



MEMORIAL DE CÁLCULO

Reforma do Centro Esportivo Gumercendo Luiz Pinto Ponteiro

PREFEITURA MUNICIPAL DE EXTREMA – MG

Projeto estrutural de aço

JUNHO 2026

	MEMORIAL DE CÁLCULO		ARQUIVO: CAL-ESTM-PE-EXT-CEEX1054-042026-R00				
	CONTRATANTE: PREFEITURA MUNICIPAL DE EXTREMA						REV. 00
	PROGRAMA: CENTRO ESPORTIVO GUMERCINDO LUIZ PINTO PONTEIRO						Pág:02/42
ÍNDICE DE REVISÕES							
REV.	DESCRIÇÃO E/OU FOLHAS ATINGIDAS						
00	EMISSÃO INICIAL						
	REV.00	REV.01	REV.02	REV.03	REV.04	REV.05	REV.06
DATA	06/2026						
EXECUÇÃO	IF						
VERIFICAÇÃO	MC						
APROVAÇÃO	MC						

Sumário

1	APRESENTAÇÃO	4
2	IMPLANTAÇÃO	4
3	NORMAS	4
4	DIMENSIONAMENTO	5
5	ESTRUTURAS METÁLICAS	5
1.1.	5.1..... COBERTURA PRINCIPAL	
	5	
1.2.	5.2..... COBERTURA DO VESTIÁRIO	
	28	
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO PROJETO	42

1 APRESENTAÇÃO

Este Memorial de Cálculo integra o Projeto do Centro Esportivo Gumerindo Luiz Pinto Ponteiro Monteiro, localizado no município de Extrema/MG, apresentando os critérios, parâmetros e procedimentos adotados nos dimensionamentos necessários à definição das soluções técnicas propostas.

O documento complementa o projeto executivo e os desenhos técnicos, servindo como base para verificação e validação dos resultados obtidos, em conformidade com as normas vigentes da ABNT e demais referências aplicáveis.

2 IMPLANTAÇÃO

O projeto de estrutura metálica é composto pela cobertura principal, com área de projeção de 954,032 m², e pela cobertura do vestiário, com área de projeção de 118,579 m². As estruturas foram concebidas e implantadas em níveis distintos, conforme definido nos desenhos de projeto e nas condições arquitetônicas.

3 NORMAS

As normas vigentes utilizadas para a concepção do projeto estrutural são as seguintes:

ISO 12944:2018 Pintura de estrutura metálica;

NBR 8681:2004 - Ações e segurança nas estruturas – Procedimento;

NBR 8800:2024 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios;

NBR 6123:2023 – Forças devidas ao vento em edificações;

NBR 6120:2019 – Ações para cálculo de estruturas de edificações;

NBR 14513:2022 - Telhas de aço revestido de seção trapezoidal - Requisitos;

NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio;

NBR 15253/2014 - Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações — Requisitos gerais;

NBR 16239/2013 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares;

NBR 16325-2/2014 - Proteção contra quedas de altura parte 2: Dispositivos de ancoragem tipo C;

NR 18 – Condições e meio ambiente de trabalho na indústria da construção;

NR 35 – Trabalho em altura;

4 DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento dos elementos estruturais, foram utilizados os softwares da Stabile como mCalc3D, st_vento, St_terças e mCalcLig_6.0.

A estrutura metálica da edificação corresponde a:

- Cobertura Principal
- Cobertura Vestiário

5 ESTRUTURAS METÁLICAS

5.1 COBERTURA PRINCIPAL

A estrutura da cobertura principal foi analisada como um sistema contraventado entre os pontos especificados em projeto. Para o dimensionamento frente às ações do vento, foi considerada a condição mais desfavorável de abertura da edificação, contemplando os efeitos de sucção externa e sucção interna, analisados separadamente. O modelo estrutural adotado considera o detalhamento arquitetônico da edificação, no qual as paredes laterais superiores apresentam aberturas permanentes.

5.1.1 CARREGAMENTOS

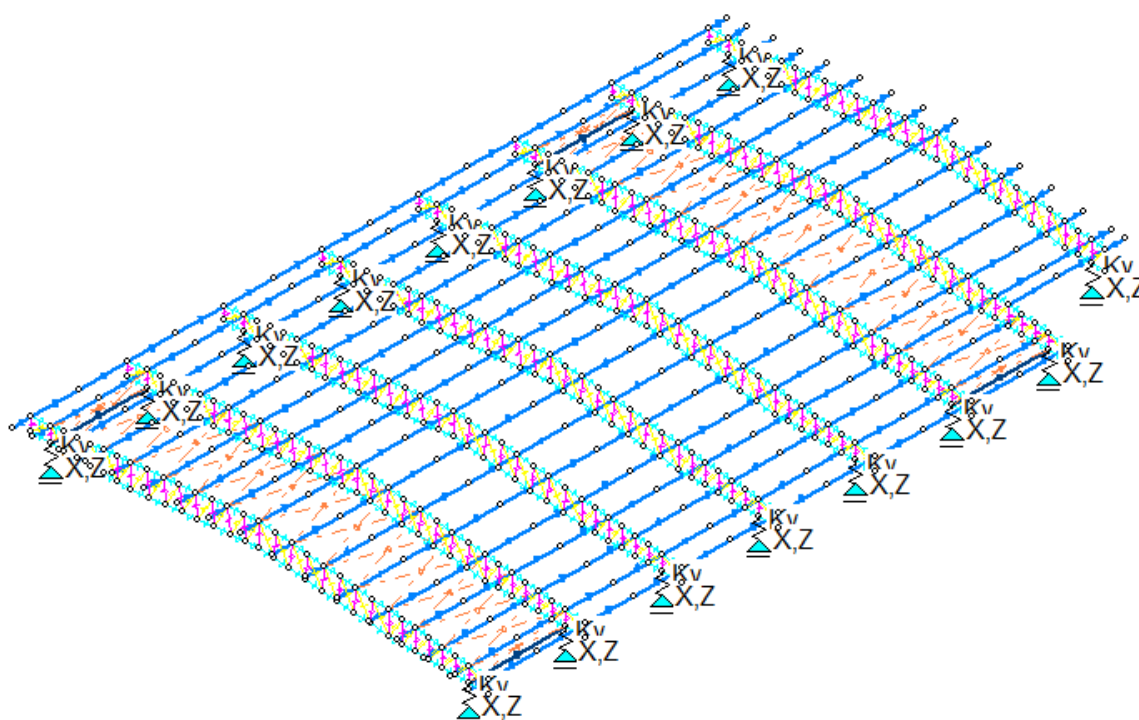
As cargas consideradas foram as seguintes conforme a NBR 6120/2019 e a NBR 6123/2023:

- CARREGAMENTOS CONSIDERADOS

- Permanentes:
 - Telha termoacústica
 - 0,15 kN/m²;
 - Sobrecarga: (Manutenção, Uso e ocupação):
 - 0,25 kN/m²;
- Carga de Vento:
 - 0,66 kN/m²

5.1.2 GEOMETRIA

Figura 1 - Cobertura Principal - Geometria básica



Fonte: YKS

5.1.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Material	Designação	E (MPa)	v	G (MPa)	fy (MPa)	αt (m/m·°C)	γ (kN/m ³)
Aço estrutural	A-36	200000	0,3	76923,08	250	0,000012	77,01

Notação:

E: Módulo de elasticidade

v: Módulo de Poisson

G: Módulo de corte

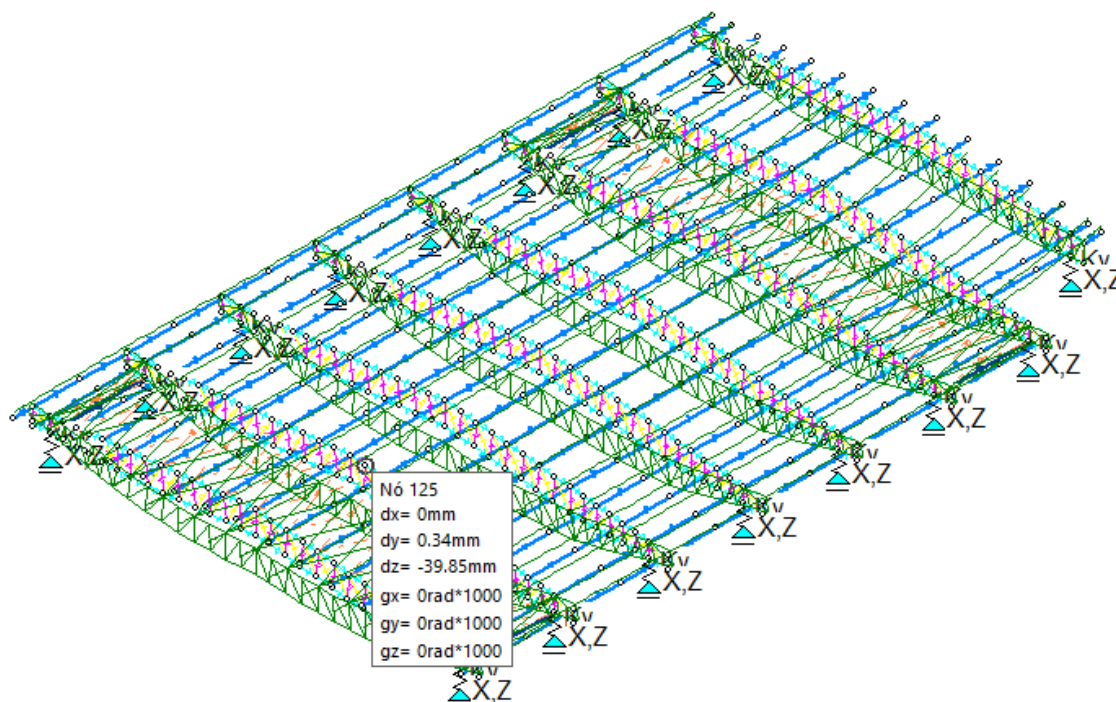
f_y : Limite elástico
 α_t : Coeficiente de dilatação
 γ : Peso específico

5.1.4 DEFORMADAS

Deslocamentos obtidos para a combinação PP + CP + 0,60SC + 0,30V0CPI-0,45 (sucção interna atuante).

- PP = peso próprio
- CP = cargas permanentes
- SC = sobrecarga
- V0CPI-0,45 = vento com coeficiente de pressão interna igual a -0,45, condição de sucção interna.

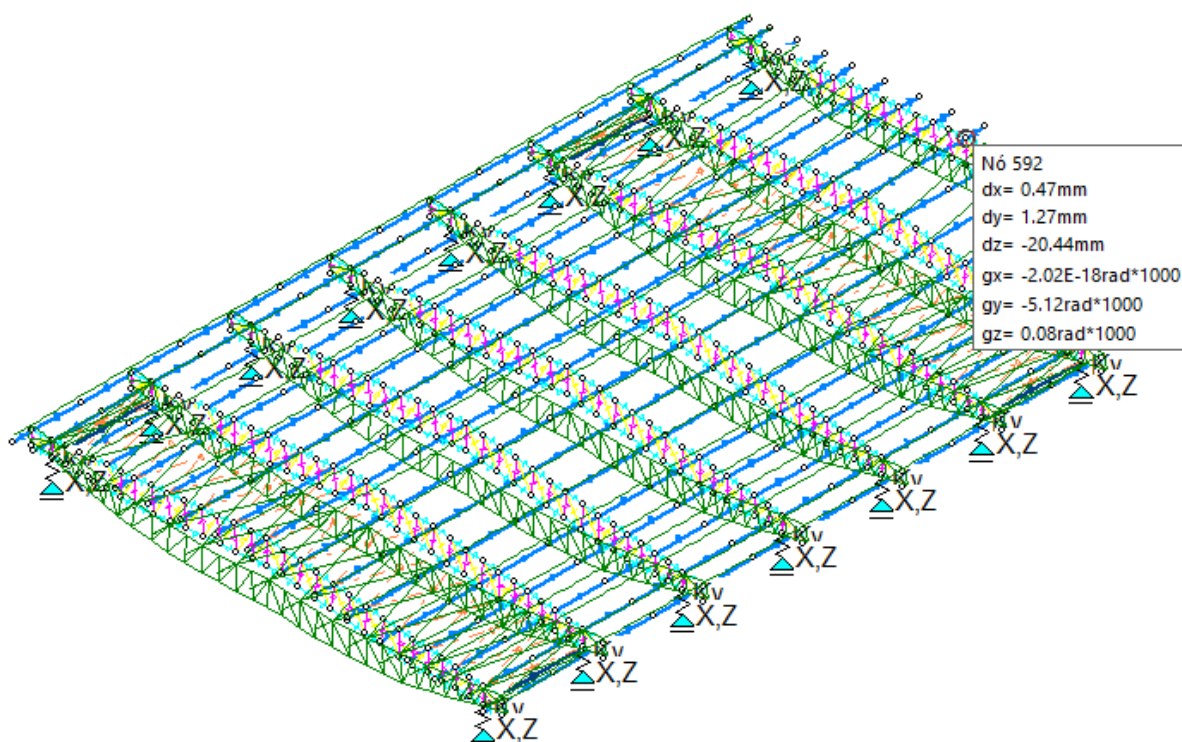
Figura 2 – Cobertura Principal - Deformada máxima em treliça típica



Fonte: YKS

Para a verificação do deslocamento máximo da treliça típica, foi considerado o vão livre entre apoios de 22,27 m. Adotando-se o limite de deformação de $L/250$, obtém-se um deslocamento máximo admissível de aproximadamente 89 mm (8,9 cm). A análise estrutural indicou deslocamento máximo da ordem de 40 mm (4,0 cm), valor inferior ao limite estabelecido. Dessa forma, a treliça atende aos critérios de deformação para a condição analisada.

Figura 3 – Cobertura Principal - Deformada máxima na treliça do eixo 8-8



Fonte: YKS

Para a verificação do deslocamento máximo da treliça do eixo 8-8, foi considerado o vão livre entre apoios de 19,31 m. Adotando-se o limite de deformação de $L/250$, obtém-se um deslocamento máximo admissível de aproximadamente 77 mm (7,7 cm). A análise estrutural indicou deslocamento máximo de 20,44 mm (2,04 cm), valor inferior ao limite estabelecido. Dessa forma, a treliça analisada atende aos critérios de deformação para a condição analisada.

5.1.5 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS

5.1.5.1 BANZOS

Perfil U (Formado a frio)

Perfil: [200 x 80 x 3.75

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

$L_x = 0.86 \text{ m}$ $L_z = 0.86 \text{ m}$
 $L_y = 1.72 \text{ m}$ $L_b = 0.86 \text{ m}$

1. Cálculo da Tração

$C_T = 1.00$ Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 294.03 \text{ kN} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 313.64 \text{ kN} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 294.03 \text{ kN} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.71 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2. Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 5161.75 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 2104.34 \text{ kN}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 1734.30 \text{ kN}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 0.77$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 1573.04 \text{ kN}$$

$$N_e = 1573.04 \text{ kN}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0.45$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0.92$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 202.03 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 213.97 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 202.03 \text{ kN} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0.99 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

3. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Y

3.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned} A_{ef} &= 0.00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{xef} &= 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\ d &= 0.01 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 0.11 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\ W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\ M_{Rd}^{PL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 14.98 \text{ kN.m} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} M_e &= C_b \cdot r_o \sqrt{N_{ey} \cdot N_{et}} = 177.13 \text{ kN.m} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\ W_c &= 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\ \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0.33 && \lambda_o \leq 0,6 \quad \text{então} \quad \chi_{FLT} = 1,0 \end{aligned}$$

$$\chi_{FLT} = 1.00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } W_{cef} \text{ na tensão} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 250000.00 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned} A_{ef} &= 0.00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{xef} &= 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\ d &= 0.01 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 0.11 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\ W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\ M_{xRd}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 14.98 \text{ kN.m} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT-} \end{aligned}$$

$$M_{xRd} = 14.98 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

4. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Z

4.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned} A_{ef} &= 0.00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{yef} &= 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\ d &= 0.00 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ x_{G \text{ final}} &= x_G + d = 0.06 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\ W_{ef} &= \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\ M_{yRd} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 2.96 \text{ kN.m} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} C_s &= -1.00 \\ C_m &= 1.00 \\ j &= 0.11 \text{ m} && \text{Parâmetro da seção transversal conforme Anexo E - NBR 14762:2010} \\ M_e &= \frac{C_s \cdot N_{ey}}{C_m} \cdot \left[j + C_s \cdot \sqrt{j^2 + r_0^2} \cdot \left(\frac{N_{et}}{N_{ey}} \right) \right] = 63.91 \text{ kN.m} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\ W_c &= 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\ \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0.23 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0 \\ \chi_{FLT} &= 1.00 && \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção} \\ \text{Cálculo de } W_{cef} &&& \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 250000.00 \text{ kN/m}^2 \\ A_{ef} &= 0.00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{yef} &= 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\ d &= 0.00 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ x_{G \text{ final}} &= x_G + d = 0.06 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\ W_{ef} &= \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\ M_{yRd}^{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 2.96 \text{ kN.m} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT} \end{aligned}$$

$$M_{yRd} = 2.96 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

5. Cálculo da Resistência ao cortante - eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 19.33 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5.00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68.31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88.54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

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

$$V_{Rdy} = 74.15 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

6. Cálculo da Resistência ao cortante - eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 49.33 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5.00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68.31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88.54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

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

$$V_{Rdz} = 94.60 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

7. Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0.99$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.71$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.71$$

5.1.5.2 DIAGONAIS

Perfil Dupla Cantoneira opostas pelas mesas (Formado a frio)

Perfil: LL 60 x 2.65 x 190

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

$L_x = 1,11 \text{ m}$ $L_z = 1,11 \text{ m}$
 $L_y = 1,11 \text{ m}$ $L_b = 1,11 \text{ m}$

1. Cálculo da Tração

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

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 138,16 \text{ kN} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 147,37 \text{ kN} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 138,16 \text{ kN} \quad \text{Resistência à tração}$$

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

2. Cálculo da Compressão

"TRAVEJAMENTO Z" Propriedades do perfil simples e resistência multiplicada por 2.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} = 176,44 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 176,44 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + G \cdot J \right] = 48,79 \text{ kN}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 0,62$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{ez} \cdot H}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] = 43,38 \text{ kN}$$

$$N_e = 43,38 \text{ kN}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 1,32$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0,48$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 0,00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 27,46 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 0,00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,10} = 48.87 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 27.46 \text{ kN} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão do perfil simples}$$

$$N_{cRd} = 54.91 \text{ kN} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão do perfil composto}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0.94 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

3. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Y

3.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0.00 \text{ m} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 0.02 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rd}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 1.18 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

4. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Z

4.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0.00 \text{ m} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 0.02 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rd}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 1.18 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

5. Cálculo da Resistência ao cortante

$$\lambda = \frac{h}{t} = 20.64 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5.34 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 70.59 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 91.50 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

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

$$V_{Rdy} = 39.53 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$V_{Rdz} = 39.53 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

6. Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0.94$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.33$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.33$$

5.1.5.3 MONTANTES

Perfil Dupla Cantoneira opostas pelas mesas (Formado a frio)

Perfil: LL 60 x 2.65 x 190

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

$L_x = 0.78 \text{ m}$ $L_z = 0.78 \text{ m}$

$L_y = 0.78 \text{ m}$ $L_b = 0.78 \text{ m}$

1. Cálculo da Tração

$$C_T = 1.00 \quad \text{Coeficiente de redução da área líquida}$$

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 138.16 \text{ kN} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 147.37 \text{ kN} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 138.16 \text{ kN} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.41 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2. Cálculo da Compressão

"TRAJEAMENTO Z" Propriedades do perfil simples e resistência multiplicada por 2.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} = 357.32 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 357.32 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + G \cdot J \right] = 48.79 \text{ kN}$$

$$H = 1 - \frac{x_o^2}{r_o^2} = 0.62$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{ez} \cdot H}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] = 46.17 \text{ kN}$$

$$N_e = 46.17 \text{ kN}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 1.28$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 0.50$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 28.32 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,10} = 48.87 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 28.32 \text{ kN} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão do perfil simples}$$

$$N_{cRd} = 56.64 \text{ kN} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão do perfil composto}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0.86 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

3. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Y

3.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0.00 \text{ m} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 0.02 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{Y_{G\text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rd}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 1.18 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

4. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Z

4.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0.00 \text{ m} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$Y_{G\text{ final}} = Y_G + d = 0.02 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{Y_{G\text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rd}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 1.18 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

5. Cálculo da Resistência ao cortante

$$\lambda = \frac{h}{t} = 20.64 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5.34 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 70.59 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 91.50 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

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

$$V_{Rdy} = 39.53 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$V_{Rdz} = 39.53 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

6. Equações de Interação

$$\frac{N_{csd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ysd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zsd}}{M_{zRd}} = 0.86$$

$$\frac{M_{ysd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zsd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tsd}}{N_{tRd}} = 0.41$$

$$\frac{M_{ysd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zsd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tsd}}{N_{tRd}} = 0.41$$

5.1.5.4 TERÇAS

Perfil U Enrijecido (Formado a frio)

Perfil: UENR 127 x 50 x 17 x 2.25

Aço: ASTM A36 $f_y = 250$ MPa $f_u = 400$ MPa

COMPRIMENTOS DA BARRA

$L_x = 2.58$ m $L_z = 2.58$ m

$L_y = 0.69$ m $L_b = 2.58$ m

1. Cálculo da Tração

$C_T = 1.00$ Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1.10} = 124.26 \text{ kN} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1.65} = 132.55 \text{ kN} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 124.26 \text{ kN} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tsd}}{N_{tRd}} = 0.00 < 1.00 \quad \text{OK!}$$

2. Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 5535.88 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 54.79 \text{ kN}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 64.85 \text{ kN}$$

$$H = 1 - \frac{x_o^2}{r_o^2} = 0.66$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 64.59 \text{ kN}$$

$$N_e = 54.79 \text{ kN}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 1.58$$

$$\lambda_0 > 1,5 \text{ então } \chi = \frac{0,877}{(\lambda_0)^2} = 0,35$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 0,00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 40,04 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 0,00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 102,50 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 40,04 \text{ kN} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,12 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

3. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Y

3.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 0,00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 0,00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

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

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 0,06 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0,00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 0,00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rd}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 4,78 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

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

$$M_e = C_b \cdot r_o \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot N_{et}} = 6,76 \text{ kN.m} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 0,00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,88 \quad 0,6 < \lambda_o < 1,336 \quad \text{então } \chi_{FLT} = 1,11 \cdot (1 - 0,278 \cdot \lambda_o^2)$$

$$\chi_{FLT} = 0,87 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 217523,58 \text{ kN/m}^2$$

$$A_{ef} = 0,00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 0,00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

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

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 0,06 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0,00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{cef} = \frac{I_G}{Y_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{xRd} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 4.16 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT-}$$

$$M_{xRd} = 4.16 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0.35 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

4. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Z

4.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned} A_{ef} &= 0.00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{yef} &= 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\ d &= 0.00 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ X_{G \text{ final}} &= X_G + d = 0.03 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\ W_{ef} &= \frac{I_G}{X_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\ M_{yRd} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 1.23 \text{ kN.m} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} C_s &= -1.00 \\ C_m &= 0.56 \\ j &= 0.07 \text{ m} && \text{Parâmetro da seção transversal conforme Anexo E - NBR 14762:2010} \\ M_e &= \frac{C_s \cdot N_{ey}}{C_m} \cdot \left[j + C_s \cdot \sqrt{j^2 + r_0^2 \cdot \left(\frac{N_{et}}{N_{ey}} \right)} \right] = 3.48 \text{ kN.m} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\ W_c &= 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\ \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0.62 && \text{então } \chi_{FLT} = 1,11 \cdot (1 - 0,278 \cdot \lambda_o^2) \\ &&& 0,6 < \lambda_o < 1,336 \end{aligned}$$

$$\chi_{FLT} = 0.99 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } W_{cef} \text{ na tensão } \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 247474.20 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned} A_{ef} &= 0.00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{yef} &= 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\ d &= 0.00 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ X_{G \text{ final}} &= X_G + d = 0.03 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \end{aligned}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{\chi_{G \text{ final}}} = \frac{0.00 \text{ m}^3}{\text{Módulo elástico efetivo}}$$

$$M_{yRd} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = \frac{1.22 \text{ kN.m}}{\text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT}}$$

$$M_{yRd} = 1.22 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = \frac{0.00}{1.00} < 1,00 \quad \text{OK!}$$

5. Cálculo da Resistência ao cortante - eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 18.22 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5.00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68.31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88.54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

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

$$V_{Rdy} = 25.16 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = \frac{0.00}{1.00} < 1,00 \quad \text{OK!}$$

6. Cálculo da Resistência ao cortante - eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 52.44 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5.00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68.31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88.54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

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

$$V_{Rdz} = 36.20 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = \frac{0.08}{1.00} < 1,00 \quad \text{OK!}$$

7. Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0.47$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.35$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.35$$

5.1.5.5 MÃOS-FRANCESAS

Perfil Cantoneira (Formado a frio)

Perfil: LFF 50 x 2.65

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

$L_x = 0.9 \text{ m}$ $L_z = 0.9 \text{ m}$

$L_y = 0.9 \text{ m}$ $L_b = 0.9 \text{ m}$

1. Cálculo da Tração

$C_T = 1.00$ Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1.10} = 57.04 \text{ kN} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1.65} = 60.84 \text{ kN} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 57.04 \text{ kN} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.00 < 1.00 \quad \text{OK!}$$

2. Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 152.87 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 152.87 \text{ kN}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 58.79 \text{ kN}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 0.62$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 49.62 \text{ kN}$$

$$N_e = 49.62 \text{ kN}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 1.12$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_0)^2 = 0,59$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 0,00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 29,45 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 0,00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 42,63 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 29,45 \text{ kN} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0,17 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

3. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Y

$$A_{ef} = 0,00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 0,00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

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

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 0,04 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0,00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 0,00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rd}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 0,40 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

$$M_{yRd} = M_{zRd} = M_{Rd}^{PL}$$

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

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

4. Cálculo da Resistência ao cortante

$$\lambda = \frac{h}{t} = 16,87 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5,34 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 70,59 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 91.50 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

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

$$V_{Rdy} = 16.15 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$V_{Rdz} = 16.15 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

5. Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0.25$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.08$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.08$$

5.1.5.6 TIRANTES

Perfil Ferro redondo

Perfil: RED 12.7

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

$L_x = 0.01 \text{ m}$ $L_z = 0.01 \text{ m}$

$L_y = 0.01 \text{ m}$ $L_b = 0.01 \text{ m}$

1. Cálculo da Tração

$$C_T = 1.00 \quad \text{Coeficiente de redução da área líquida}$$

$$A_n = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área líquida da seção transversal}$$

$$A_e = C_T \cdot A_n = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área líquida efetiva da seção transversal}$$

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 28.79 \text{ kN} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd} = 28.79 \text{ kN} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.18 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2. Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_y^2} = 25206.61 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_z^2} = 25206.61 \text{ kN}$$

$$N_e = 25206.61 \text{ kN}$$

$$N_{pl} = A \cdot f_y = 31.67 \text{ kN}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_e}} = 0.04$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 1.00$$

$$A_e = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_e \cdot f_y}{1,10} = 28.78 \text{ kN}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

5.1.5.7 BARRAS COMPRIMIDAS DO CONTRAVENTAMENTO LATERAL

Perfil Box (Formado a frio)

Perfil: BOX 80 x 40 x 2.25

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

COMPRIMENTOS DA BARRA

$L_x = 5.16 \text{ m}$ $L_z = 5.16 \text{ m}$

$L_y = 5.16 \text{ m}$ $L_b = 5.16 \text{ m}$

1. Cálculo da Tração

$C_T = 1.00$ Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 113.52 \text{ kN} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 121.09 \text{ kN} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 113.52 \text{ kN} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2. Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 29.87 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 10.23 \text{ kN}$$

$$N_e = 10.23 \text{ kN}$$

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

$$\lambda_0 > 1,5 \text{ então } \chi = \frac{3,49}{(\lambda_0)^2} = \frac{0,877}{0,07}$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 0,00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = \frac{7,47 \text{ kN}}{7,47 \text{ kN}} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 0,00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = \frac{104,06 \text{ kN}}{104,06 \text{ kN}} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 7,47 \text{ kN} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = \frac{0,00}{7,47} < 1,00 \quad \text{OK!}$$

3. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Y

3.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 0,00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 0,00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

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

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 0,04 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0,00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = \frac{0,00 \text{ m}^4}{0,04 \text{ m}} = 0,00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rd}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = \frac{2,29 \text{ kN.m}}{2,29 \text{ kN.m}} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

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

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 18,53 \text{ kN.m} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 0,00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = \frac{0,31}{0,31} \quad \lambda_0 \leq 0,6 \quad \text{então } \chi_{FLT} = 1,0$$

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

$$\text{Cálculo de } W_{cef} \text{ na tensão } \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 250000,00 \text{ kN/m}^2$$

$$A_{ef} = 0,00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 0,00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0.00 \text{ m} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 0.04 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{\text{xef}} - A_{\text{ef}} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{\text{cef}} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{xRd}^{\text{FLT}} = \frac{\chi_{\text{FLT}} \cdot W_{\text{cef}} \cdot f_y}{1,10} = 2.29 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT-}$$

$$M_{xRd} = 2.29 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0.07 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

4. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Z

$$A_{\text{ef}} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{\text{yef}} = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

$$d = 0.00 \text{ m} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$x_{G \text{ final}} = x_G + d = 0.02 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{\text{yef}} - A_{\text{ef}} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{\text{ef}} = \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{yRd} = \frac{W_{\text{ef}} \cdot f_y}{1,10} = 1.57 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

5. Cálculo da Resistência ao cortante - eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 13.78 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5.00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68.31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88.54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

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

$$V_{Rdy} = 19.02 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

6. Cálculo da Resistência ao cortante - eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 31.56 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5.00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1.08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68.31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1.40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88.54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então}$$

$$V_{Rd} = \frac{0.6 \cdot h \cdot t \cdot f_y}{1.10}$$

$$V_{Rdz} = 43.57 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0.00 < 1.00 \quad \text{OK!}$$

7. Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0.07$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.07$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.07$$

5.2 COBERTURA DO VESTIÁRIO

Para o dimensionamento da estrutura metálica do vestiário, foi considerada a extensão total da edificação, incluindo a região da caixa d'água implantada em nível mais elevado. Para as ações de vento, adotou-se a condição mais desfavorável de carregamento atuante sobre a estrutura. O sistema estrutural foi concebido e analisado como uma estrutura apertada, garantindo a estabilidade global e a adequada distribuição dos esforços solicitantes.

5.2.1 CARREGAMENTOS

As cargas consideradas foram as seguintes conforme a NBR 6120/2019 e a NBR 6123/2023:

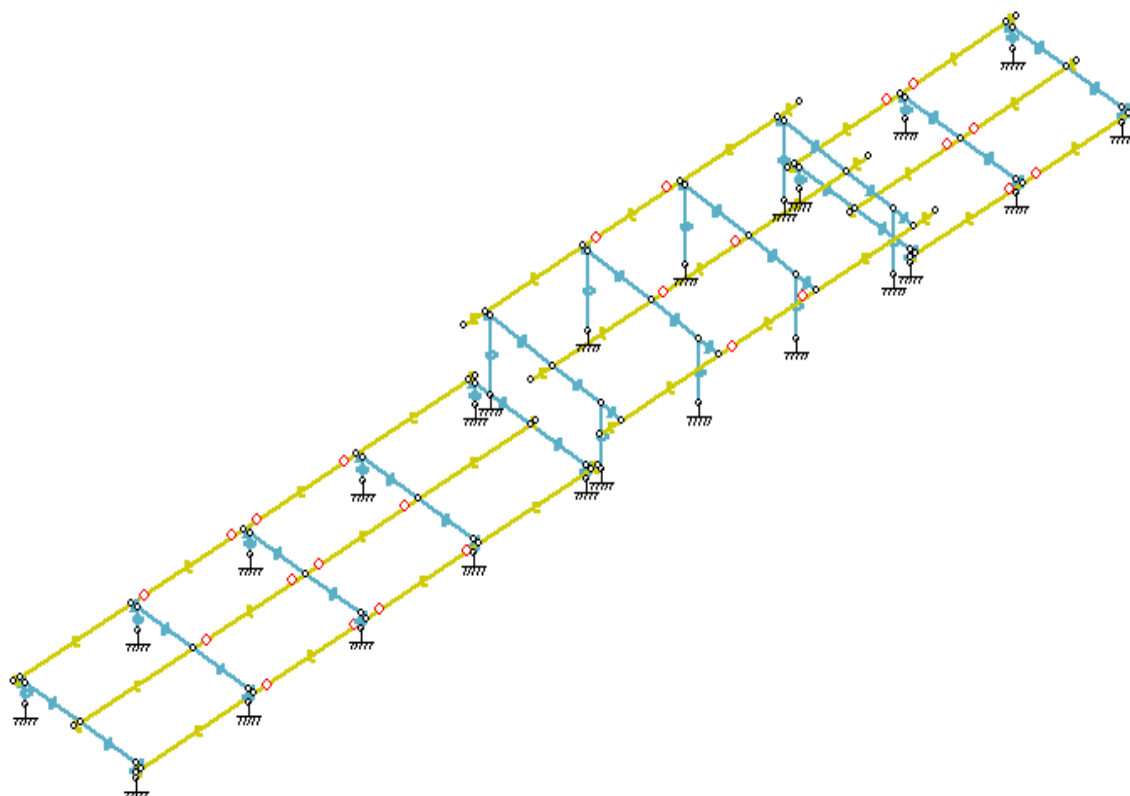
- CARREGAMENTOS CONSIDERADOS

- Permanentes:
- Telha TP-40

- 0,06 kN/m²;
- Sobrecarga: (Manutenção, Uso e ocupação):
 - 0,25 kN/m²;
- Carga de Vento:
 - 0,50 kN/m²

5.2.2 GEOMETRIA

Figura 4 - : Cobertura vestiário - Geometria básica



Fonte: YKS

5.2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Material	Designação	E (MPa)	ν	G (MPa)	f_y (MPa)	α_t (m/m·°C)	γ (kN/m³)
Aço estrutural	A-36	200000	0,3	76923,08	250	0,000012	77,01

Notação:

E: Módulo de elasticidade

ν : Módulo de Poisson

G: Módulo de corte

f_y : Limite elástico

α_t : Coeficiente de dilatação

γ : Peso específico

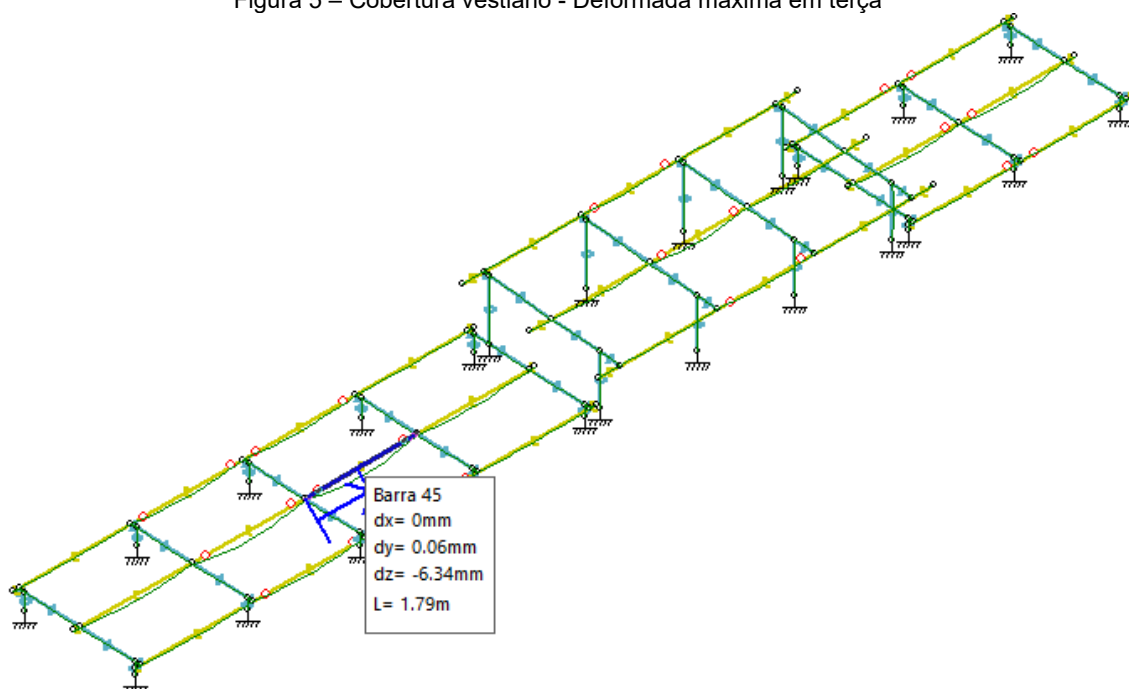
5.2.4 DEFORMADAS

Deslocamentos obtidos para a combinação PP + CP + 0,60SC

- PP = peso próprio
- CP = cargas permanentes
- SC = sobrecarga
- Carga de Vento:

Para a análise das deformações da estrutura do vestiário, foi adotada a combinação quase permanente de serviço. Nessa condição, a ação do vento possui coeficiente de combinação ψ igual a zero, não contribuindo para os deslocamentos da estrutura. Dessa forma, os deslocamentos horizontais globais tornam-se desprezíveis para esta verificação, sendo a análise das deformações limitada aos deslocamentos verticais das terças de cobertura.

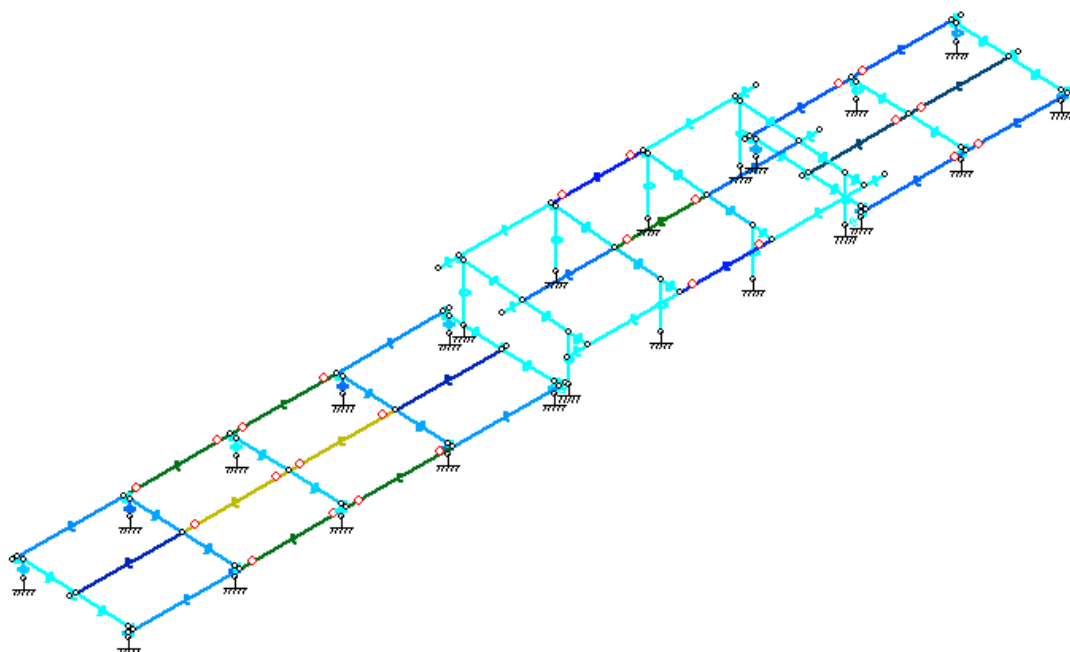
Figura 5 – Cobertura vestiário - Deformada máxima em terça



Fonte: YKS

5.2.5 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS

Figura 6 – Cobertura vestiário - Verificação dos Elementos Estruturais



Fonte: YKS

5.2.5.1 TERÇAS

Perfil U Enrijecido (Formado a frio)

Perfil: UENR 127 x 50 x 17 x 2.25
Aço: ASTM A36 $f_y = 250 \text{ MPa}$ $f_u = 400 \text{ MPa}$

COMPRIMENTOS DA BARRA

$L_x = 3.84 \text{ m}$ $L_z = 3.84 \text{ m}$
 $L_y = 7.69 \text{ m}$ $L_b = 3.84 \text{ m}$

1. Cálculo da Tração

$C_T = 1.00$ Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 124.26 \text{ kN} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 132.55 \text{ kN} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 124.26 \text{ kN} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

2. Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 44.57 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 24.73 \text{ kN}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 38.83 \text{ kN}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 0.66$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 26.14 \text{ kN}$$

$$N_e = 24.73 \text{ kN}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 2.35$$

$$\lambda_o > 1,5 \text{ então } \chi = \frac{0,877}{(\lambda_o)^2} = 0.16$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 18.08 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 102.50 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 18.08 \text{ kN} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

3. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Y

3.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned} A_{ef} &= 0.00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{xef} &= 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\ d &= 0.00 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 0.06 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\ W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\ M_{Rd}^{PL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 4.78 \text{ kN.m} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} M_e &= C_b \cdot r_o \sqrt{N_{ey} \cdot N_{et}} = 2.29 \text{ kN.m} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\ W_c &= 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\ \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 1.52 && \lambda_o \geq 1,336 \quad \text{então} \quad \chi_{FLT} = \frac{1}{\lambda_o^2} \end{aligned}$$

$$\chi_{FLT} = 0.43 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } W_{cef} \text{ na tensão} \quad \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 108685.13 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned} A_{ef} &= 0.00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{xef} &= 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\ d &= 0.00 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 0.06 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\ W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \end{aligned}$$

$$M_{xRd}^{FLT} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 2.08 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT-}$$

$$M_{xRd} = 2.08 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0.89 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

4. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Z

4.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned} A_{ef} &= 0.00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{yef} &= 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\ d &= 0.00 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ x_{G \text{ final}} &= x_G + d = 0.02 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\ W_{ef} &= \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\ M_{yRd} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 2.65 \text{ kN.m} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} C_s &= 1.00 \\ C_m &= 0.60 \\ j &= 0.07 \text{ m} && \text{Parâmetro da seção transversal conforme Anexo E - NBR 14762:2010} \\ M_e &= \frac{C_s \cdot N_{ey}}{C_m} \cdot \left[j + C_s \cdot \sqrt{j^2 + r_0^2} \cdot \left(\frac{N_{et}}{N_{ey}} \right) \right] = 12.04 \text{ kN.m} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\ W_c &= 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\ \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0.49 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0 \\ \chi_{FLT} &= 1.00 && \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção} \\ \text{Cálculo de } W_{cef} &&& \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 250000.00 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{ef} &= 0.00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{yef} &= 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z} \\ d &= 0.00 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ x_{G \text{ final}} &= x_G + d = 0.02 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\ W_{ef} &= \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\ M_{yRd} &= 2.65 \text{ kN.m} && \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y} \\ \frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} &= \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!} \end{aligned}$$

5. Cálculo da Resistência ao cortante - eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 18.22 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$k_v = 5.00$ Coeficiente de flambagem local por cisalhamento

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} =$$

68.31 Parâmetro de esbeltez limite para plastificação

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} =$$

88.54 Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento $\lambda \leq \lambda_p$ então

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

$V_{Rdy} = 25.16$ kN Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

6. Cálculo da Resistência ao cortante - eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} =$$

52.44 Parâmetro de esbeltez

$k_v = 5.00$ Coeficiente de flambagem local por cisalhamento

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} =$$

68.31 Parâmetro de esbeltez limite para plastificação

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} =$$

88.54 Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento $\lambda \leq \lambda_p$ então

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

$V_{Rdz} = 36.20$ kN Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0.05 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

7. Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0.90$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.90$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.90$$

5.2.5.2 PILARES

Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 127 x 50 x 17 x 2.25

Aço: ASTM A36 $f_y = 250$ MPa $f_u = 400$ MPa

COMPRIMENTOS DA BARRA

$L_x = 0.37$ m $L_z = 0.37$ m

$$L_y = 0.37 \text{ m} \quad L_b = 0.37 \text{ m}$$

1. Cálculo da Tração

$$C_T = 1.00 \quad \text{Coeficiente de redução da área líquida}$$

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1,10} = 248.52 \text{ kN} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1,65} = 265.09 \text{ kN} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 248.52 \text{ kN} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.00 < 1.00 \quad \text{OK!}$$

2. Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 38504.51 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 23702.17 \text{ kN}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 84336.34 \text{ kN}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 1.00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 38504.51 \text{ kN}$$

$$N_e = 23702.17 \text{ kN}$$

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0.11$$

$$\lambda_o \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_o)^2 = 1.00$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 199.20 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 199.90 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 199.20 \text{ kN} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0.02 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

3. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Y

3.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$\begin{aligned} A_{ef} &= 0.00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{xef} &= 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\ d &= 0.00 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 0.06 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\ W_{ef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\ M_{PL} &= \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 9.28 \text{ kN.m} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} M_e &= C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 4717.99 \text{ kN.m} && \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção} \\ W_c &= 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida} \\ \lambda_o &= \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0.04 && \lambda_o \leq 0,6 \text{ então } \chi_{FLT} = 1,0 \end{aligned}$$

$$\chi_{FLT} = 1.00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } W_{cef} \text{ na tensão } \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 250000.00 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned} A_{ef} &= 0.00 \text{ m}^2 && \text{Área efetiva da seção} \\ I_{xef} &= 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y} \\ d &= 0.00 \text{ m} && \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico} \\ y_{G \text{ final}} &= y_G + d = 0.06 \text{ m} && \text{Posição final do eixo baricêntrico} \\ I_G &= I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 && \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico} \\ W_{cef} &= \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 && \text{Módulo elástico efetivo} \\ M_{FLT} &= \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 9.28 \text{ kN.m} && \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT-} \end{aligned}$$

$$M_{xRd} = 9.28 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0.15 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

4. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Z

$$A_{ef} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

$$d = 0.00 \text{ m} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$X_{G \text{ final}} = X_G + d = 0.05 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{X_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{yRd} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 6.45 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0.15 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

5. Cálculo da Resistência ao cortante - eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 40.44 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5.00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68.31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88.54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

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

$$V_{Rdy} = 55.84 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0.04 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

6. Cálculo da Resistência ao cortante - eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 52.44 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5.00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68.31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88.54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

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

$$V_{Rdz} = 72.41 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0.05 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

7. Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0.32$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.29$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.29$$

5.2.5.3 VIGAS

Perfil Caixa (Formado a frio)

Perfil: CA 127 x 50 x 17 x 2.25
Aço: ASTM A36 $f_y = 250 \text{ MPa}$ $f_u = 400 \text{ MPa}$

COMPRIMENTOS DA BARRA

$L_x = 1.9 \text{ m}$ $L_z = 1.9 \text{ m}$
 $L_y = 3.79 \text{ m}$ $L_b = 1.9 \text{ m}$

1. Cálculo da Tração

$C_T = 1.00$ Coeficiente de redução da área líquida

$$N_{tRd1} = \frac{A \cdot f_y}{1.10} = \frac{248.52 \text{ kN}}{1.10} \quad \text{Resistência de escoamento}$$

$$N_{tRd2} = \frac{C_T \cdot A_n \cdot f_u}{1.65} = \frac{265.09 \text{ kN}}{1.65} \quad \text{Resistência à ruptura}$$

$$N_{tRd} = 248.52 \text{ kN} \quad \text{Resistência à tração}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.00 < 1.00 \quad \text{OK!}$$

2. Cálculo da Compressão

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 366.98 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L_z)^2} = 898.84 \text{ kN}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot J \right] = 84336.34 \text{ kN}$$

$$H = 1 - \frac{\chi_o^2}{r_o^2} = 1.00$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot H} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot H}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] = 366.98 \text{ kN}$$

$$N_e = 366.98 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}} = 0.86$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \text{ então } \chi = 0,658 (\lambda_0)^2 = 0.73$$

a) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem global

$$A_{ef}^{FG} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem global}$$

$$N_{cRd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,20} = 157.24 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem global}$$

b) Cálculo da resistência à compressão devido à flambagem local

$$A_{ef}^{FL} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd}^{FL} = \frac{A_{ef}^{FL} \cdot f_y}{1,20} = 199.90 \text{ kN} \quad \text{Resistência à compressão devido à flambagem local}$$

$$N_{cRd} = 157.24 \text{ kN} \quad \text{Força normal resistente de cálculo à compressão}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} = 0.02 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

3. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Y

3.1. Cálculo do momento resistente devido ao início do escoamento efetivo

$$A_{ef} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0.00 \text{ m} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$Y_{G \text{ final}} = Y_G + d = 0.06 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{xef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{Y_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{Rd}^{PL} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 9.28 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o início do escoamento}$$

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

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t} = 1115.64 \text{ kN.m} \quad \text{Momento fletor de flambagem lateral com torção}$$

$$W_c = 0.00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} = 0.09 \quad \lambda_0 \leq 0,6 \quad \text{então } \chi_{FLT} = 1,0$$

$$\chi_{FLT} = 1.00 \quad \text{Fator de redução associado à flambagem lateral com torção}$$

$$\text{Cálculo de } W_{cef} \text{ na tensão } \sigma = \chi_{FLT} \cdot f_y = 250000.00 \text{ kN/m}^2$$

$$A_{ef} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{xef} = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Y}$$

$$d = 0.00 \text{ m} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$y_{G \text{ final}} = y_G + d = 0.06 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{x_{ef}} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{cef} = \frac{I_G}{y_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{xRd} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{cef} \cdot f_y}{1,10} = 9.28 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão para o estado limite FLT-}$$

$$M_{xRd} = 9.28 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} = 0.22 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

4. Cálculo da Resistência à Flexão - eixo Z

$$A_{ef} = 0.00 \text{ m}^2 \quad \text{Área efetiva da seção}$$

$$I_{yef} = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo Z}$$

$$d = 0.00 \text{ m} \quad \text{Rebaixamento total do eixo baricêntrico}$$

$$x_{G \text{ final}} = x_G + d = 0.05 \text{ m} \quad \text{Posição final do eixo baricêntrico}$$

$$I_G = I_{yef} - A_{ef} \cdot d^2 = 0.00 \text{ m}^4 \quad \text{Momento de inércia efetivo da seção em relação ao eixo baricêntrico}$$

$$W_{ef} = \frac{I_G}{x_{G \text{ final}}} = 0.00 \text{ m}^3 \quad \text{Módulo elástico efetivo}$$

$$M_{yRd} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{1,10} = 6.45 \text{ kN.m} \quad \text{Resistência de cálculo à flexão em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0.03 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

5. Cálculo da Resistência ao cortante - eixo Y

$$\lambda = \frac{h}{t} = 40.44 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5.00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68.31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88.54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento} \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ então}$$

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

$$V_{Rdy} = 55.84 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Y}$$

$$\frac{SOLIC.}{RESIST.} = \frac{V_{ySd}}{V_{yRd}} = 0.00 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

6. Cálculo da Resistência ao cortante - eixo Z

$$\lambda = \frac{h}{t} = 52.44 \quad \text{Parâmetro de esbeltez}$$

$$k_v = 5.00 \quad \text{Coeficiente de flambagem local por cisalhamento}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 68.31 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para plastificação}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 88.54 \quad \text{Parâmetro de esbeltez limite para início de escoamento}$$

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

$$V_{Rdz} = 72.41 \text{ kN} \quad \text{Resistência ao esforço cortante em relação ao eixo Z}$$

$$\frac{\text{SOLIC.}}{\text{RESIST.}} = \frac{V_{zSd}}{V_{zRd}} = 0.03 < 1,00 \quad \text{OK!}$$

7. Equações de Interação

$$\frac{N_{cSd}}{N_{cRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} = 0.27$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} + \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.25$$

$$\frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zSd}}{M_{zRd}} - \frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} = 0.25$$

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO PROJETO

Durante a obra, devem ser mantidas as especificações estabelecidas em projeto. A substituição de especificações constantes no projeto só poderá ser realizada com a anuência do projetista.

A empresa executora deverá aplicar procedimentos de execução e de controle de qualidade dos serviços conforme as respectivas normas técnicas de execução e controle.

Devem ser seguidas as instruções específicas de detalhamento de projeto e de especificação, visando assegurar o desempenho final e, em caso de necessidade de alteração, esta deve ter a anuência do projetista antes da execução.