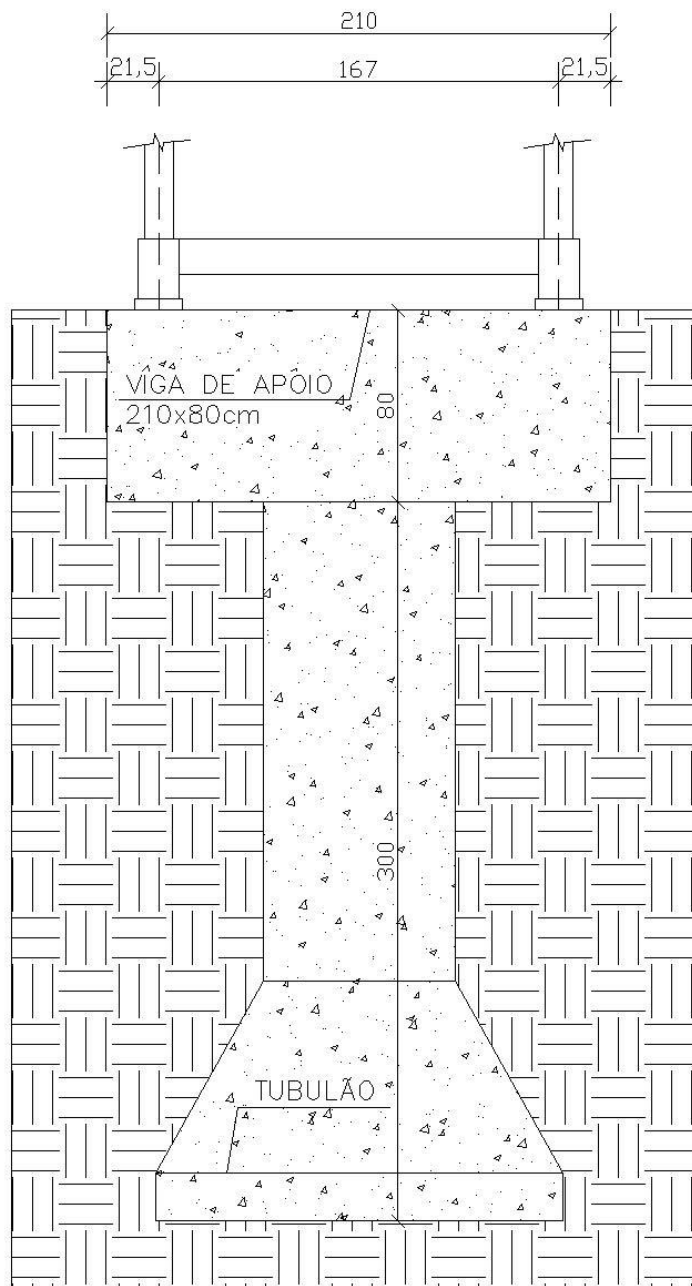
1.5.5.1.1 Determinação da pressão dinâmica do vento

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



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: COS-CIVIL 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,33 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,08 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

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

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,41$$

$$\frac{N_{cSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,41$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,08$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,08$$

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 3

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

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 71345,45\text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 63418,18\text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 63418,18\text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,44 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

1.6.3.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 1201926,74 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 612628,45 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 16419558,96 \text{ kgf}$$

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

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 1201926,74 \text{ kgf}$$

$$N_e = 612628,45 \text{ kgf}$$

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

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

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

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 17,36 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 41143,63 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

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

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 17,05 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 42624,81 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 41143,63 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

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

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

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 24,93 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 2248,06 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,61 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 Y_{G \text{ final}} &= Y_G + d = 13,11 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 2238,81 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{Y_{G \text{ final}}} = 170,78 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{PL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 465772,18 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 37977996,13 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 146,05 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,11 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0
 \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 24,93 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 2248,06 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,61 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 Y_{G \text{ final}} &= Y_G + d = 13,11 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 2238,81 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{cef} &= \frac{I_G}{Y_{G \text{ final}}} = 170,78 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 465772,18 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}
 \end{aligned}$$

$$M_{Rdx} = 465772,18 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,08 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

1.6.3.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 22,83 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{yef} &= 937,11 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\
 d &= 1,22 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 x_{G \text{ final}} &= x_G + d = 9,72 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 903,34 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 92,97 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{Rdy} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 253567,23 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,00 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

1.6.3.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{h}{t} = 52,67 && \text{Parâmetro de esbeltez} \\
 k_v &= 5,00 && \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento} \\
 \lambda_p &= 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação} \\
 \lambda_r &= 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \\
 &&& \lambda \leq \lambda_p \text{ então} \\
 V_{Rd} &= \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10} \\
 V_{Rdy} &= 15512,73 \text{ kgf} && \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

1.6.3.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 79,33 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

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

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

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

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

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

1.6.3.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,08$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,52$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,36$$

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 2.25

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

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

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

1.6.4.1 Cálculo da Tração

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

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

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

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

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

1.6.4.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 78419,25 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 77170,14 \text{ kgf}$$

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

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

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 78419,25 \text{ kgf}$$

$$N_e = 77170,14 \text{ kgf}$$

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

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

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

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

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 16625,10 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

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

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

$$N_{cRd} = 16625,10 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,45 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

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

$$A_{ef} = 7,51 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 65,15 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

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

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

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

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

$$M_{Rdx}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 47382,42 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

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

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 5978227,12 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 16,03 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

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

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

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

$A_{ef} = 7,51 \text{ cm}^2$ Área efetiva da seção

$I_{xef} = 65,15 \text{ cm}^4$ Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y

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

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

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

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

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

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

$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,03 < 1,00$ OK!

1.6.4.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$A_{ef} = 7,51 \text{ cm}^2$ Área efetiva da seção

$I_{yef} = 64,11 \text{ cm}^4$ Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z

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

$x_{G \text{ final}} = x_G + d = 4,00 \text{ cm}$ Posição final do eixo baricêntrico

$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 64,11 \text{ cm}^4$ Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico

$W_{ef} = \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 16,03 \text{ cm}^3$ Módulo elástico efetivo

$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 43713,45 \text{ kgf.cm}$ Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z

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

1.6.4.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$\lambda = \frac{h}{t} = 31,56$ Parâmetro de esbeltez

$k_v = 5,00$ Coeficiente de flambagem local por cisalhamento

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

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

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

$$V_{Rdy} = 5228,18 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

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

1.6.4.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

1.6.4.7 Equações de Interação

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

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

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,04$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,04$$

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

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

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

1.6.5.1 Cálculo da Tração

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

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

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

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

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

1.6.5.2 Cálculo da Compressão

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,14 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

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

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,58 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 423,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 53,91 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 147029,11 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 25086908,84 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 47,46 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,08 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0
 \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,58 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 423,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 53,91 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 147029,11 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}
 \end{aligned}$$

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

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,22 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

1.6.5.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,02 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{yef} &= 238,55 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\
 d &= 0,55 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 x_{G \text{ final}} &= x_G + d = 6,55 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 234,95 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 35,89 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdy} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 97877,47 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,01 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

1.6.5.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{h}{t} = 49,33 && \text{Parâmetro de esbeltez} \\
 k_v &= 5,00 && \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento} \\
 \lambda_p &= 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação} \\
 \lambda_r &= 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \\
 V_{Rd} &= \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10} && \lambda \leq \lambda_p \text{ então} \\
 V_{Rdy} &= 8173,64 \text{ kgf} && \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

1.6.5.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,04 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

1.6.5.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,38$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,24$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,24$$

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

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

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

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

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,13 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

1.6.6.2 Cálculo da Compressão

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$A_{ef} = 7,51 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 65,15 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

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

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

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

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

$$M_{Rdx}^L = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 47382,42 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

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

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 5029628,46 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 16,03 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,10 \quad \lambda_o \leq 0,6 \quad \text{então} \quad \chi_{FLT} = 1,0$$

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

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

$$A_{ef} = 7,51 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 65,15 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

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

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

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

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

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

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

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,12 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

1.6.6.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$A_{ef} = 7,51 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 64,11 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

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

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

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 64,11 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{\chi_{G \text{ final}}} = 16,03 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 43713,45 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

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

1.6.6.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 31,56 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

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

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

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

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

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

$$V_{Rdy} = 5228,18 \text{ kqf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

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

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

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

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,26$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,01$$

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

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

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

1.6.7.1 Cálculo da Tração

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = \frac{12000}{147029,11} = 0,08 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

1.6.7.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = \frac{0}{97877,47} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

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/m² =>com majoração =>1,4x500=700 kgf/m²; peso-próprio da chapa 50 kgf/m².

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:

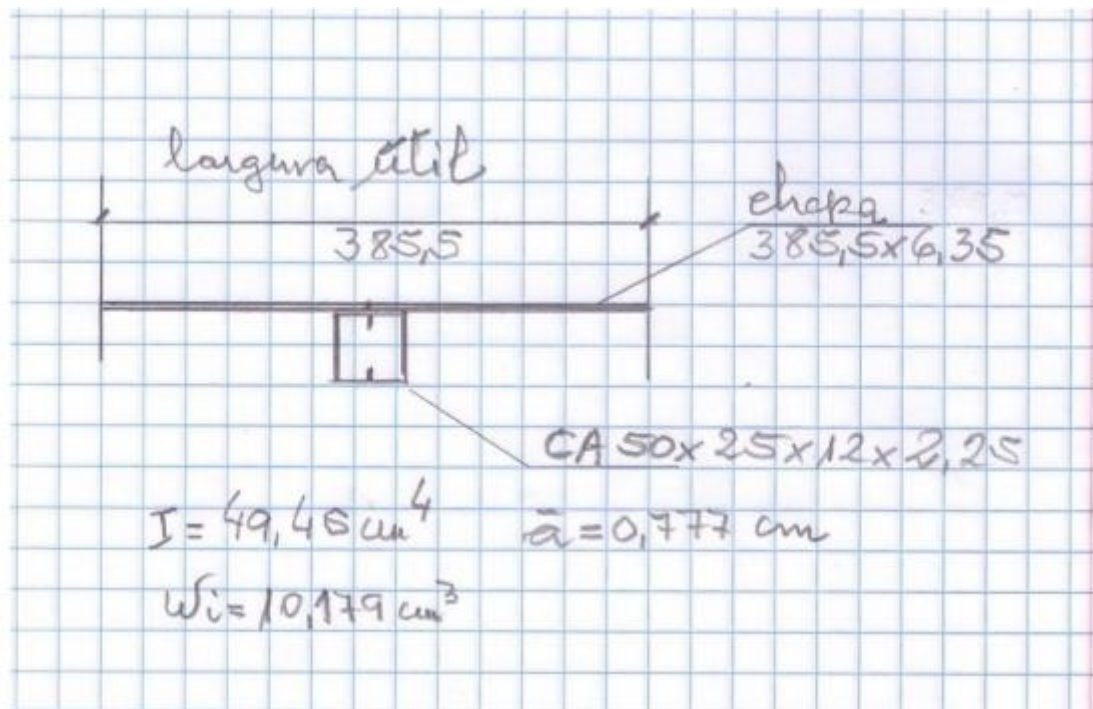
$$\Rightarrow R1 = 74 \text{ kg/m}$$

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

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

O máximo fletor majorado na viga será:

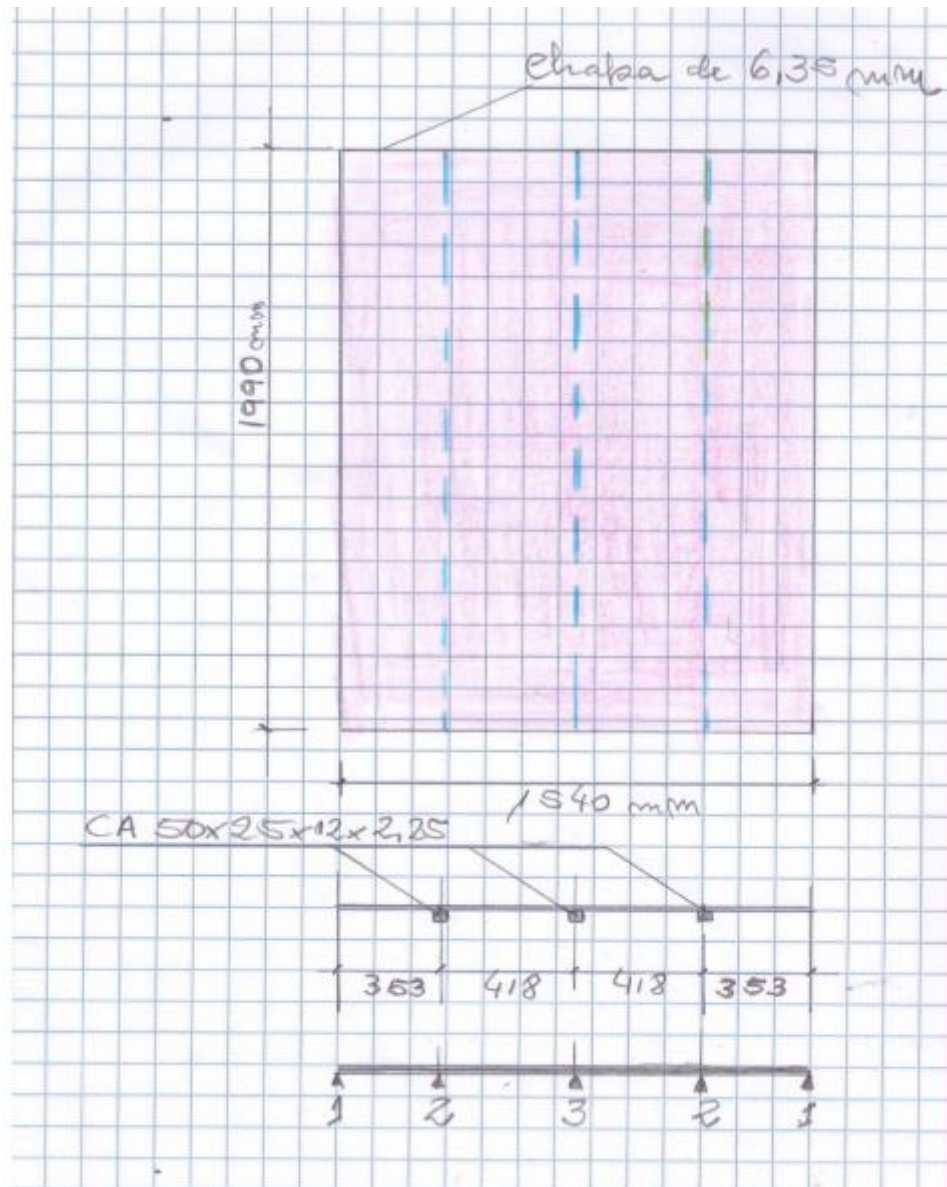
$$\Rightarrow_{\max} Msd = (237 \times 1,4) \times 1,99^2 / 8 = 164,3 \text{ kgf.m} = 16,43 \text{ tf.cm}$$



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:

$$\Rightarrow d_{XT} = (\pm 0,012 \times 20 \times 35) \times 0,5 = \pm 4,2 \text{ mm};$$

=>Deslocamento devido à flexão da viga principal:

$$\Rightarrow d_x = 5,24 / 2 = + 2,62 \text{ mm}$$

Resumo dos deslocamentos=> $dx = (4,2 + 2,62) = + 6,82\text{mm}$; $dx = - 4,2\text{mm}$

1.7.2 Escolha do Aparelho de Apoio

Máxima carga vertical=> $N_c = 7,4 \times 1,4 = 10,36 \text{ tf}$ (com majoração).

Usando a TABELA da RUBBERFLEX, (fabricação MEPEL)

Resumo dos deslocamentos=> $dx = (4,2 + 2,62) = + 6,82\text{mm}$; $dx = - 4,2\text{mm}$

Resumo deste item:

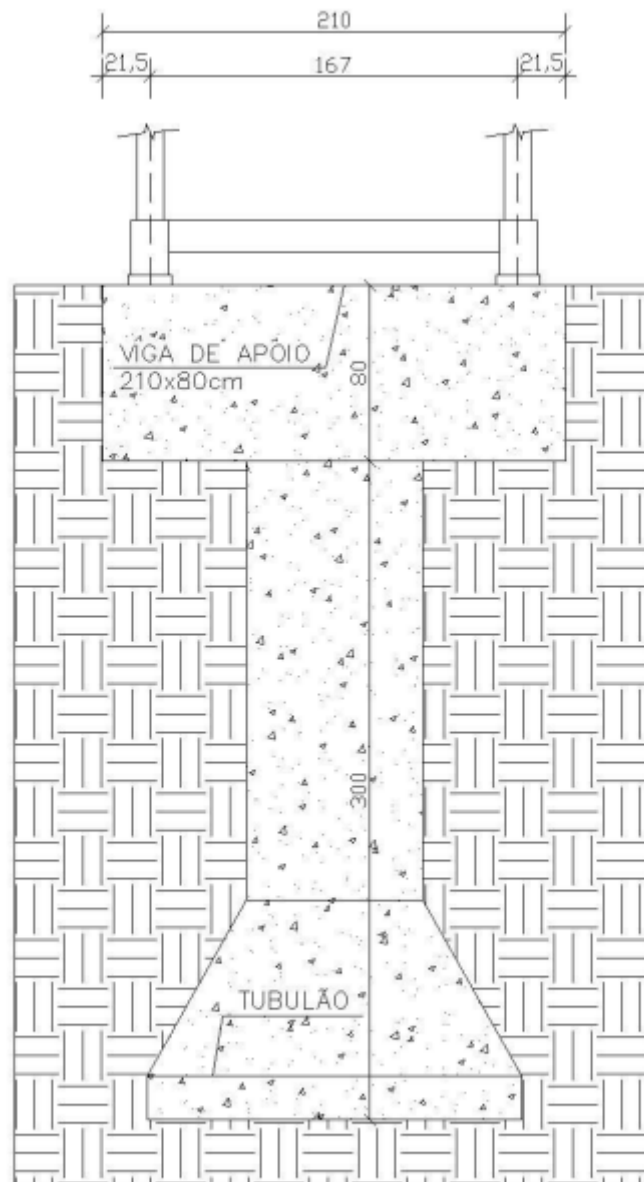
- Duas dimensões de aparelhos de apoio podem ser usadas, ou uma ou outra, dependendo da conveniência da compra:

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

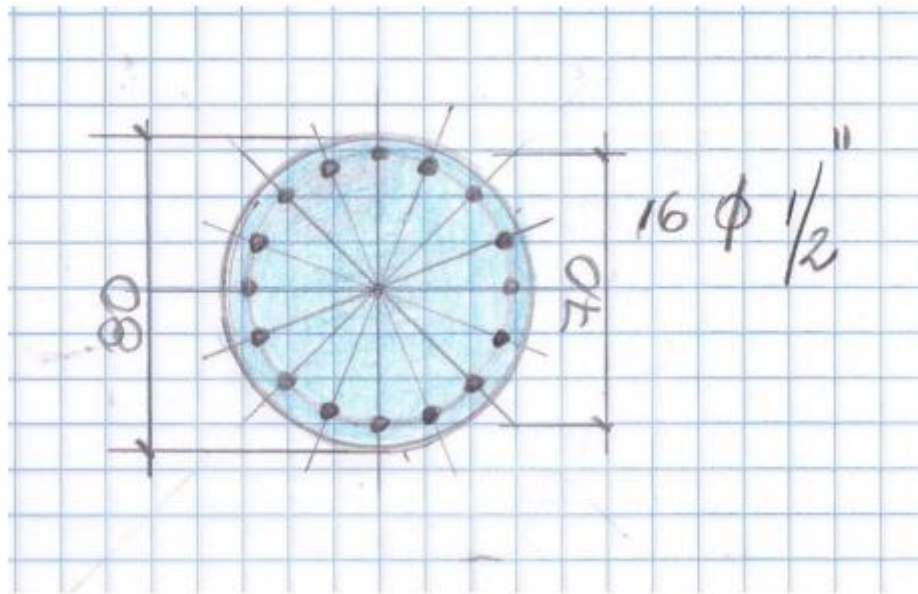
=> de 150x200mm por 28mm de espessura; deslocamento máximo de 14mm; carga de 30 tf;

1.8 Cálculo das Fundações

1.8.1 Desenhos das Fundações



FUNDAÇÃO – VIGA DE APOIO E TUBULÃO
ESCALA 1:20



Diâmetro da base => 1,70m; diâmetro do fuste => 0,8m.

Reações nos apoios não majoradas:

=> Apoios laterais => $R_1 = 7,9 \text{ tf}$

=> Apoio central => $R_2 = 14,2 \text{ tf}$ (referente à passarela 1B)

Carga no tubulão:

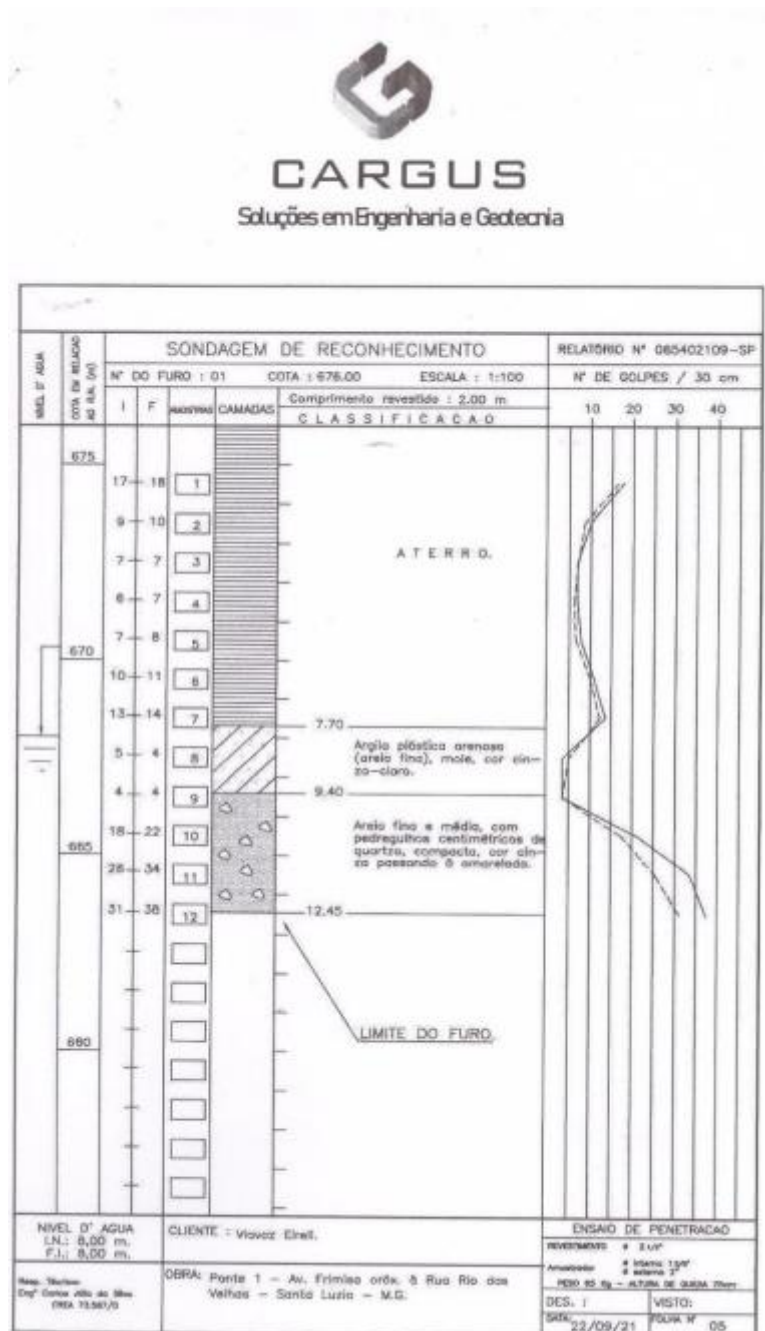
=> $R_{\text{tubulão}} = (7,1 \times 2) \times 1,4 + (3,8 \times 0,8 \times 0,8 \times 2,5) \times 1,4 + (2,51 + 1,14 + 2,78)$

$\times 1,4 = 20 + 8,51 + 9,0 = 37,51 \text{ tf}$

=> Carga para dimensionamento do solo (sem majoração) => 27 tf

1.8.2 Cálculo da resistência do solo para passarela 1A

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.

Obra Ponte I

Loca SPT furo 1

Diâmetro: 170 cm

ra: 20 MPa

Tipo Escavado grande diâmetro de estaca: α

Resistência da estaca: 5000 kN

F1 = 3,5

Coef. Segurança: 2,0

F2 = 7,0

Détourné-Quaresma				Aoki-Velloso							
Colar (m)	Prof. SPT (m)	Solo	K (kN/m ²)	Qp (kN)	qs (kN/m ²)	Qs (kN)	Qtotal (kN)	K (kN/m ²)	α (%)	Qp (kN)	Qtotal (kN)
559	0	-	0	0	0	0	0	0	0,0%	0	0
558	1	Silt arenoso	250	4250	67	356	6019	550	2,2%	6064	6221
557	2	Silt arenoso	250	2250	5107	40	3435	550	2,2%	3210	3450
556	3	Argila arenosa	120	840	1907	33	2219	350	2,4%	1589	1874
555	4	Argila arenosa	120	720	1634	30	2115	350	2,4%	1362	1685
554	5	Argila arenosa	120	840	1907	33	2489	350	2,4%	1589	1957
553	6	Argila arenosa	120	1200	2724	43	3369	200	6,0%	1297	1757
552	7	Argila	120	1560	3541	53	4292	200	6,0%	1886	2265

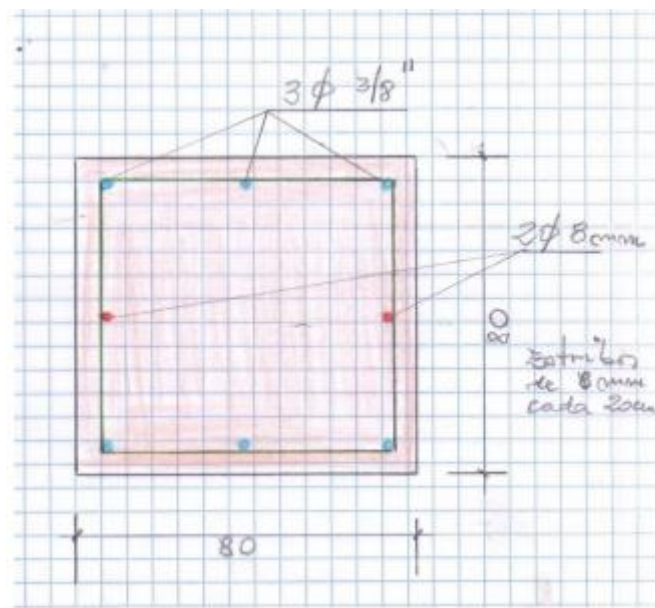
Podemos ler acima que um tubulão com base de 170cm, com 3m de profundidade, é suportado por um solo que resiste a 1589 kN. Vale dizer: a resistência do solo suportando uma base de 170cm de diâmetro, a 3m de profundidade, deverá ser $1589/2=794,5$ kN, ou 79,45 tf. Ou, ainda= $\Rightarrow 79450/22697= 3,5$ kgf/cm² >ou $\Rightarrow 27/79,45=0,34<1,0$.

Nota: há uma outra sondagem apresentada pela CARGUS que foi descartada por duas razões: primeira) a sondagem apresenta penetração zero, nada informando sobre o subsolo, que parece ser um

aterro; segunda) o furo de sondagem não está locado no ponto no qual deveria estar. Que poderá ocorrer durante a obra?

Durante a execução da obra poderá se concluir por fundação direta, ao invés de tubulão, por impossibilidade de se fazer a escavação. Neste caso, seria indicado fazer uma fundação direta sobre bloco de concreto, mais simples e mais barata.

1.8.3 Cálculo da viga transversal sobre o tubulão



Do desenho no item 1.8.1:

=> $R=7,3 \times 1,4=10,23 \text{ tf}$ => Momento fletor máximo na viga sobre o tubulão

=> $\max M_{sd}=10,23 \times (1,67 \times 0,5 - 30) + 1,4 \times 0,016 \times 0,5 \times (53,5)^2 = 548 + 22,9 = 580 \text{ tf.cm}$

Armadura => $M_R=3 \times 3,031 \times 70=636,5 \text{ tf.cm} > 580 \text{ tf.cm} > 580/636,5 = 0,91 < 1,0$

Estribos => $\max V= 7,3 \times 1,4 + 1,4 \times 0,016 \times 53,5 = 11,42 \text{ tf}$

$11,42 / (2,136 \times 2) = 2,68 \text{ ferros cada } 70 \text{ cm}$

=> **3,8 ferros de 8mm por metro ou um estribo de 8mm cada 20cm.**

1.8.4 Cálculo do tubulão

$N_{sd} = 1,4 \times 26 = 36,4 \text{ tf} \Rightarrow$ Força normal resistente do tubulão, com concreto $F_{ck} = 20 \text{ Mpa}$

$\Rightarrow N_R = (80^2 \times 0,25 \times \pi) \times 0,20 \times 0,85 / 1,4 + 16 \times 5,383 = 696 \text{ tf} > 36,4 \text{ tf}$

$\Rightarrow 36,4 / 696 = 0,053 < 1,0$

Nota: o tubulão está com a armadura mínima exigida pela Norma, ou seja, $(0,004 \times A) = (0,25 \times 3,1415 \times 80^2) \times 0,004 = 20,1 \text{ cm}^2 \Rightarrow$

$\Rightarrow 16 \text{ ferros de } \frac{1}{2}'' \Rightarrow 16 \times 1,266 = 20,25 \text{ cm}^2 > 20,1 \text{ cm}^2$

Estribos \Rightarrow 1 ferro de 8mm cada 20cm

2 PARTE II – PONTE 1B

2.1 Objetivo

O objetivo deste volume é a apresentar a Memória do Cálculo Estrutural correspondente às Passarelas 1B adjacente à Ponte 01, 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 $F_{ck} = 25\text{ MPa}$. 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/m²

Corresponde ao peso de uma laje de concreto de 8cm de espessura; o cliente solicitou um piso de aço que pesa 100 kgf/m², aproximadamente.

2.1.3 -ESTADO 2 – Sobrecarga na passarela

=>500kgf/m²; conforme NBR 7187.

2.1.4 -ESTADO 3 – Outras cargas adicionais

=>70 kgf/m em cada viga.

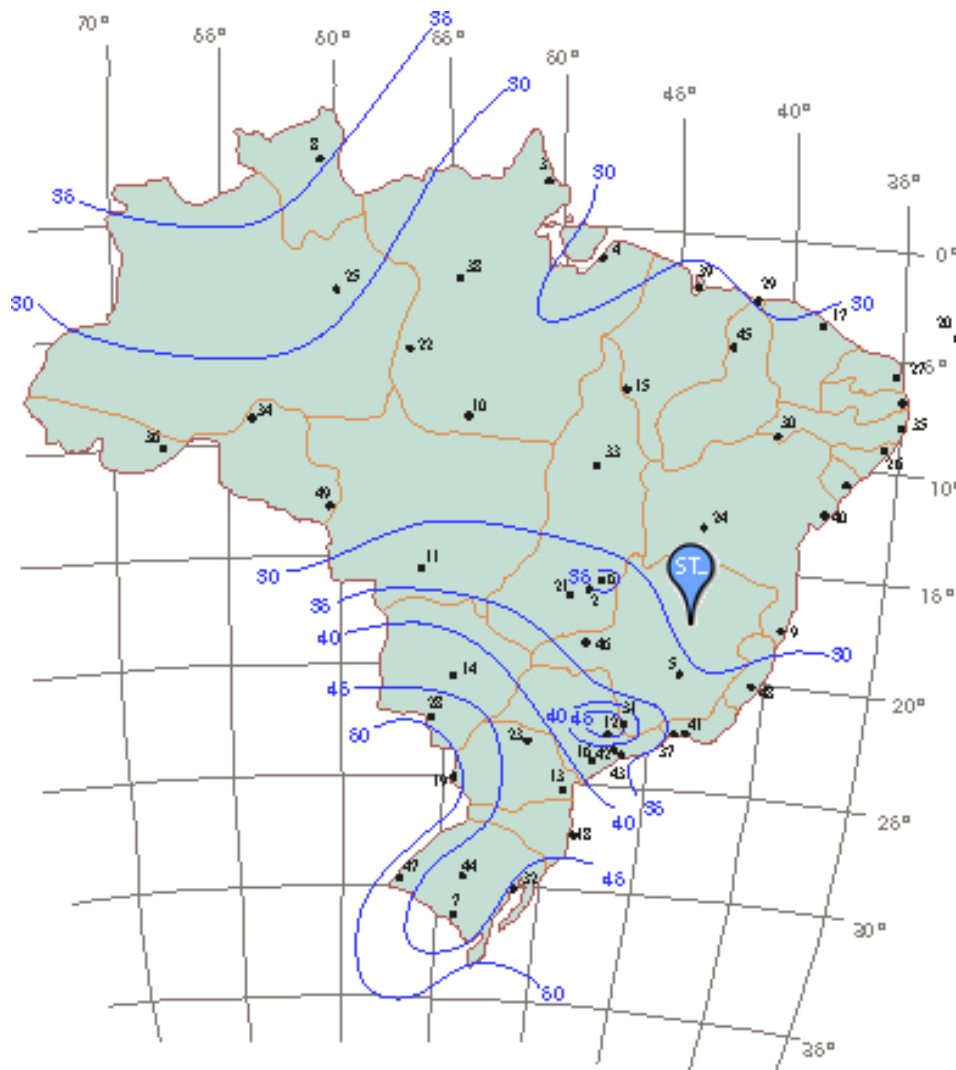
2.1.5 -ESTADO 4 – Vento

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

$$V_k=V_0.S_1.S_2.S_3=24,41\text{ m/s}$$

Velocidade característica do vento

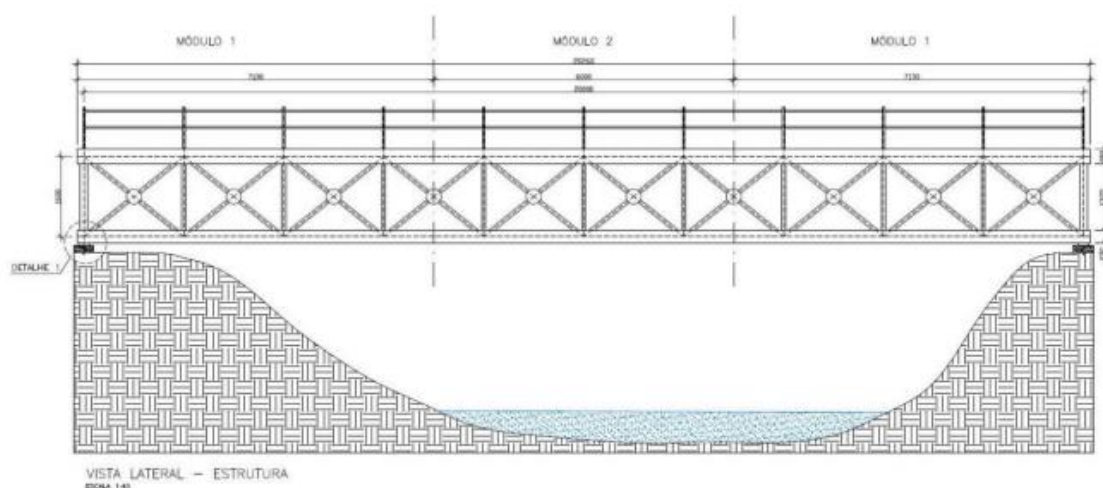
$$q=0,613.V_k^2 = 37,24\text{ kgf/m}^2$$

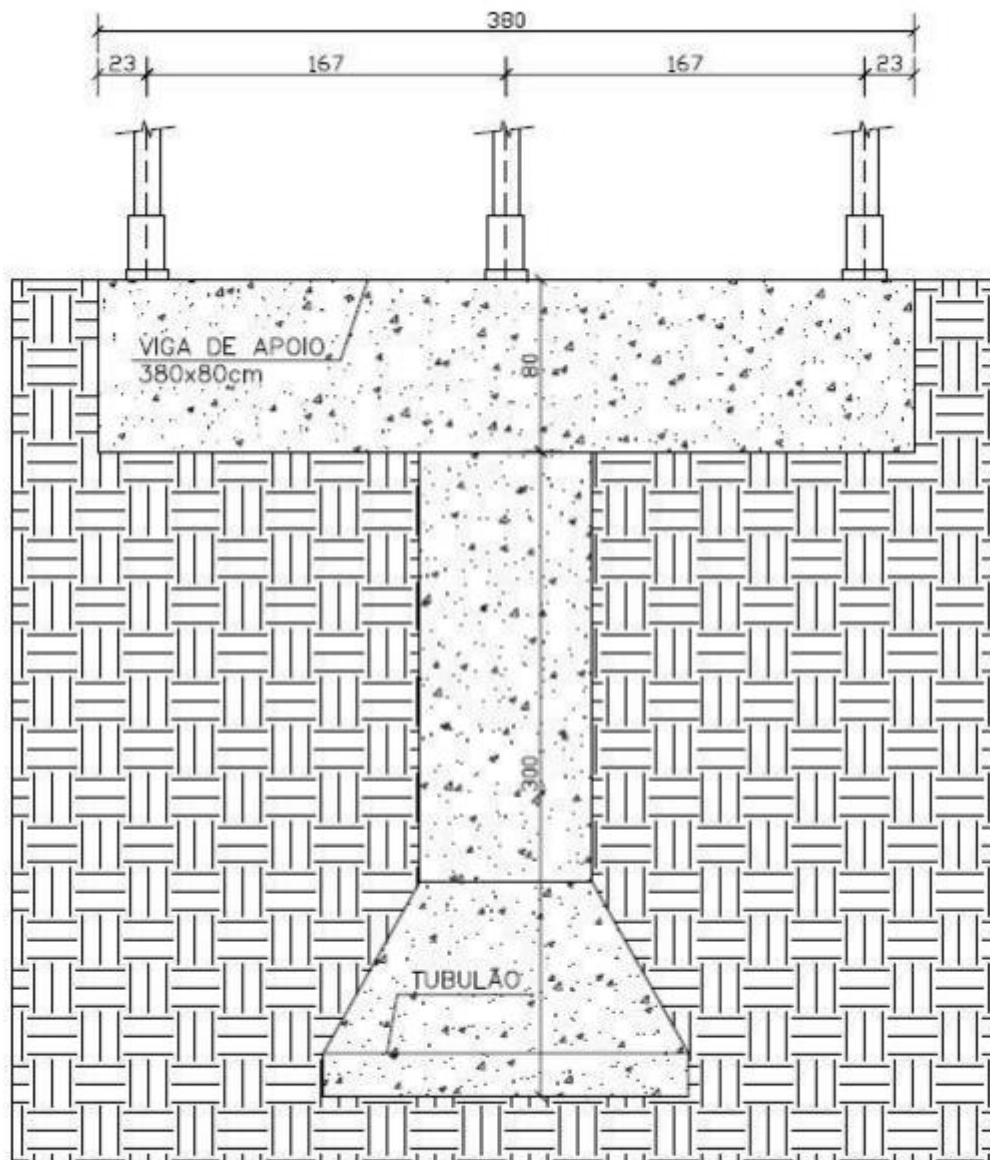
=>Vento perpendicular à lateral da passarela =>coeficientes de pressão e sucção => $(0,7+0,5) \times 37,24=44,7\text{ kgf/m}^2$

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/m².

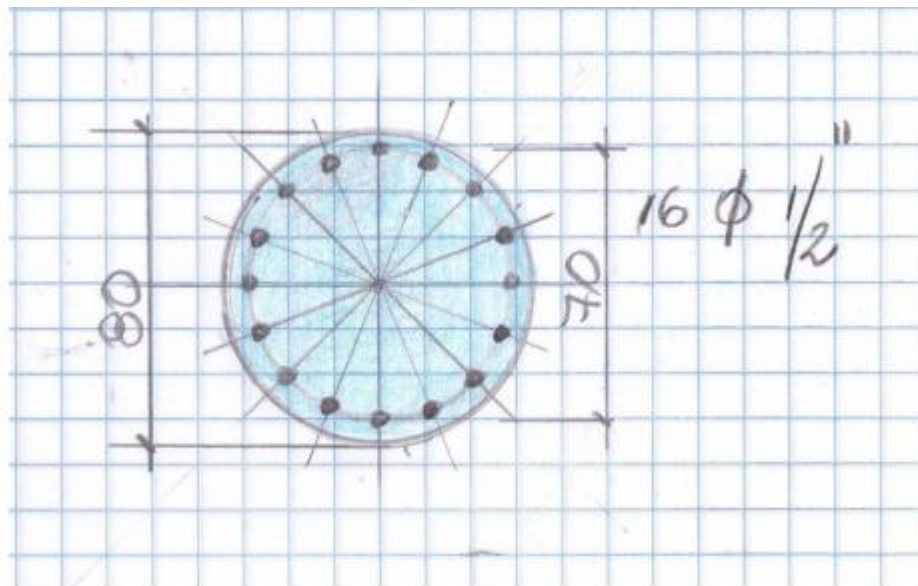
2.6 Cálculo da estrutura de aço

2.1.6 Desenhos da passarela e fundação





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

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

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

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

2.1.7.1 Cálculo da Tração

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

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

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

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

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

2.1.7.2 Cálculo de Compressão

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

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

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

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

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

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

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

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

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

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

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

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

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

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

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

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,54 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 62041538,62 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

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

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

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

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

$A_{ef} = 44,84 \text{ cm}^2$ Área efetiva da seção
 $I_{xef} = 5616,66 \text{ cm}^4$ Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y
 $d = 0,00 \text{ cm}$ Rebaixamento total do eixo baricêntrico
 $Y_{G \text{ final}} = Y_G + d = 15,00 \text{ cm}$ Posição final do eixo baricêntrico
 $I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 5616,66 \text{ cm}^4$ Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico
 $W_{cef} = \frac{I_G}{Y_{G \text{ final}}} = 374,44 \text{ cm}^3$ Módulo elástico efetivo
 $M_{Rdx} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 1021211,32 \text{ kgf.cm}$ Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT
 $M_{Rdx} = 1021211,32 \text{ kgf.cm}$ Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y
 $\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,12 < 1,00 \quad OK!$

2.1.7.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

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

2.1.7.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$\lambda = \frac{h}{t} = 31,79$ Parâmetro de esbeltez
 $k_v = 5,00$ 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

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,66$$

$$\frac{N_{oSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,66$$

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

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

2.1.8 Cálculo da Corda Superior da Viga

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 250 x 85 x 20 x 3

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

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

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 71345,45 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 63418,18 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 63418,18 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,67 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2.1.8.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 1201926,74 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 612628,45 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 16419558,96 \text{ kgf}$$

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

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 1201926,74 \text{ kgf}$$

$$N_e = 612628,45 \text{ kgf}$$

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

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

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

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 17,36 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 41143,63 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

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

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 17,05 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 42624,81 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 41143,63 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

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

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

$$A_{ef} = 24,93 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 2248,06 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,61 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 13,11 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 2238,81 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 170,78 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 465772,18 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

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

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 38730035,65 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 146,05 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

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

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

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

$$A_{ef} = 24,93 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 2248,06 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0,61 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 13,11 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 2238,81 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{cef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 170,78 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 465772,18 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}$$

$$M_{Rdx} = 465772,18 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

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

2.1.8.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$A_{ef} = 22,83 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 937,11 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

$$d = 1,22 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$x_{G \text{ final}} = x_G + d = 9,72 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 903,34 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 92,97 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 253567,23 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

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

2.1.8.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 52,67 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

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

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

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

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

$$V_{Rdy} = 15512,73 \text{ kqf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

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

2.1.8.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 79,33 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

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

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

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

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

$$V_{Rdz} = 18422,72 \text{ kqf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

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

2.1.8.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{csd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ysd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zsd}}{M_{zRd}} = 0,11$$

$$\frac{M_{ysd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zsd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tsd}}{N_{tRd}} = 0,78$$

$$\frac{M_{ysd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zsd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tsd}}{N_{tRd}} = 0,56$$

2.1.9 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: ASTM A36 $f_y = 250\text{MPa}$ $f_u = 400\text{ MPa}$

COMPRIMENTOS DA BARRA

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

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

2.1.9.1 Cálculo da tração

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

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 21954,55 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

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

$$N_{tRd} = 21954,55 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

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

2.1.9.2 Cálculo da Compressão

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

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

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

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

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

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

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,50$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,90$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

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

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 18147,72 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

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

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 20125,00 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 18147,72 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,65 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

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

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

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

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

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

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

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

$$M_{Rdx}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 49213,36 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

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

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 6702885,05 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

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

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

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

$$\text{Cálculo de } \frac{W_{cef}}{\text{na tensão}} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 2500,00 \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

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

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

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

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

$$M_{Rdx}^{FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 49213,36 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}$$

$$M_{Rdx} = 49213,36 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

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

2.1.9.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 9,66 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{yef} &= 81,69 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 x_{G \text{ final}} &= x_G + d = 4,00 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 81,69 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 20,42 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdy} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 46414,66 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,00 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

2.1.9.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{h}{t} = 22,67 && \text{Parâmetro de esbeltez} \\
 k_v &= 5,00 && \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento} \\
 \lambda_p &= 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68,31 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação} \\
 \lambda_r &= 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88,54 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então} \\
 V_{Rd} &= \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10} \\
 V_{Rdy} &= 5563,64 \text{ kgf} && \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,00 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

2.1.9.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68,31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88,54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento}$$

$\lambda \leq \lambda_p$ então

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

$$V_{Rdz} = 5154,55 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

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

2.1.9.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,69$$

$$\frac{N_{cSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,69$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,04$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,04$$

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

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

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

2.1.10.1 Cálculo da Tração

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

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

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

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

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

2.1.10.2 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 25086908,84 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,22 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2.1.10.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1.10.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

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

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

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

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

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

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

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

2.1.10.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,04 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2.1.10.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,53$$

$$\frac{N_{cSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,53$$

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

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

2.1.11 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: ASTM A36 $f_y = 250\text{MPa}$ $f_u = 400\text{ MPa}$

COMPRIMENTOS DA BARRA

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

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

2.1.11.1 Cálculo da Tração

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

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 17079,55 \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

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

$$N_{tRd} = 17079,55 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,08 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2.1.11.2 Cálculo da Compressão

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

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

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

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

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

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

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,62$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,85$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

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

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 13353,83 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

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

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 15656,25 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 13353,83 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

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

2.1.11.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

2.6.6.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 7,51 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 65,15 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

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

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

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

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

$$M_{Rdx}^{FL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 39485,35 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

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

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 5051883,45 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 16,03 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

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

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

$$\text{Cálculo de } \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 2500,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$A_{ef} = 7,51 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 65,15 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

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

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

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

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

$$M_{Rdx} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 39485,35 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}$$

$$M_{Rdx} = 39485,35 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

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

2.1.11.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$A_{ef} = 7,51 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 64,11 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

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

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

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 64,11 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 16,03 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 36427,88 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

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

2.1.11.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 31,56 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

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

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68,31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88,54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

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

$$V_{Rdy} = 4356,82 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

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

2.1.11.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68,31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88,54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

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

$$V_{Rdz} = 4050,00 \text{ kgf} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

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

2.1.11.7 Equações de Interação

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

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,21$$

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

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

$K_x L_x = 162,5\text{ cm}$ $K_z L_z = 162,5\text{ cm}$

$K_y L_y = 162,5\text{ cm}$ $L_b = 162,5\text{ cm}$

2.1.12.1 Cálculo da Tração

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

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = \frac{35836,36\text{ kgf}}{1,10} = 32578,51\text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = \frac{31854,55\text{ kgf}}{1,65} = 19275,48\text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

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

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

2.1.12.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = \frac{339173,77\text{ kgf}}{(1,0 \cdot 162,5)^2} = 339173,77\text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = \frac{212882,48\text{ kgf}}{(1,0 \cdot 162,5)^2} = 212882,48\text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = \frac{9984028,15\text{ kgf}}{(1,0 \cdot 162,5)^2} = 9984028,15\text{ kgf}$$

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

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 339173,77 \text{ kgf}$$

$$N_e = 212882,48 \text{ kgf}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,43$$

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

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

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

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

$$N_{cRd} = 23200,61 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

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

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

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,58 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 423,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 53,91 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{PL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 147029,11 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

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

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 12459774,46 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$\begin{aligned}
 W_c &= 47,46 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,11 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0
 \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,58 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 423,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 53,91 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 147029,11 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT} \\
 M_{Rdx} &= 147029,11 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,57 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

2.1.12.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,02 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{yef} &= 238,55 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\
 d &= 0,55 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 X_{G \text{ final}} &= X_G + d = 6,55 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 234,95 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{X_{G \text{ final}}} = 35,89 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdy} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 97877,47 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \\
 \frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,16 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

2.1.12.5 Cálculo da Resistência ao Cortante - eixo Y

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{h}{t} = 49,33 && \text{Parâmetro de esbeltez} \\
 k_v &= 5,00 && \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento} \\
 \lambda_p &= 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 62,35 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação} \\
 \lambda_r &= 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 80,83 && \text{Parâmetro de esbeltez limite para para início de escoamento} \\
 &&& \lambda \leq \lambda_p \text{ então} \\
 V_{Rd} &= \frac{0,6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1,10} \\
 V_{Rdy} &= 8173,64 \text{ kgf} && \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y} \\
 \frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} &= \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0,02 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

2.1.12.6 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

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

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

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,19 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

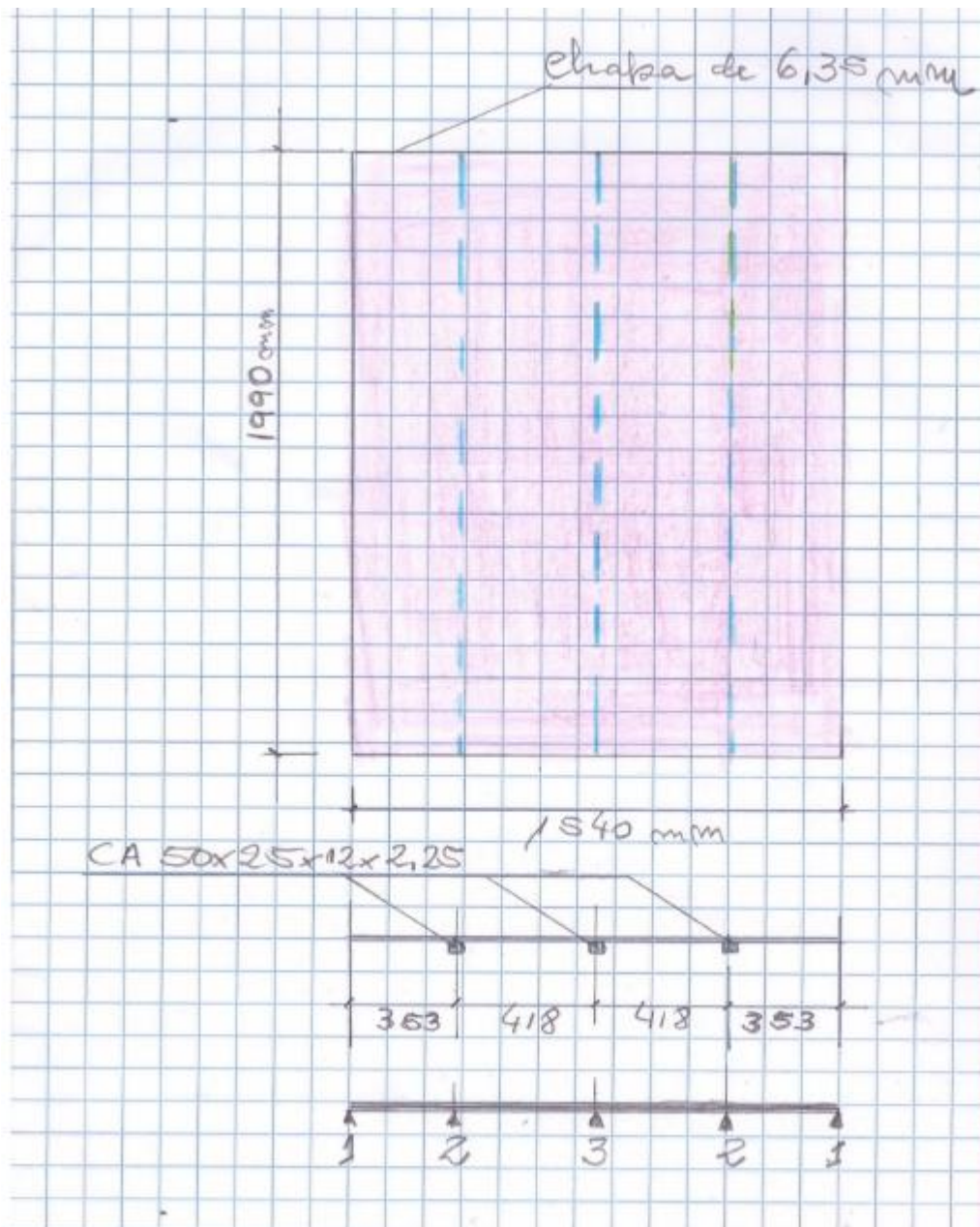
2.1.12.7 Equações de Interação

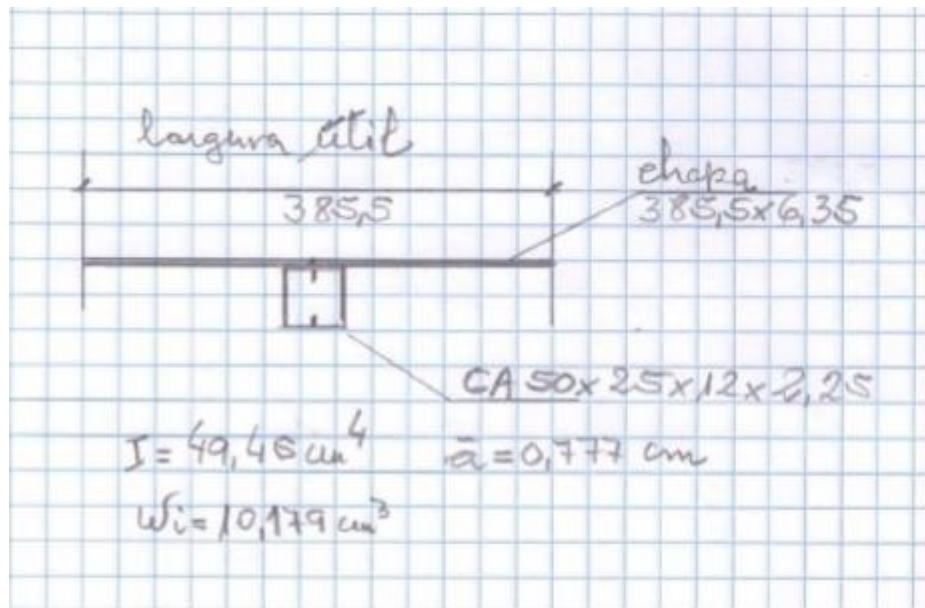
$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,73$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,73$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,73$$

2.1.13 Piso de Aço





=>Sobrecarga no piso conforme NBR7187=>500 kgf/m² =>com majoração =>1,4x500=700 kgf/m²; peso-próprio da chapa 50 kgf/m². 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:

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

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

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

Neste cálculo usamos chapa xadrez com tensão de escoamento

$F_y = 250 \text{ MPa}$, embora o perfil seja em aço $F_y = 300 \text{ MPa}$. 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.

2.7 Aparelhos de Apoio

2.1.13.1.1 Deslocamentos devido à temperatura e à flexão

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

=> Deslocamento longitudinal devido à temperatura:

$$\Rightarrow d_{XT} = (\pm 0,012 \times 20 \times 35) \times 0,5 = \pm 4,2 \text{ mm};$$

=> Deslocamento devido à flexão da viga principal:

$$\Rightarrow d_x = 7,73 / 2 = +3,87 \text{ mm}$$

Resumo dos deslocamentos => $dx = (4,2 + 3,87) = + 8,07 \text{ mm}$; $dx = - 4,2 \text{ mm}$

2.1.13.1.2 Escolha do Aparelho de Apoio

Máxima carga vertical => $N_c = 14,2 \times 1,4 = 20 \text{ tf}$ (com majoração).

Usando a TABELA da RUBBERFLEX, (fabricação MEPEL)

Resumo dos deslocamentos => $dx = (4,2 + 3,87) = + 8,07 \text{ mm}$; $dx = - 4,2 \text{ mm}$

Resumo deste item:

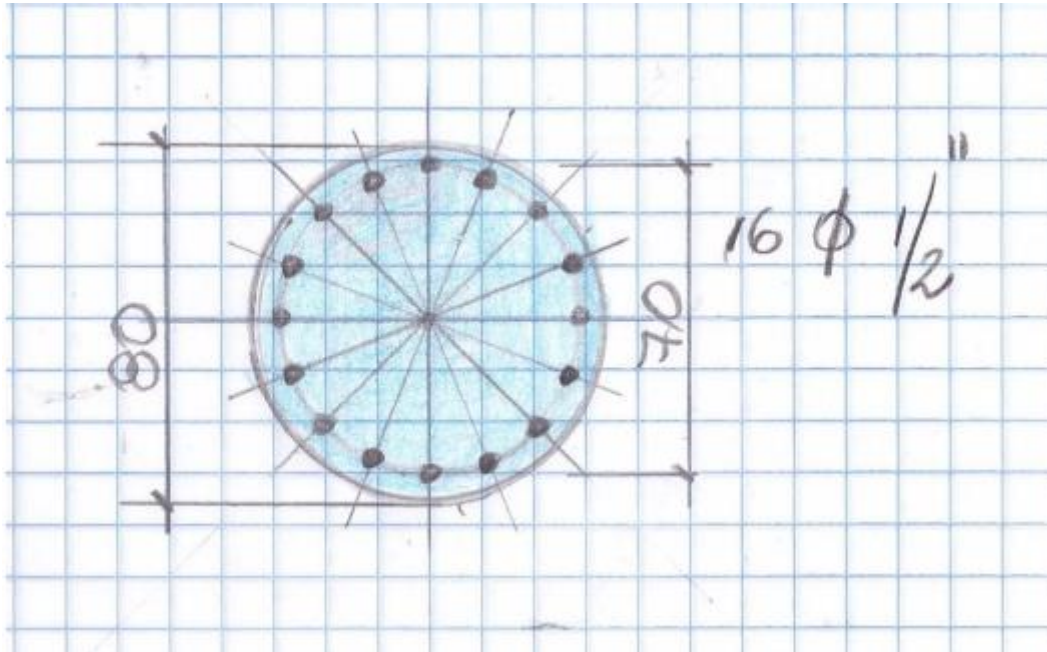
-Aparelho de apoio escolhido:

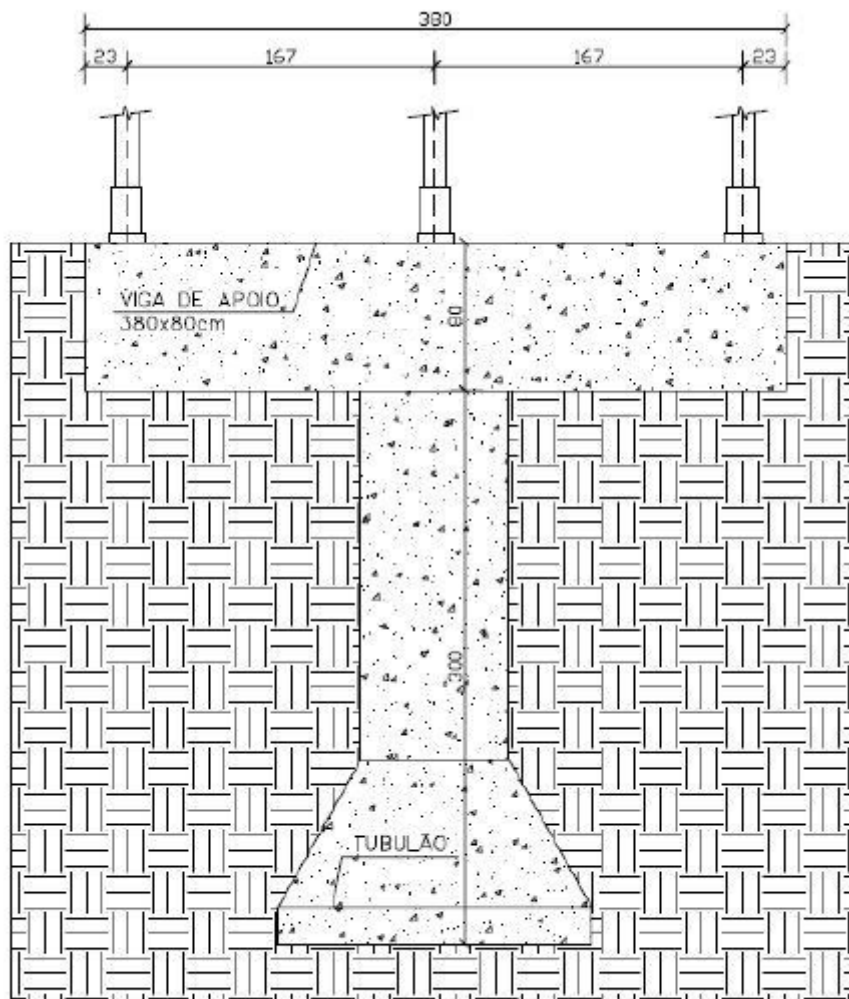
=> de 150x200mm por 28mm de espessura; deslocamento máximo de 14mm; carga de 30 tf.

2.8 Cálculo das fundações

2.1.13.1.3 Desenhos das fundações

TUBULÃO





FUNDAÇÃO – VIGA DE APOIO E TUBULÃO
ESCALA 1:20

Diâmetro da base => 1,70m; diâmetro do fuste => 0,8m.

Reações nos apoios não majoradas:

=> Apoios laterais => $R_1 = 7,9 \text{ tf}$

=> Apoio central => $R_2 = 14,2 \text{ tf}$

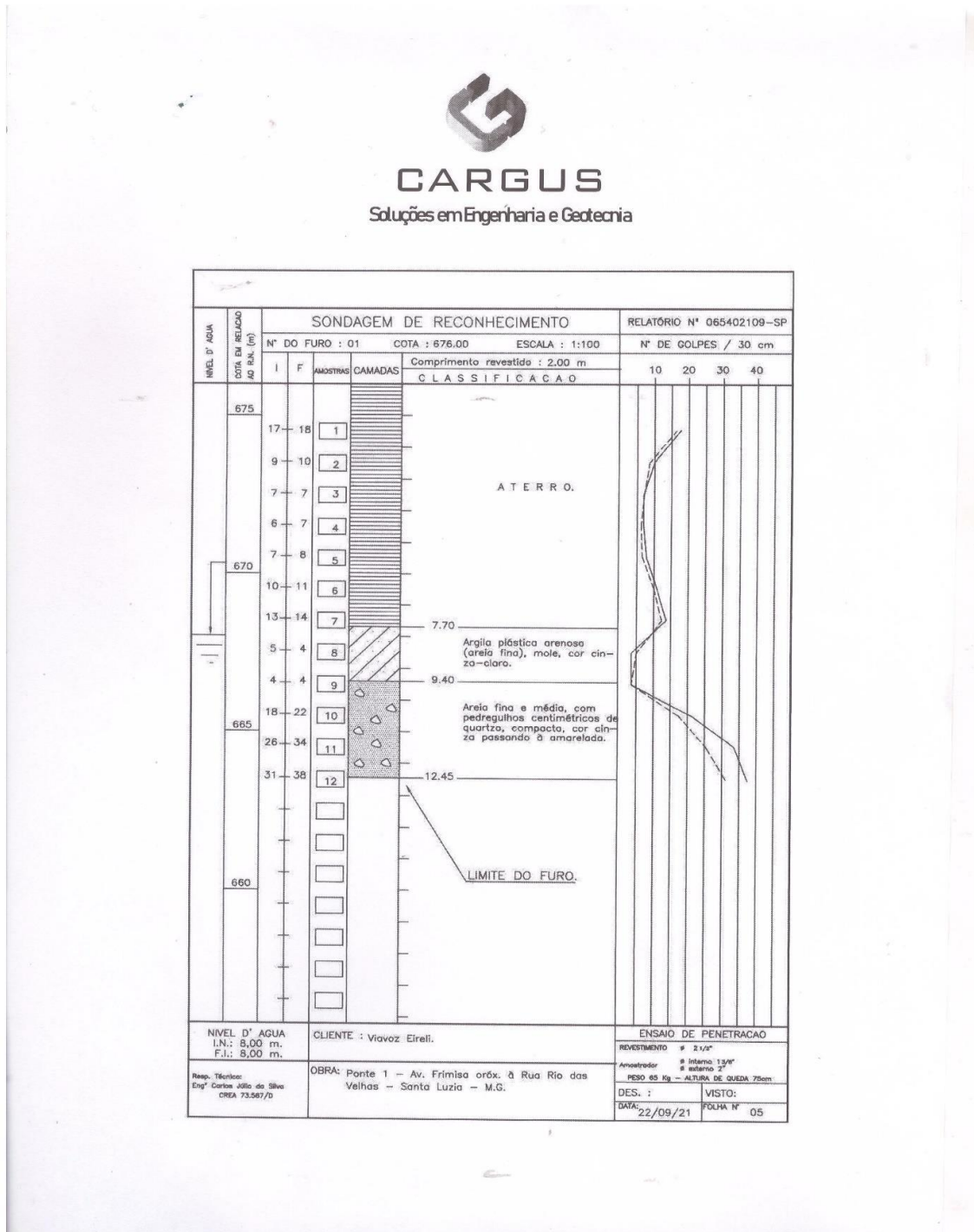
Carga no tubulão:

=> $R_{\text{tubulão}} = (7,9 \times 2 + 14,2) \times 1,4 + (3,8 \times 0,8 \times 0,8 \times 2,5) \times 1,4 + (2,51 + 1,14 + 2,78) \times 1,4 = 42 + 8,51 + 9,0 = 59,51 \text{ tf}$

=> Carga para dimensionamento do solo (sem majoração) => 42,51 tf

2.1.13.1.4 Cálculo da resistência do solo para passarela 1B

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.

Obra Ponte I
: _____
Loca SPT furo 1
li: _____

Diâmet 170 cm
ro: 20 MPa
Tipo Escavada grande diâmetro
de concreto
estaca
a: _____
Resistê 5000 kN
ncia da estaca
Coef. 2,0
Segura
nça: _____

F1 = 3,5
F2 = 7,0

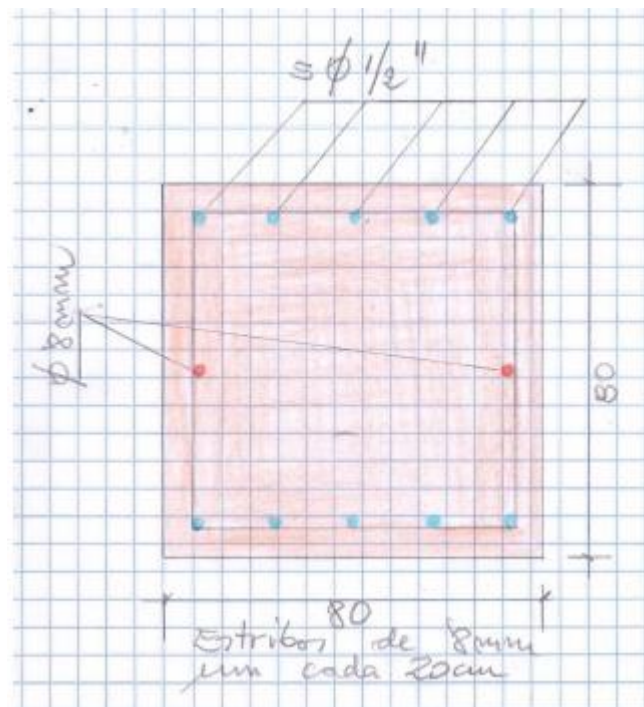
					Décourt-Quaresma										Aoki-Velloso					
Cota (m)	Prof. (m)	SPT	Solo	K (kN/m ²)	qp (kN/m ²)	Qp (kN)	qs (kN/m ²)	Qs (kN)	Qtotal (kN)	Q/CS (kN)	K (kN/m ²)	α (%)	Qp (kN)	Qa (kN)	Qtotal (kN)	Q/CS (kN)				
559	0	-		0	0	0	10	0			0	0,0%	0	0	0					
558	1	17	Silt arenoso	250	4250	9647	67	356	6019	3110	550	2,2%	6064	157	6221	3110				
557	2	9	Silt arenoso	250	2250	5107	40	570	3435	1717	550	2,2%	3210	240	3450	1725				
556	3	7	Argila arenosa	120	840	1907	33	748	2219	1109	350	2,4%	1589	285	1874	937				
555	4	6	Argila arenosa	120	720	1634	30	908	2115	1058	350	2,4%	1362	323	1685	843				
554	5	7	Argila arenosa	120	840	1907	33	1086	2489	1245	350	2,4%	1589	368	1957	979				
553	6	10	Argila	120	1200	2724	43	1317	3369	1685	200	6,0%	1297	460	1757	878				
552	7	13	Argila	120	1560	3541	53	1602	4292	2146	200	6,0%	1686	579	2265	1132				

Podemos ler acima que um tubulão com base de 170cm, com 3m de profundidade, é suportado por um solo que resiste a 1589 kN. Vale dizer: a resistência do solo suportando uma base de 170cm de diâmetro, a 3m

de profundidade, deverá ser $1589/2=794,5$ kN, ou 79,45 tf. Ou, ainda= $\Rightarrow 79450/22697= 3,5$ kgf/cm² >ou $\Rightarrow 42,51/79,45=0,54<1,0$.

Nota: há uma outra sondagem apresentada pela CARGUS que foi descartada por duas razões: primeira) a sondagem apresenta penetração zero, nada informando sobre o subsolo, que parece ser um aterro; segunda) o furo de sondagem não está locado no ponto no qual deveria estar. Que poderá ocorrer durante a obra? Durante a execução da obra poderá se concluir por fundação direta, ao invés de tubulão, por impossibilidade de se fazer a escavação. Neste caso, seria indicado fazer uma fundação direta sobre bloco de concreto, mais simples e mais barata.

2.1.13.1.5 Cálculo da viga transversal sobre o tubulão



Do desenho no item 2.6.8.2.1:

$R=7,9 \times 1,4=11,06$ tf \Rightarrow Momento fletor máximo na viga sobre o tubulão:

$\max M_{sd} = 11,06 \times (167 - 30) + 1,4 \times 0,016 \times 0,5 \times (137,5)^2 = 1515 + 212 = 1727$
tf.cm

Armadura $\Rightarrow M_R = 5 \times 5,383 \times 70 = 1884$ tf.cm > 1727 tf.cm $> 1727 / 1884$
 $= 0,92 < 1,0$

Estribos $\Rightarrow \max V = 7,9 \times 1,4 + 1,4 \times 0,016 \times 137,5 = 14,14$ tf
 $14,14 / (2,136 \times 2) = 3,3$ ferros cada 70cm \Rightarrow **4,73 ferros de 8mm por metro ou um estribo de 8mm cada 20cm.**

2.1.13.1.6 Cálculo do tubulão

$\max N_{sd} = 1,4 \times 42,51 = 59,51$ tf \Rightarrow Força normal resistente do tubulão, com concreto.

$F_{ck} = 20$ Mpa $\Rightarrow N_R = (80^2 \times 0,25 \times \pi) \times 0,20 \times 0,85 / 1,4 + 16 \times 5,383$
 $= 696$ tf $> 59,51$ tf
 $\Rightarrow 59,51 / 696 = 0,086 < 1,0$

Nota: o tubulão está com a armadura mínima exigida pela Norma, ou seja, $(0,004 \times A) = (0,25 \times 3,1415 \times 80^2) \times 0,004 = 20,1$ cm² \Rightarrow
 \Rightarrow **16 ferros de ½" $\Rightarrow 16 \times 1,266 = 20,25$ cm² $> 20,1$ cm²**

Estribos \Rightarrow 1 ferro de 8mm cada 20cm

Resistencia à flexão do tubulão $\Rightarrow M_R = 1507$ tf.cm

18 de novembro de 2021.