

PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTA LUZIA/MG

MEMÓRIA DE CÁLCULO

Cálculo Estrutural - Princípios, Conceitos, Critérios e Resultados

PROJETO EXECUTIVO PASSARELAS 2A E 2B

PONTE 2 – AV. BRASÍLIA/AV. FRIMISA.

PROJETO ESTRUTURAL

NOVEMBRO/2021

VOLUME I

Sumário

1 PARTE I – PASSARELA 2A	4
1.1 Objetivo	4
1.2 Normas usadas no cálculo.....	4
1.3 Softwares e livros utilizados	4
1.4 Materiais empregados	4
1.5 Cargas na estrutura	5
1.5.1 Peso próprio.....	5
1.5.2 ESTADO 1 Piso da passarela.....	5
1.5.3 ESTADO 2 Sobrecarga na passarela.....	5
1.5.4 ESTADO 3 Outras cargas adicionais	6
1.5.5 ESTADO 4 Vento.....	6
1.6 Cálculo da Estrutura de aço.....	7
1.6.1 Desenhos da passarela.....	7
1.6.2 Cálculo de corda superior da Viga principal	9
1.6.3 Cálculo de Corda Inferior da Viga principal	14
1.6.4 Cálculo da Diagonal Comprimida, no Apoio.....	19
1.6.5 Montante nos Apoios.....	23
1.6.6 Montantes.....	28
1.6.7 Transversinas	33
1.6.8 Piso de Aço	37
1.7 Aparelhos de Apoio.....	39
1.7.1 Deslocamentos devido à temperatura e à flexão.....	39
1.7.2 Escolha do Aparelho de Apoio	40
1.8 Cálculo das Fundações.....	41
1.8.1 Desenhos das Fundações	41
1.8.2 Cálculo da resistência do solo para passarela 2A e 2B.....	42
1.8.3 Cálculo da viga transversal sobre o tubulão, Passarela 2A...44	
1.8.4 Cálculo do tubulão.....	45
2 PARTE II – PASSARELA 2B.....	45

2.1	Objetivo	45
2.2	Normas usadas no cálculo.....	45
2.3	Softwares e livros Utilizados	46
2.4	Materiais Empregados.....	46
2.5	Cargas na estrutura	47
2.6	Cálculo da estrutura de aço.....	49
2.7	Aparelhos de Apoio.....	82
2.8	Cálculo das fundações.....	82

1 PARTE I – PASSARELA 2A

1.1 Objetivo

O objetivo deste volume é a apresentar a Memória do Cálculo Estrutural correspondente à Passarela 2A adjacente à Ponte 02, 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 níobio.

1.5 Cargas na estrutura

1.5.1 Peso próprio

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

1.5.2 ESTADO 1 Piso da passarela

=>200 kgf/m² =>corresponde ao peso de uma laje de concreto de 8cm de espessura; piso de aço que pesa 100 kgf/m², aproximadamente.

1.5.3 ESTADO 2 Sobrecarga na passarela

=>500 kgf/m²; conforme NBR 7187.

1.5.4 ESTADO 3 Outras cargas adicionais

=>20 kgf/m em cada viga.

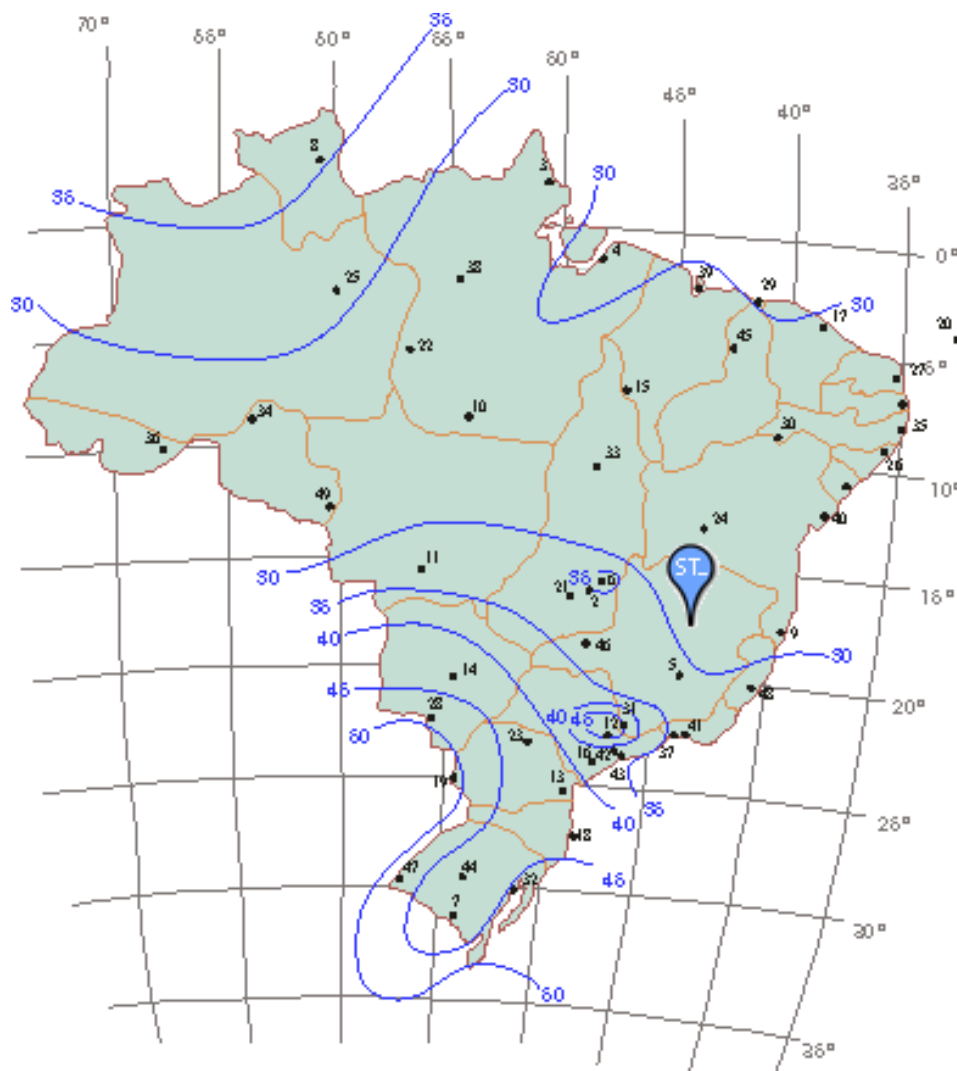
1.5.5 ESTADO 4 Vento

Conforme NBR 6123.

1.5.5.1 Ação do vento na edificação

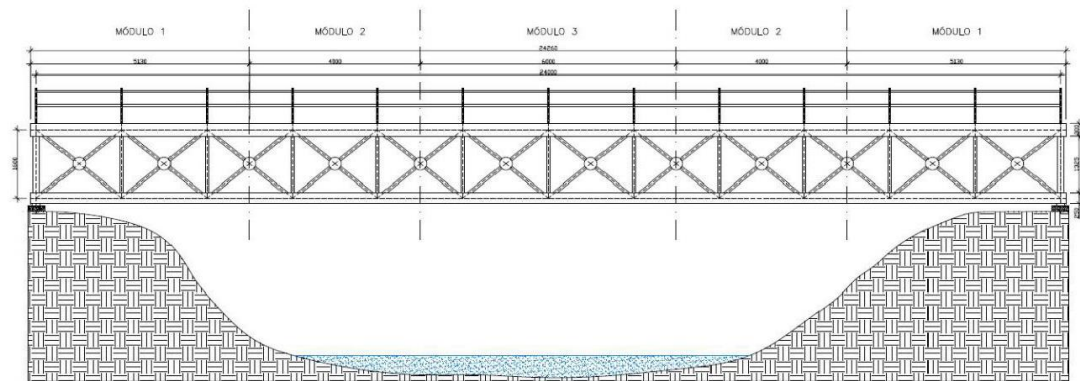
1.5.5.1.1 Determinação da pressão dinâmica do vento

1.5.5.1.1.1 Velocidade básica do vento

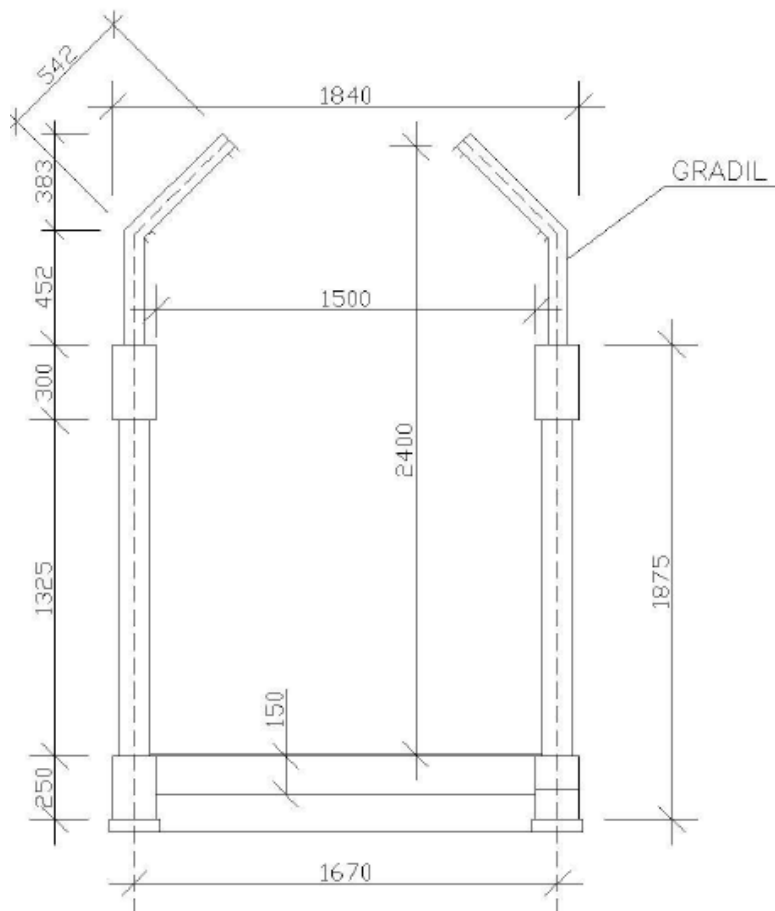


$V_0 = 30 \text{ m/s}$

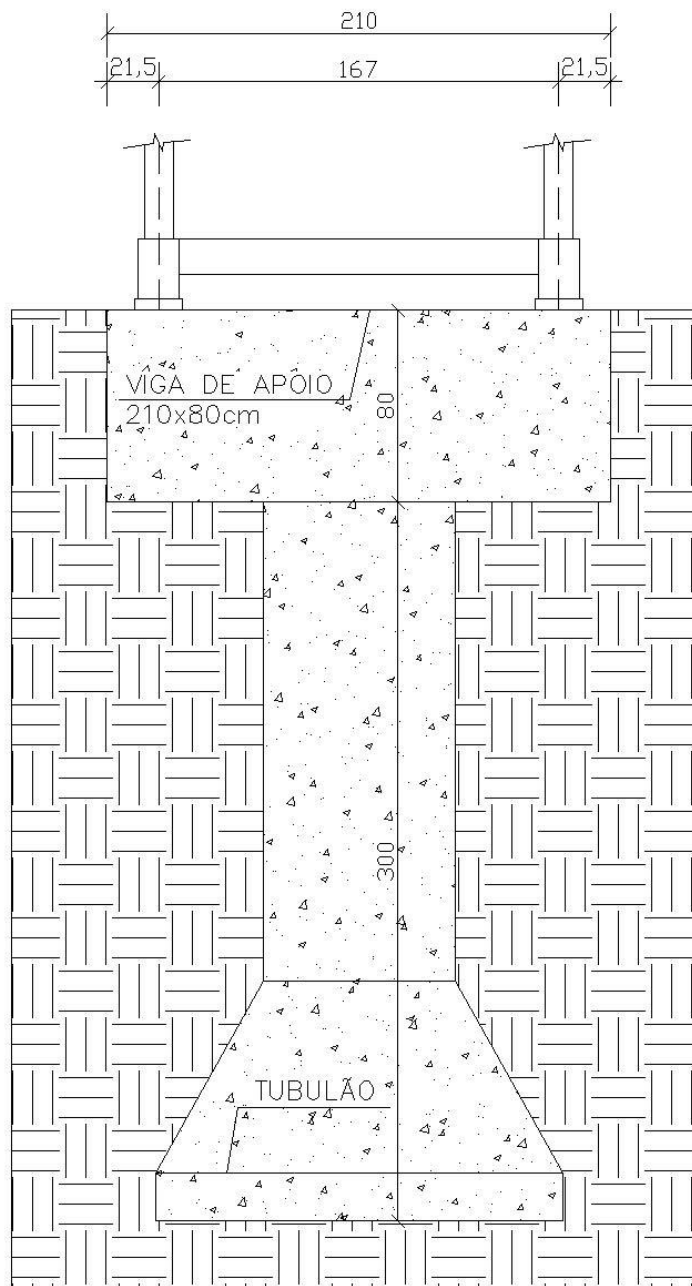
1.5.5.1.1.2 Fator topográfico S_1



VISTA LATERAL - ESTRUTURA
ESCALA 1:40



VISTA FRONTAL
ESCALA 1:40



FUNDAÇÃO – VIGA DE APOIO E TUBULÃO
ESCALA 1:20

1.6.2 Cálculo de corda superior da Viga principal

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 300 x 85 x 20 x 4.75

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

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

1.6.2.1 Cálculo da Tração

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

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

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

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

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

1.6.2.2 Cálculo da Compressão

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

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

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

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

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

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

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0,35$$

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

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

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

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

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

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,48 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.6.2.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

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

1.6.2.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

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

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

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

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

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

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

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

1.6.2.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

1.6.2.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,60$$

$$\frac{N_{oSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,60$$

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

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

1.6.3 Cálculo de Corda Inferior da Viga principal

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 250 x 85 x 20 x 4.75

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

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

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

1.6.3.1 Cálculo da Tração

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

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

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

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

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,43 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

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

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

1.6.3.2 Cálculo da Compressão

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

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

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

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

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

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

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

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

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

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

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

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

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

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

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

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

1.6.3.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

1.6.3.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = \frac{0,12}{0,12} \leq 0,6 \quad \text{então} \quad \chi_{FLT} = 1,0$$

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

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

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

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

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

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

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

$$W_{cef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = \frac{3626,66}{12,50} = 290,13 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdx} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = \frac{1,00 \cdot 290,13 \cdot 3000,00}{1,10} = 791270,77 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}$$

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

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = \frac{0,07}{1,00} < 1,00 \quad \text{OK!}$$

1.6.3.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

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

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

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

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

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

$$W_{ef} = \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = \frac{1695,62}{9,02} = 188,05 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = \frac{188,05 \cdot 3000,00}{1,10} = 512862,23 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

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

1.6.3.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

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

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

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

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

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

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

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

1.6.3.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

1.6.3.7 Equações de Interação

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

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

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,37$$

1.6.4 Cálculo da Diagonal Comprimida, no Apoio

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 75 x 40 x 15 x 3

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

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

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

1.6.4.1 Cálculo da Tração

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

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

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

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

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

1.6.4.2 Cálculo da Compressão

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

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

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

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

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

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

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

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

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

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

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

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

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

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

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

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

1.6.4.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

1.6.4.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 9,66 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 81,20 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 3,75 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 81,20 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 21,65 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{PL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 59056,04 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 7226037,05 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 20,42 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,09 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0 \\
 \chi_{FLT} &= 1,00 && \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção} \\
 \text{Cálculo de } \sigma &= \chi_{FLT} \cdot f_y = 3000,00 \text{ kgf/cm}^2 && \text{na tensão}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 9,66 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 81,20 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,00 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 3,75 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 81,20 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 21,65 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 59056,04 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT} \\
 M_{Rdx} &= 59056,04 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,04 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

1.6.4.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

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

$$I_{yef} = 81,69 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

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

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

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 81,69 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

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

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 55697,59 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

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

1.6.4.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

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

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

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

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

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

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

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

1.6.4.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

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

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

$\lambda \leq \lambda_p$ então

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

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

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

1.6.4.7 Equações de Interação

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

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

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

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

1.6.5 Montante nos Apoios

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 150 x 60 x 20 x 2.25

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

$$KxLx = 160 \text{ cm} \quad KzLz = 160 \text{ cm}$$

$$KyLy = 160 \text{ cm} \quad Lb = 160 \text{ cm}$$

1.6.5.1 Cálculo da Tração

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

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

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

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

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

1.6.5.2 Cálculo da Compressão

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,23 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

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

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

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

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 24198876,67 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 47,46 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,08 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0
 \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,58 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{x_{ef}} &= 423,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{x_{ef}} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 53,91 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 147029,11 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT} \\
 M_{Rdx} &= 147029,11 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,14 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

1.6.5.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

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

1.6.5.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

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

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

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

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

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

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

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

1.6.5.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

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

1.6.5.7 Equações de Interação

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

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

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

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

1.6.6 Montantes

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 75 x 40 x 15 x 2.25

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

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

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

1.6.6.1 Cálculo da Tração

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

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

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

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

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

1.6.6.2 Cálculo da Compressão

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.6.6.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

1.6.6.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.6.6.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

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

1.6.6.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

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

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

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

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

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

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

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

1.6.6.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

1.6.6.7 Equações de Interação

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

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

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

1.6.7 Transversinas

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 150 x 60 x 20 x 2.25

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

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

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

1.6.7.1 Cálculo da Tração

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

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

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

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

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

1.6.7.2 Cálculo da Compressão

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

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

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

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

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

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

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

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

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

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

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

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

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

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

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

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

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

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

1.6.7.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

1.6.7.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

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

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

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 11910078,53 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 47,46 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,11 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0
 \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,58 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 423,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 421,97 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 53,91 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo}
 \end{aligned}$$

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

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

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

1.6.7.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

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

1.6.7.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

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

1.6.7.6 Cálculo da Resistência ao Cortante - eixo Z

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{h}{t} = 62,67 && \text{Parâmetro de esbeltez} \\
 k_v &= 5,00 && \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}
 \end{aligned}$$

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

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

$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ 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

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,48$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,48$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,48$$

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:

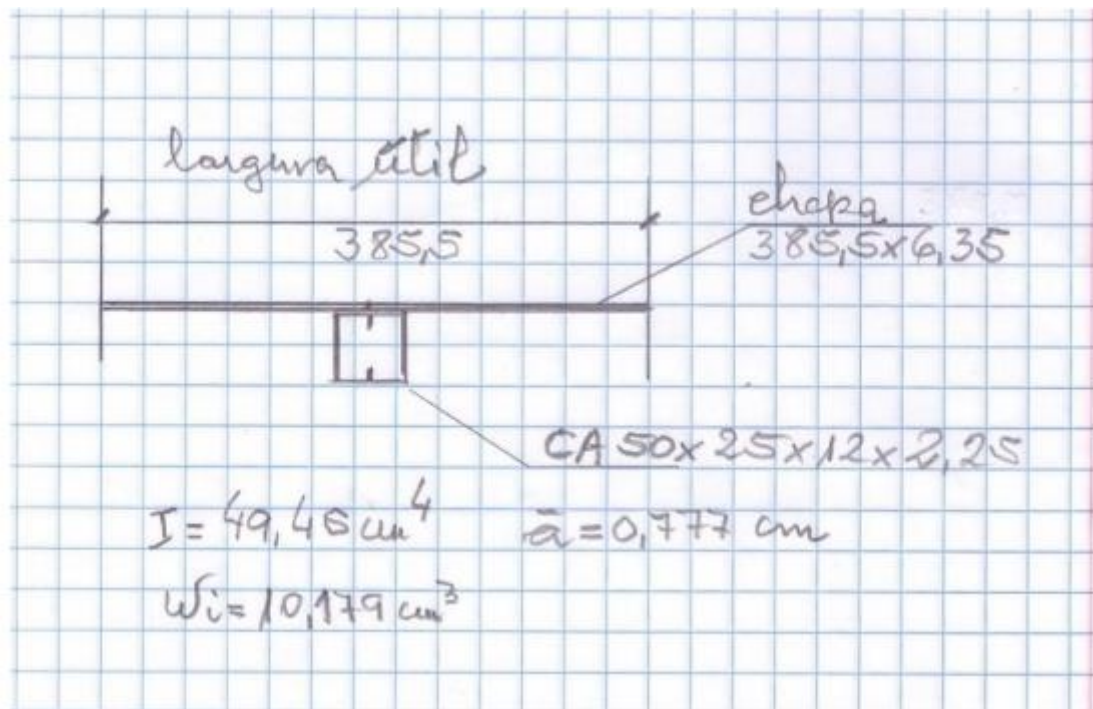
$$\Rightarrow R1 = 74 \text{ kg/m}$$

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

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

O máximo fletor majorado na viga será:

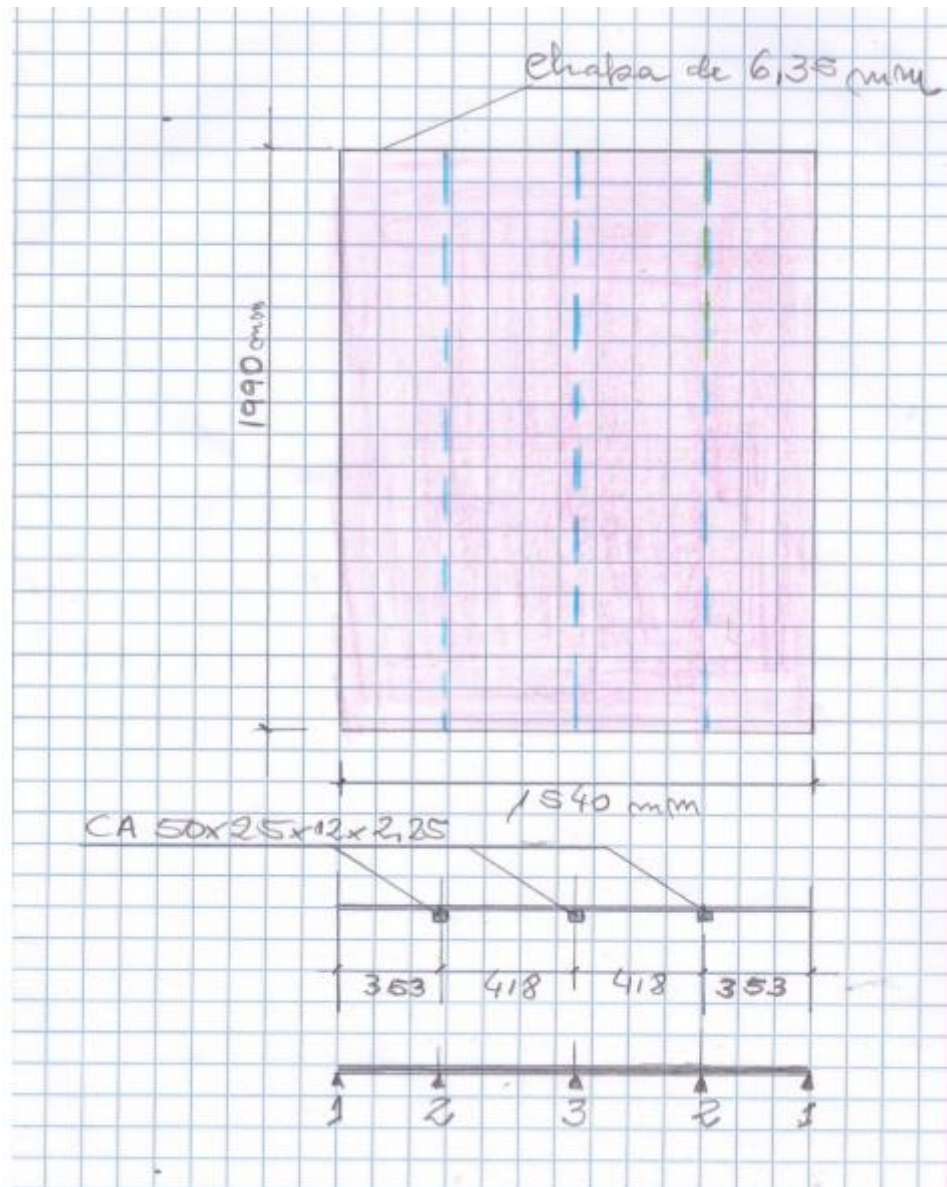
$$\Rightarrow_{\max} M_{sd} = (237 \times 1,4) \times 1,99^2 / 8 = 164,3 \text{ kgf.m} = 16,43 \text{ tf.cm}$$



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:

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

=> Deslocamento devido à flexão da viga principal:

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

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

1.7.2 Escolha do Aparelho de Apoio

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

Usando a TABELA da RUBBERFLEX, (fabricação MEPEL)

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

Resumo deste item:

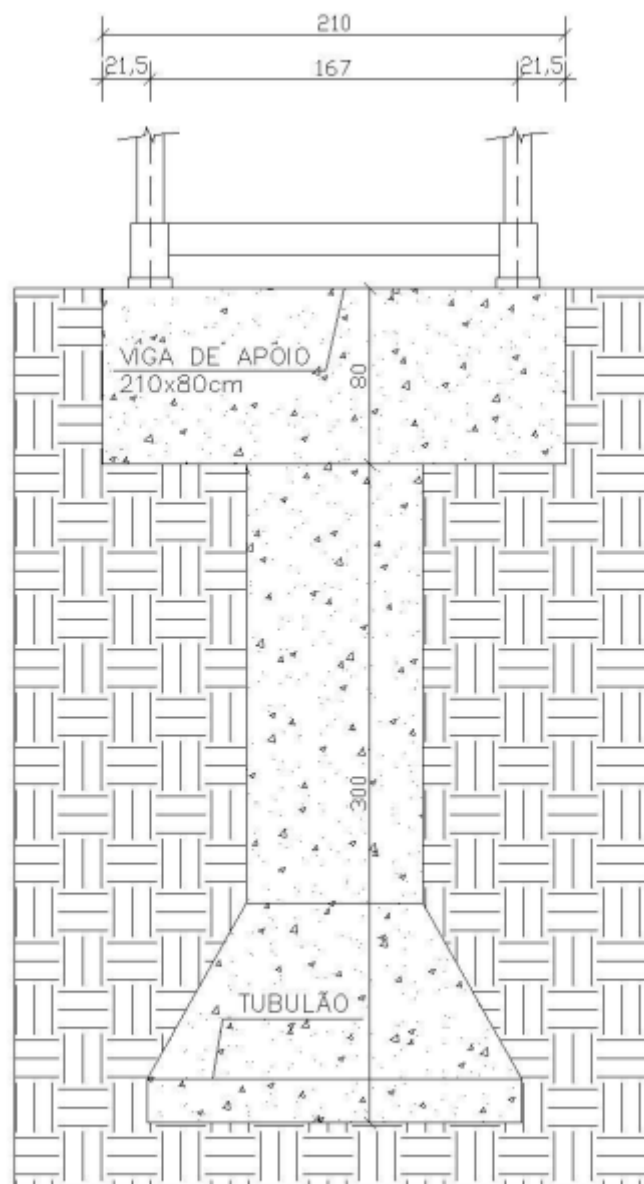
- Duas dimensões de aparelhos de apoio podem ser usadas, ou uma ou outra, dependendo da conveniência da compra:

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

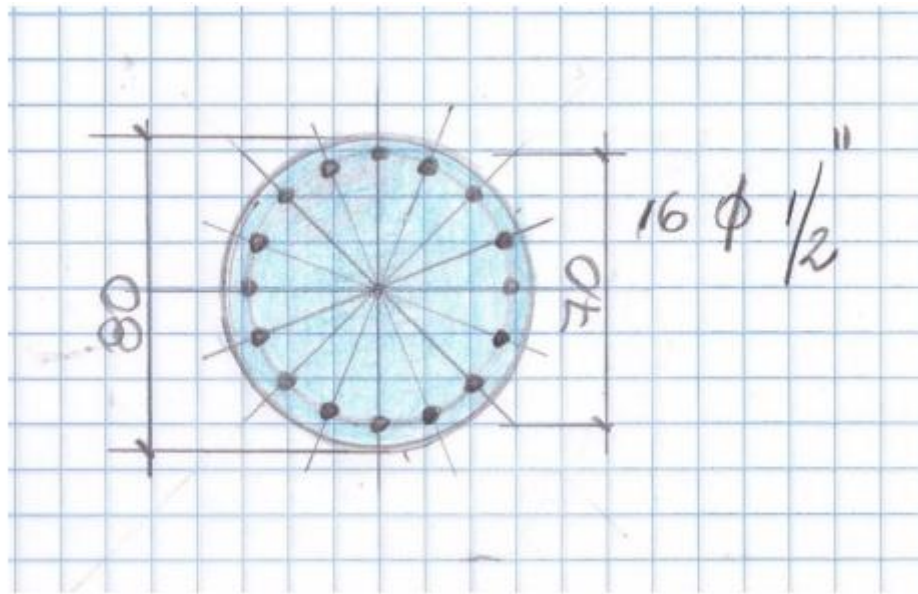
=> de 150x200mm por 28mm de espessura; deslocamento máximo de 14mm; carga de 30 tf;

1.8 Cálculo das Fundações

1.8.1 Desenhos das Fundações



FUNDAÇÃO – VIGA DE APOIO E TUBULÃO
ESCALA 1:20



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

Reações nos apoios não majoradas, para a Passarela 2A:

=>Apoios laterais => $R_1 = 2 \times 8,6$ tf.

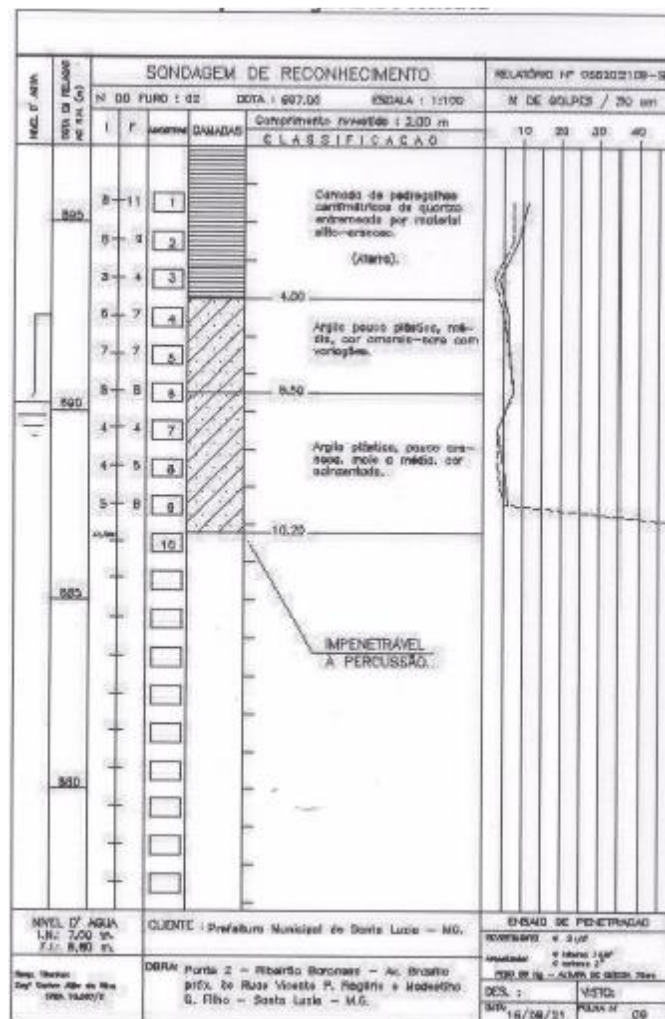
Carga no tubulão:

=> $R_{\text{tubulão}} = (8,6 \times 2) \times 1,4 + (2,1 \times 0,8 \times 0,8 \times 2,5) \times 1,4 + (2,51 + 1,14 + 2,78) \times 1,4 = 24 + 4,7 + 9,0 = 37,7$ tf

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

1.8.2 Cálculo da resistência do solo para passarela 2A e 2B

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: passarelas 12A e 2B

Local: Furo 02

Diâmetro: 170 cm

Tipo de estaca: Escavado grande diâmetro de concreto da estaca

F1 = 3,5

F2 = 7,0

Resistência da estaca: 24319 kN

Coef. Segurança: 2,0

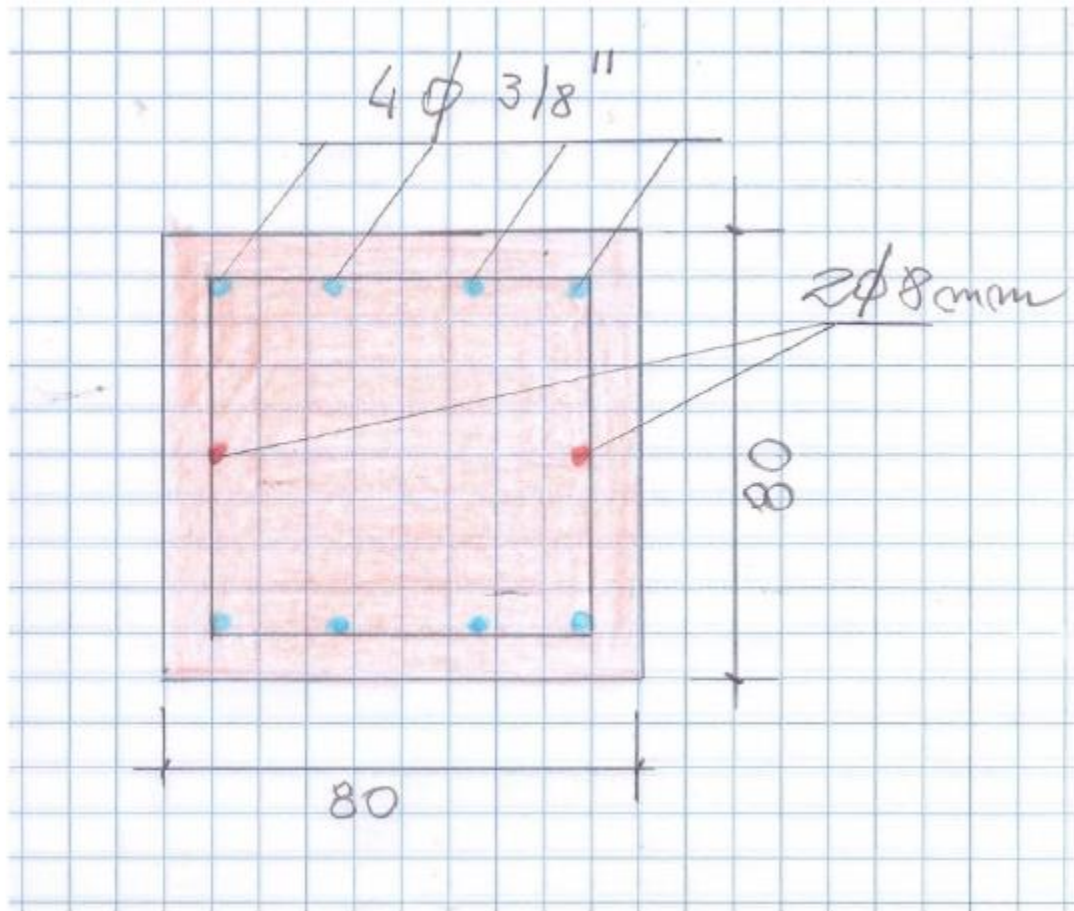
Prof. (m)	SPT	Solo	Decourt-Quaresma					Aoki-Velloso					
			K (kN/m2)	qp (kN/m2)	Qp (kN)	qs (kN/m2)	Qs (kN)	K (kN/m2)	α (%)	Qp (kN)	Qs (kN)	Qtotal (kN)	
0	-	areia argilosa	400	0	0	10	0	0	600	3,0%	0	0	0
1	8	areia argilosa	400	3200	7263	37	195	3730	600	3,0%	3113	110	3223
2	8	areia argilosa	400	3200	7263	37	392	3828	600	3,0%	3113	220	3333
3	3	silo arenoso	250	750	1702	20	488	1345	673	2,2%	1070	247	1317
4	5	silo arenoso	250	1260	2837	27	641	2119	1059	2,2%	1783	294	2077
5	7	silo arenoso	250	1760	3972	33	819	2916	1458	2,2%	2497	358	2855

Podemos ler acima que um tubulão com base de 170cm, com 3m de profundidade, é suportado por um solo que resiste a 1070 kN. Vale dizer: a resistência do solo suportando uma base de 170cm de diâmetro,

a 3m de profundidade, deverá ser $1070/2=535$ kN, ou 53,5 tf. Ou, ainda $\Rightarrow 53500/22697= 2,35$ kgf/cm² \Rightarrow ou $\Rightarrow 27/53,5=0,50 < 1,0$

Nota: há uma outra sondagem apresentada pela CARGUS que apresenta um solo com maior resistência.

1.8.3 Cálculo da viga transversal sobre o tubulão, Passarela 2A



Do desenho no item 2A.8.1 \Rightarrow

$R=8,6 \times 1,4=12$ tf \Rightarrow Momento fletor máximo na viga sobre o tubulão \Rightarrow

$\max M_{sd} = 12 \times (167 \times 0,5 - 30) + 1,4 \times 0,016 \times 0,5 \times (53,5)^2 = 642 + 32 = 674$ tf.cm

Armadura=> $MR=4 \times 3,031 \times 70 = 848$ tf.cm > 674
 $tf.cm > 674 / 848 = 0,80 < 1,0$

Estribos=> $MaxV = 8,6 \times 1,4 + 1,4 \times 0,016 \times 53,5 = 13,24$ tf
 $13,24 / (2,136 \times 2) = 3,1$ ferros cada 70cm => **4,43 ferros de 8mm por metro ou um estribo de 8mm cada 20cm.**

1.8.4 Cálculo do tubulão

$maxNsd = 37,7$ tf => Força normal resistente do tubulão, com concreto
 $Fck = 20$ Mpa => $NR = (802 \times 0,25 \times \pi) \times 0,20 \times 0,85 / 1,4 + 16 \times 5,383 = 696$ tf > 37,7 tf
=> $37,7 / 696 = 0,055 < 1,0$

Nota: o tubulão está com a armadura mínima exigida pela Norma, ou seja, $(0,004 \times A) = (0,25 \times 3,1415 \times 802) \times 0,004 = 20,1$ cm² =>
=> **16 ferros de ½" => $16 \times 1,266 = 20,25$ cm² > 20,1 cm²**

Estribos => 1 ferro de 8mm cada 20cm

2 PARTE II – PASSARELA 2B

2.1 Objetivo

O objetivo deste volume é a apresentar a Memória do Cálculo Estrutural correspondente à Passarela 2B adjacente à Ponte 02, 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.

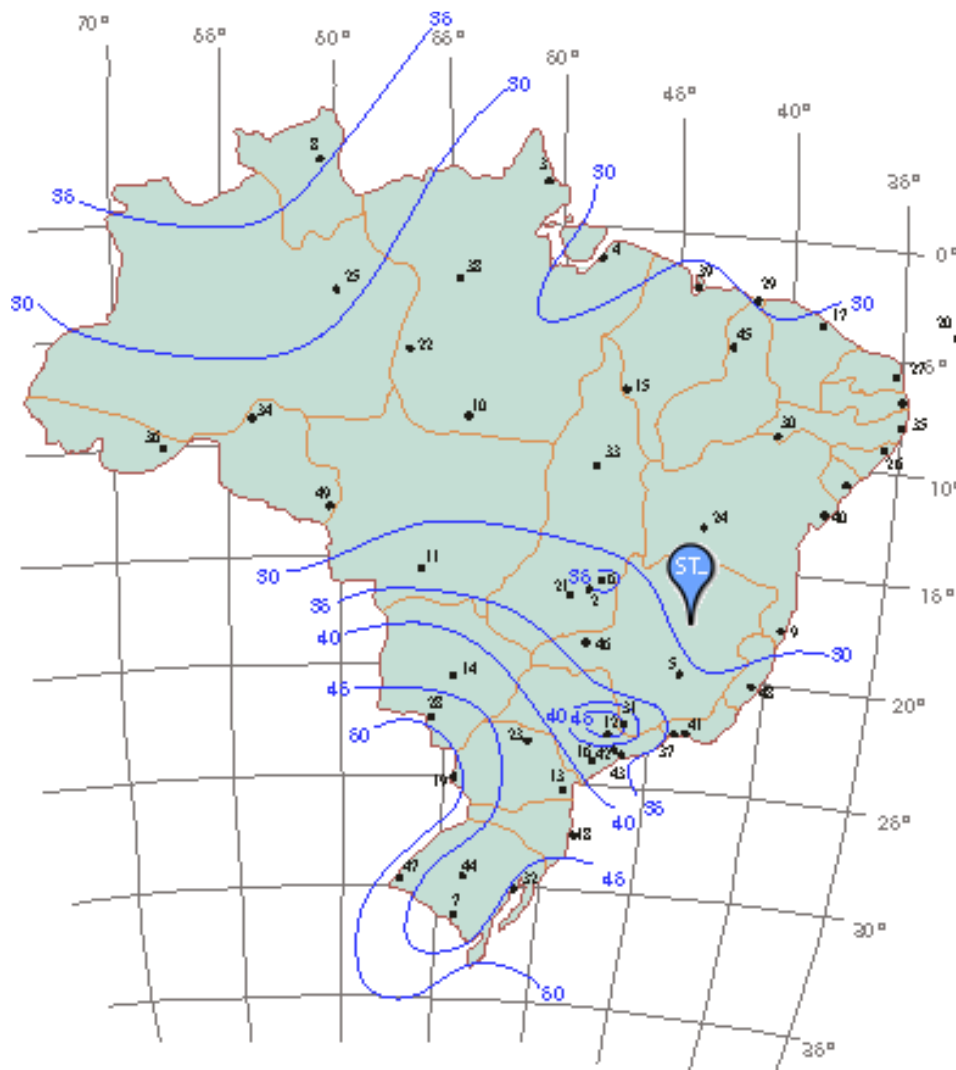
2.1.5 -ESTADO 4 – Vento

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

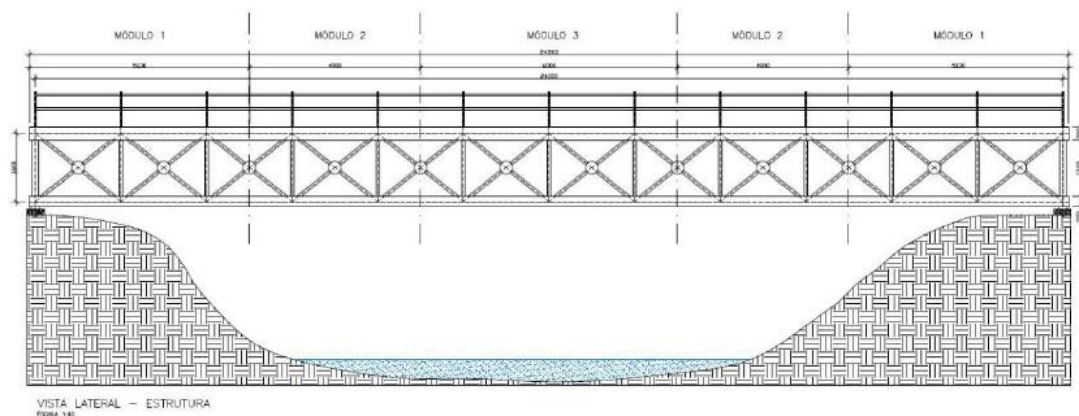
$$q=0,613.V_k^2 = 37,24\text{ kgf/m}^2$$

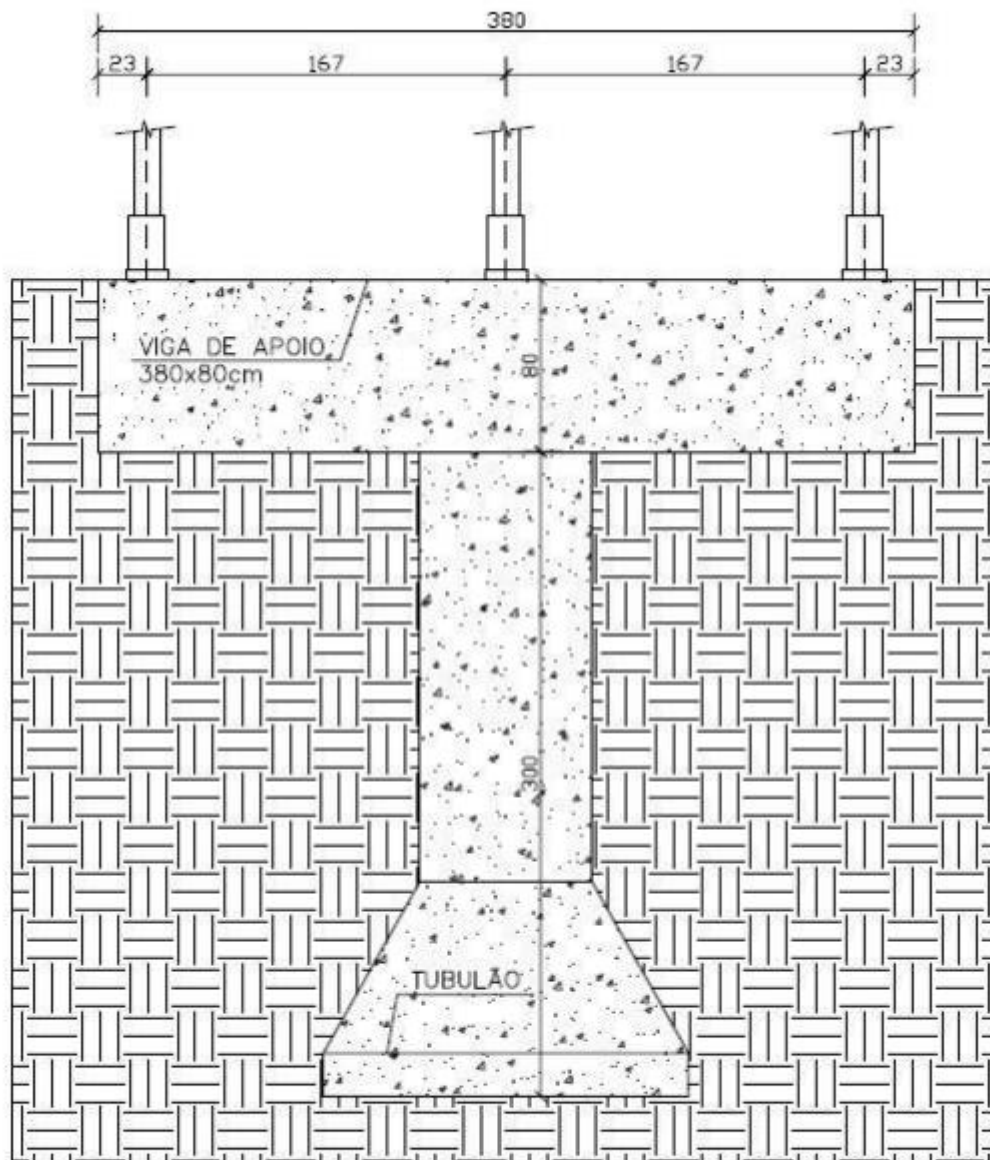
=>Vento perpendicular à lateral da passarela =>coeficientes de pressão e sucção => $(0,7+0,5) \times 37,24=44,7\text{ kgf/m}^2$

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.

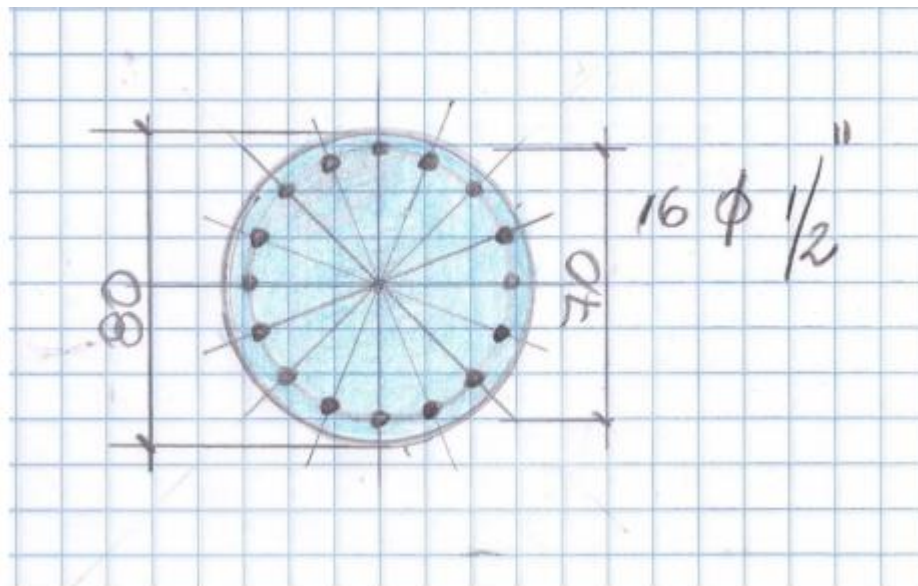
2.6 Cálculo da estrutura de aço

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

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

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

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

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

2.1.7.2 Cálculo de Compressão

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,75 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,87$$

$$\frac{N_{cSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,87$$

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

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

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 4.75

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

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

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

2.1.8.1 Cálculo da tração

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

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

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

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

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,64 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2.1.8.2 Cálculo da Compressão

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

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

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

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

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

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

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

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

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

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

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

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

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

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

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

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

2.1.8.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

2.1.8.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

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

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

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 48954319,33 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 222,08 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,12 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0
 \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

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

2.1.8.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

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

2.1.8.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

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

2.1.8.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

2.1.8.7 Equações de Interação

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

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,74$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,53$$

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

$KxLx = 128,06\text{cm}$ $KzLz = 128,06\text{cm}$

$KyLy = 128,06\text{cm}$ $Lb = 128,06\text{cm}$

2.1.9.1 Cálculo da tração

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

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

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

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

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

2.1.9.2 Cálculo da Compressão

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

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

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

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

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

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

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

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

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

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

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

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 5754672,04 \text{ kgf.cm} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1.9.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

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

$$I_{yef} = 81,69 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

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

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

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 81,69 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

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

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 55697,59 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

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

2.1.9.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

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

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

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

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

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

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

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

2.1.9.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

2.1.9.7 Equações de Interação

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

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

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

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

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 17 x 2,25

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

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

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

2.1.10.1 Cálculo da Tração

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

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = \frac{35100,00}{1,10} \text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = \frac{31200,00}{1,65} \text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 31200,00 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

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

2.1.10.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 343208,35 \text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 219583,51 \text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 10039473,55 \text{ kgf}$$

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

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 343208,35 \text{ kgf}$$

$$N_e = 219583,51 \text{ kgf}$$

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

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

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

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 9,75 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 22636,56 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

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

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 9,52 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 23805,22 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 22636,56 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,26 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2.1.10.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

2.6.5.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,31 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 414,69 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 413,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 52,76 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{PL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 143883,03 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 21356419,52 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 47,46 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,08 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0 \\
 \chi_{FLT} &= 1,00 && \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,31 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 414,69 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 413,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 52,76 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 143883,03 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{Rdx} &= 143883,03 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,21 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

2.1.10.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 11,75 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{yef} &= 238,36 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\
 d &= 0,56 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 X_{G \text{ final}} &= X_G + d = 6,56 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 234,69 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{X_{G \text{ final}}} = 35,78 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdy} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 97578,67 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,11 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

2.1.10.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

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

2.1.10.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0,03 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2.1.10.7 Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,57$$

$$\frac{N_{cSd}}{N_{oRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,57$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,31$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,31$$

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

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

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

2.1.11.1 Cálculo da Tração

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

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

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

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

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{tsd}}{N_{tRd}} = 0,09 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2.1.11.2 Cálculo da Compressão

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

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

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

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

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

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

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

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

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

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

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

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

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

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

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

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

2.1.11.3 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Y

2.6.6.3.1 Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1.11.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1.11.5 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Y

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

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

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

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

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

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

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

2.1.11.6 Cálculo da Resistência ao Cortante – eixo Z

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

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

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

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

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

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

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

2.1.11.7 Equações de Interação

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

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,23$$

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

2.1.12 Transversinas

Conforme NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010

Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 150 x 60 x 17 x 2,25

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

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

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = \frac{35100,00\text{ kgf}}{1,10} = 31909,09\text{ kgf} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = \frac{31200,00\text{ kgf}}{1,65} = 19515,15\text{ kgf} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 19515,15\text{ kgf} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = \frac{0,00}{19515,15} = 0,00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2.1.12.2 Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = \frac{332729,32\text{ kgf}}{(1,0 \cdot 162,5)^2} = 332729,32\text{ kgf}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = \frac{212879,07\text{ kgf}}{(1,0 \cdot 162,5)^2} = 212879,07\text{ kgf}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 10039473,55 \text{ kgf}$$

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

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 332729,32 \text{ kgf}$$

$$N_e = 212879,07 \text{ kgf}$$

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

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

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

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 9,75 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 22600,60 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

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

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 9,52 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 23805,22 \text{ kgf} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 22600,60 \text{ kgf} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

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

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

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,31 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 414,69 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 413,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 52,76 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{PL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 143883,03 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 12440565,92 \text{ kgf.cm} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\
 W_c &= 47,46 \text{ cm}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\
 \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,11 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0
 \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned}
 A_{ef} &= 12,31 \text{ cm}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\
 I_{xef} &= 414,69 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\
 d &= 0,33 \text{ cm} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\
 y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 7,83 \text{ cm} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\
 I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 413,32 \text{ cm}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\
 W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 52,76 \text{ cm}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\
 M_{Rdx}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 143883,03 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT} \\
 M_{Rdx} &= 143883,03 \text{ kgf.cm} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y} \\
 \frac{SOLIC.}{RESIST.} &= \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0,64 < 1,00 && \text{OK!}
 \end{aligned}$$

2.1.12.4 Cálculo da Resistência à Flexão – eixo Z

$$A_{ef} = 11,75 \text{ cm}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 238,36 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

$$d = 0,56 \text{ cm} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$x_{G \text{ final}} = x_G + d = 6,56 \text{ cm} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 234,69 \text{ cm}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 35,78 \text{ cm}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rdy} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 97578,67 \text{ kgf.cm} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,07 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2.1.12.5 Cálculo da Resistência ao Cortante - eixo Y

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

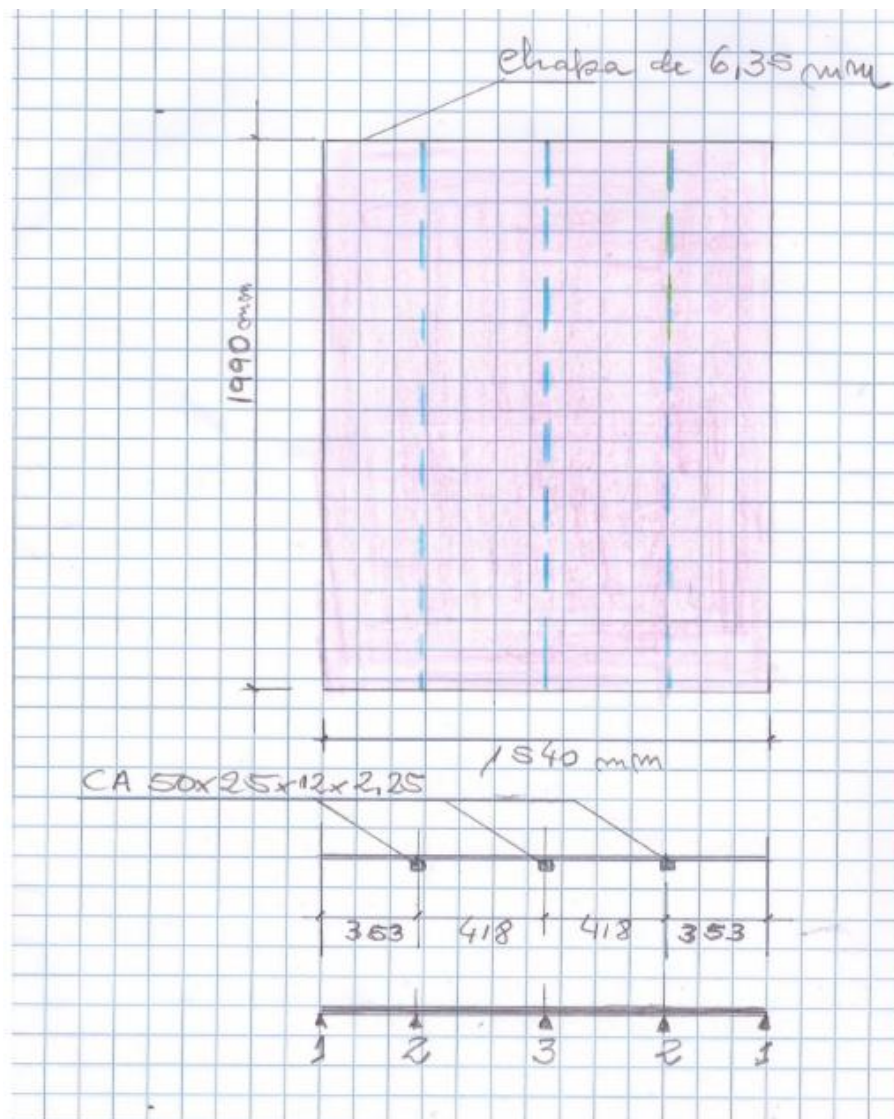
2.1.12.7 Equações de Interação

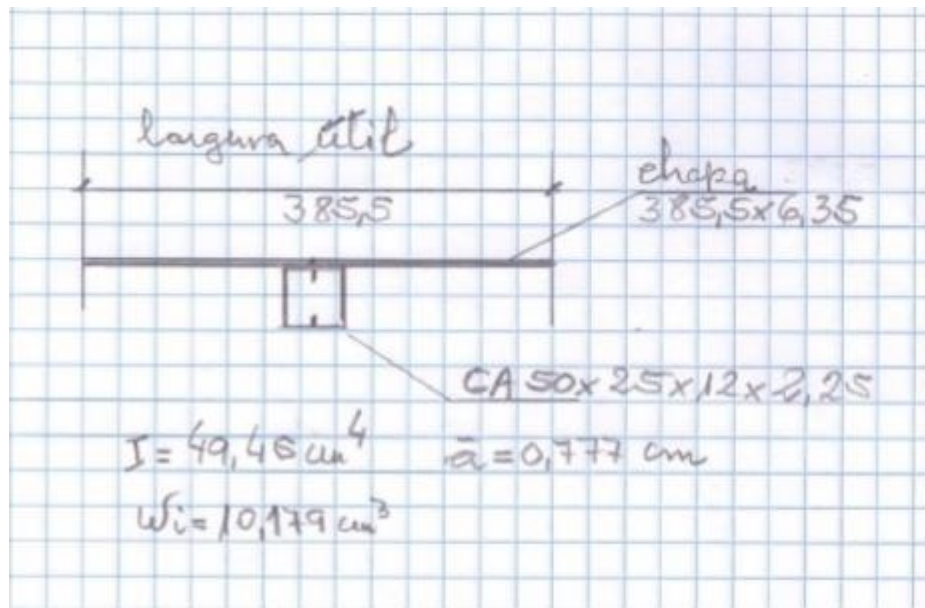
$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0,71$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,71$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0,71$$

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:

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

=>deslocamento devido à flexão da viga principal:

$$\Rightarrow dx = 10,43 / 2 = +5,3 \text{ mm}$$

Resumo dos deslocamentos => $dx = (5,1 + 5,3) = + 10,4 \text{ mm}; dx = - 5,1 \text{ mm}$

2.1.13.1.2 Escolha do Aparelho de Apoio

Máxima carga vertical=> $N_c = 16,9 \times 1,4 = 23,7 \text{ tf}$ (com majoração). <30 tf

Usando a TABELA da RUBBERFLEX, (fabricação MEPEL)

Resumo dos deslocamentos => $dx = 10,4 \text{ mm}; dx = - 5,1 \text{ mm}$

Resumo deste item:

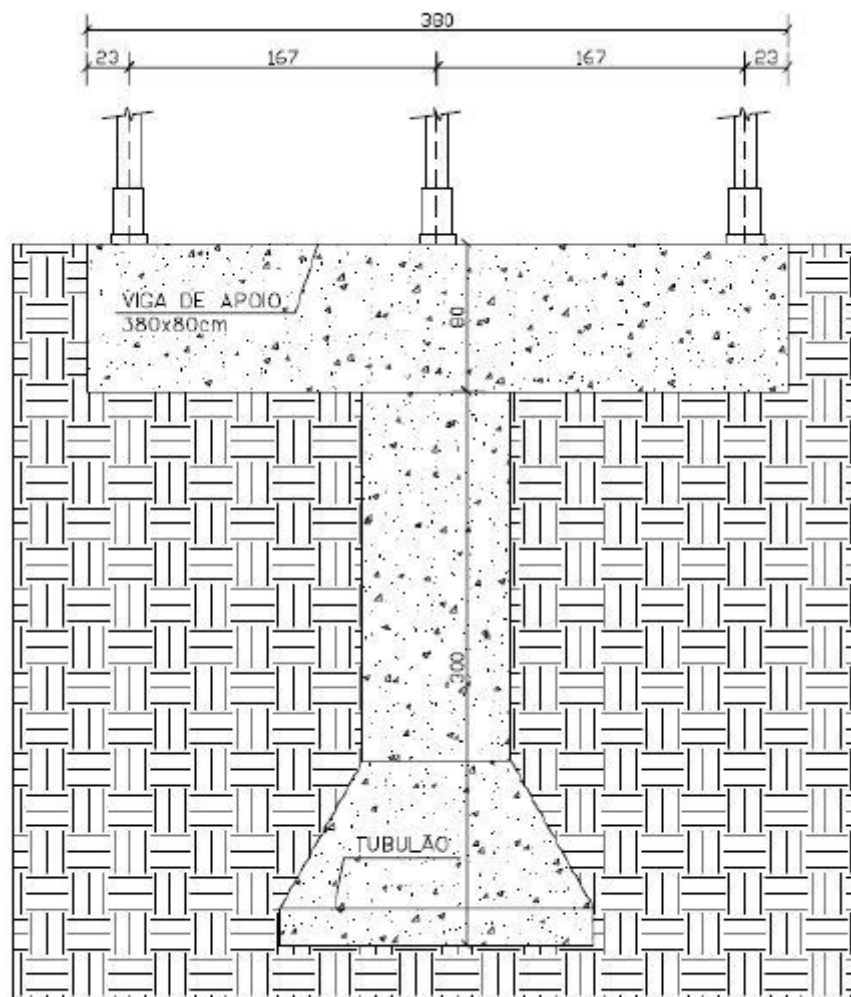
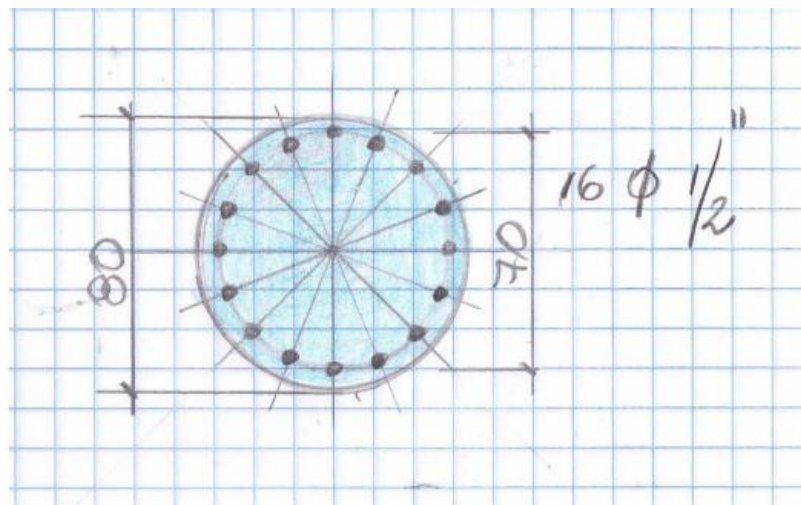
-Aparelho de apoio escolhido:

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

2.8 Cálculo das fundações

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 => $R_1 = 9,6 \text{ tf}$

=> Apoio central => $R_2 = 16,9 \text{ tf}$

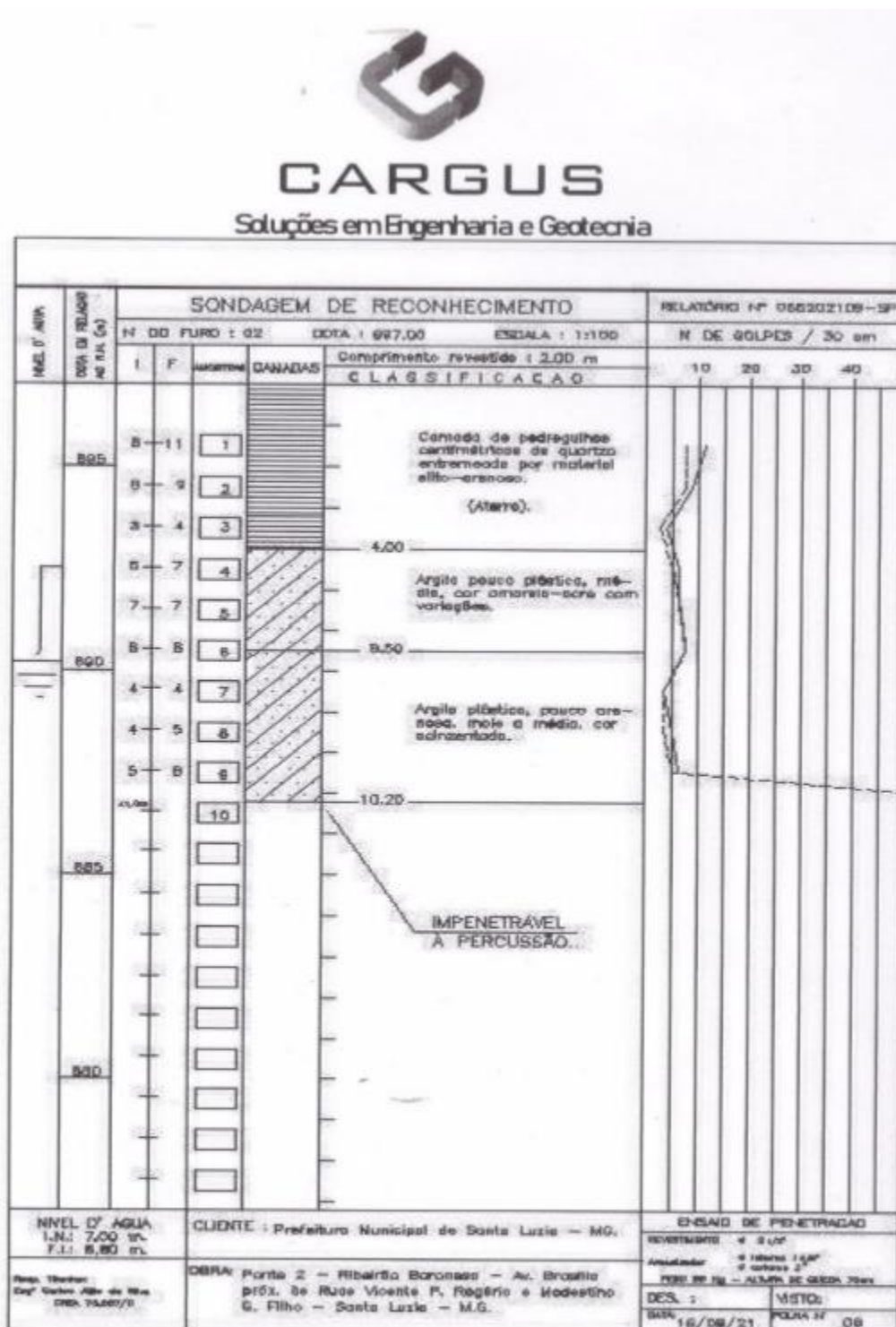
Carga no tubulão:

=> $R_{\text{tubulão}} = (9,6 \times 2 + 16,9) \times 1,4 + (3,8 \times 0,8 \times 0,8 \times 2,5) \times 1,4 + (2,51 + 1,14 + 2,78) \times 1,4 = 50,54 + 8,51 + 9,0 = 68 \text{ tf}$

=> Carga para dimensionamento do solo (sem majoração) => 48,6 tf

2.1.13.1.4 Cálculo da resistência do solo para passarelas 2ª e 2B

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: passarelas : 2A e 2B

Local: Furo 02

Diâmetro: 170 cm

Resistência da estaca: 24319 kN

Coef. Segurança: 2.0

Tipo de estaca: Escavada grande diâmetro de concreto da estaca:

F1 = 3,5

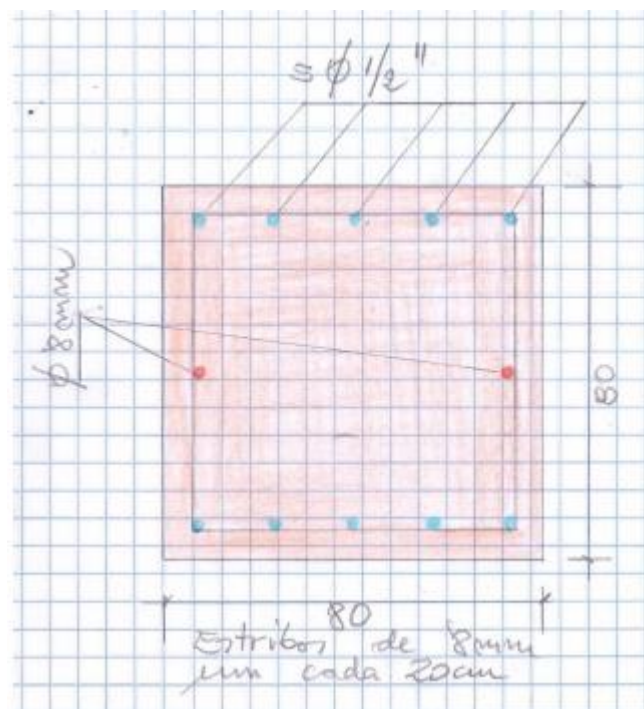
F2 = 7,0

Prof. (m)	SPT	Solo	Décourt-Quaresma						Aoki-Velloso					
			K (kN/m2)	qp (kN/m2)	Qp (kN)	qs (kN/m2)	Qs (kN)	Qtotal (kN)	Q/CS (kN)	K (kN/m2)	α (%)	Qp (kN)	Qa (kN)	Qtotal (kN)
0	-	areia argilosa	400	0	0	10	0	0	0	600	3,0%	0	0	0
1	8	areia argilosa	400	3200	7263	37	196	3730	1865	600	3,0%	3113	110	3223
2	8	areia argilosa	400	3200	7263	37	392	3828	1914	600	3,0%	3113	220	3333
3	3	silte arenoso	250	750	1702	20	498	1345	673	550	2,2%	1070	247	1317
4	5	silte arenoso	250	1250	2837	27	641	2119	1059	550	2,2%	1783	294	2077
5	7	silte arenoso	250	1750	3972	33	819	2916	1458	550	2,2%	2497	358	2855

Podemos ler acima que um tubulão com base de 170cm, com 3m de profundidade, é suportado por um solo que resiste a 1070 kN. Vale dizer: a resistência do solo suportando uma base de 170cm de diâmetro, a 3m de profundidade, deverá ser $1070/2=535$ kN, ou 53,5 tf. Ou, ainda= $\Rightarrow 53500/22697= 2,35$ kgf/cm² >ou $\Rightarrow 48,6/53,5=0,90<1,0$.

Nota: há uma outra sondagem apresentada pela CARGUS que apresenta um solo com maior resistência.

2.1.13.1.5 Cálculo da viga transversal sobre o tubulão



Do desenho no item 2:

$R=8,6 \times 1,4=12 \text{ tf} \Rightarrow$ Momento fletor máximo na viga sobre o tubulão:

$\max M_{sd} = 12 \times (167-30) + 1,4 \times 0,016 \times 0,5 \times (137,5)^2 = 1644 + 212 = 1856 \text{ tf.cm}$

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

Estribos $\Rightarrow \max V = 7,9 \times 1,4 + 1,4 \times 0,016 \times 137,5 = 15,12 \text{ tf}$

$15,2 / (2,136 \times 2) = 3,54$ ferros cada 70cm \Rightarrow **5,056 ferros de 8mm por metro ou um estribo de 8mm cada 18cm.**

2.1.13.1.6 Cálculo do tubulão

$\max N_{sd} = 1,4 \times 48,6 = 68 \text{ tf} \Rightarrow$ Força normal resistente do tubulão, com concreto $F_{cK} = 20 \text{ Mpa} \Rightarrow N_R = (80^2 \times 0,25 \times \pi) \times 0,20 \times 0,85 / 1,4 + 16 \times 5,383 = 696 \text{ tf} > 59,51 \text{ tf}$
 $\Rightarrow 68 / 696 = 0,098 < 1,0$

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 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

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

19 de novembro de 2021.