

2023



SIAOTECH

Memorial de Cálculo Mecânico

EURO SYSTEMS

Flores da Cunha / RS

Pórtico Monoviga Duplo 1000 Kg

	REV. 00	REV. 01	REV. 02	REV. 03	REV. 04	REV. 05
DATA	16/10/2023					
ELABORADOR	Luís Eduardo Wiechoreck					



SUMÁRIO

IDENTIFICAÇÃO DA CONTRATANTE	3
IDENTIFICAÇÃO DO LOCAL DO SERVIÇO	3
RESPONSÁVEL TÉCNICO	3
OBJETIVO	4
ESCOPO	4
REFERÊNCIA NORMATIVA.....	4
DIMENSIONAMENTO.....	5
Informações iniciais.....	5
Verificação Viga Principal.....	7
Verificação Viga Secundária	22
Verificação Coluna	37
Verificação Contraventamento	43
Verificação Viga Suporte Contraventamento	49
Verificação Mão Francesa.....	58
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	62

IDENTIFICAÇÃO DA CONTRATANTE**EURO SYSTEMS EXAUSTÃO INDUSTRIAL****CNPJ:** 19.587.537/0001-28**IDENTIFICAÇÃO DO LOCAL DO SERVIÇO****EURO SYSTEMS EXAUSTÃO INDUSTRIAL****CNPJ:** 19.587.537/0001-28**ENDEREÇO:**

Rodovia VRS 814, S/Nº, KM 2 – Travessão Aquidaban – Lagoa Bela

Cidade: Flores da Cunha / RS**CEP:** 95.270-000**RESPONSÁVEL TÉCNICO**

Luís Eduardo Wiechoreck

*Engenheiro Mecânico**Engenheiro de Segurança do Trabalho**CREA RS2211066380***SISTEMA:** PR 23 06 049 - EUROSISTEM - Pórtico Monoviga Duplo 1000 Kg**ART Nr.:** 12846951

OBJETIVO

Este relatório foi desenvolvido com o objetivo de evidenciar a conformidade mecânica em um Pórtico Monoviga Duplo fabricada e instaladas na empresa Euro Systems em Flores da Cunha.

ESCOPO

Fazem parte deste relatório os seguintes equipamentos:

Identificação:	P01	Setor:	
Fabric. Talha:	SIAOTECH	Capacidade Talha:	1000 Kg
Modelo Talha:	1000	Capacidade da Portico:	1000 Kg

REFERÊNCIA NORMATIVA

NBR 8400:2019 - Equipamentos de elevação e movimentação de carga — Regras para projeto

NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios

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

ASTM A36 - Standard specification for carbon structural steel

ASTM A572 - Standard specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel

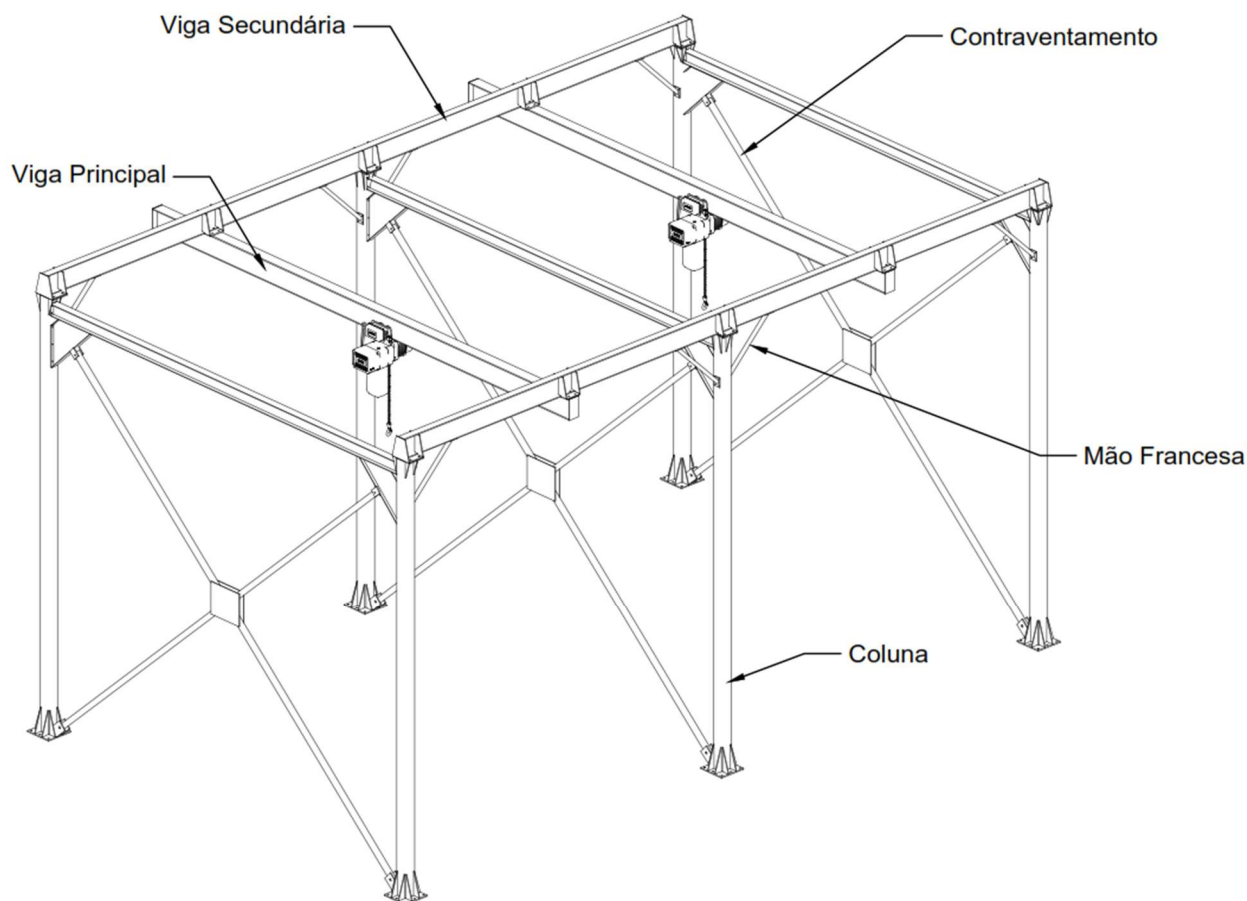
ISO 2553 - Welding and allied processes – Symbolic representation on drawings – Welded joints

ISO 22986 - Cranes – Stiffness – Bridge and gantry cranes

DIMENSIONAMENTO

Informações iniciais

Desenho esquemático de elementos estruturais:



Classificação do equipamento:

Grupo do equipamento: A4

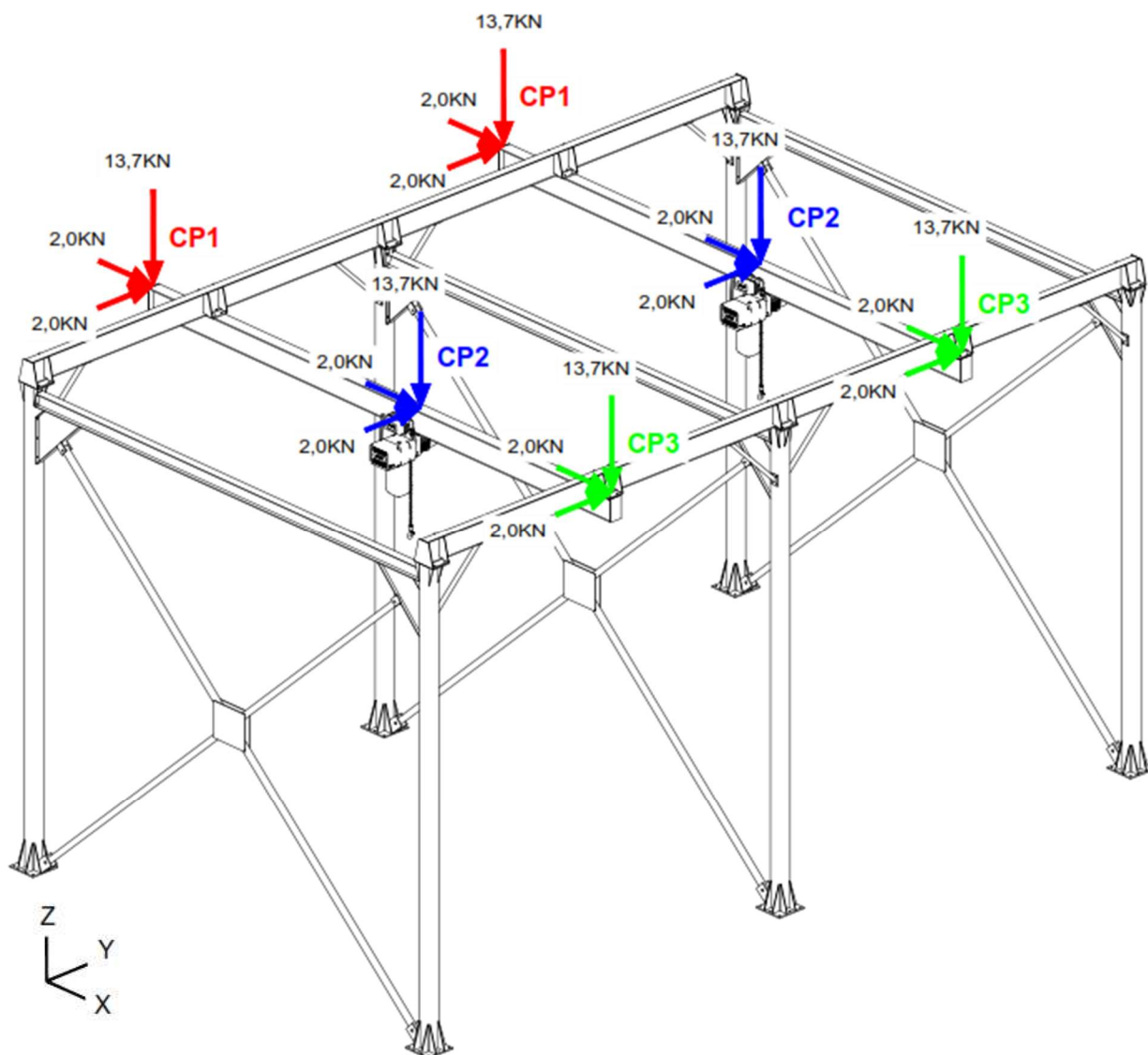
Classe de elevação: HC3

Valor de carga principal considerando coeficiente dinâmico e de amplificação = 13,7 kN

Valores de carga horizontais em função de aceleração ao longo da viga e rotação da mesma (estimado em considerando velocidade baixa/moderada menor que 0,25 m/s e aceleração em $0,078 \text{ m/s}^2$) = 2 kN

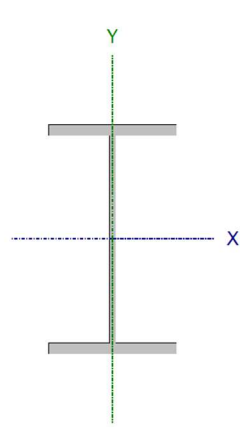
Tensão admissível de projeto = 145,1 Mpa (escolhido menor valor entre tensão admissível com relação ao limite elástico e tensão admissível de projeto em relação a fadiga – conforme NBR 8400)

Para verificação, as cargas serão inseridas ao longo da viga principal e da viga de rolagem, sempre escolhendo a combinação de cargas mais desfavorável para cada elemento.

Distribuição de Cargas Consideradas em Projeto

Observações:

- Ao longo de cada Monoviga, os grupos de carga (vertical e horizontais) não foram consideradas como sendo aplicadas ao mesmo tempo, mas em posições distintas.
- O elemento que mais sofreu estresse foi considerado na verificação de dimensionamento que segue.
- O peso próprio de cada elemento também foi considerado no cálculo.

Verificação Viga Principal
Perfil: W 250 x 44.8
Material: Aço (A36 - Tensão de Projeto)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
Inicial	Final		Área (cm²)	$I_x^{(1)}$ (cm4)	$I_y^{(1)}$ (cm4)	$I_t^{(2)}$ (cm4)
N41	N17	6.000	57.60	7158.00	704.00	27.14
Notas: ⁽¹⁾ Inércia em relação ao eixo indicado ⁽²⁾ Momento de inércia à torção uniforme						
	Flambagem		Flambagem lateral			
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.		
β	0.71	1.00	1.00	1.00		
L_K	4.257	6.000	6.000	6.000		
C_b	-		1.000			
Notação: β : Coeficiente de flambagem L_K : Comprimento de flambagem (m) C_b : Fator de modificação para o momento crítico						

Resistência à tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.001} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N41, para a combinação de ações PP+CP2X+CP3Z.

 $N_{t,Sd}$: Força axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável.

$$N_{t,Sd} : \underline{0.98} \text{ kN}$$

 A força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{t,Rd} : \underline{759.80} \text{ kN}$$

Onde:

 A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{57.60} \text{ cm}^2$$

 f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

 γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

Resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.002} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 3.001 m do nó N41, para a combinação de ações 1.3·PP+CP2X.

N_{c,Sd}: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.

N_{c,Sd} : 1.03 kN

A força axial de compressão resistente de cálculo, N_{c,Rd}, deve ser determinada pela expressão:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

N_{c,Rd} : 481.50 kN

Onde:

χ: Fator de redução total associado à resistência à compressão.

χ : 0.634

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.

Q : 1.000

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

A_g : 57.60 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

Fator de redução χ: (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3)

$$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$$

χ : 0.634

Onde:

λ₀: Índice de esbeltez reduzido.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}}$$

λ₀ : 1.044

Sendo:

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.

Q : 1.000

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

A_g : 57.60 cm²

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

N_e: Força axial de flambagem elástica.

N_e : 766.89 kN

Força axial de flambagem elástica: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo E)

A força axial de flambagem elástica, N_e, de uma barra com seção transversal duplamente simétrica ou simétrica em relação a um ponto, é dada pelo menor valor entre os obtidos por (a), (b) e (c):

N_e : 766.89 kN

(a) Para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia X da seção transversal:

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

N_{ex} : 3924.81 kN

Onde:

K_x·L_x: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

K_x·L_x : 6.000 m

I_x: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X.

I_x : 7158.00 cm⁴

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

(b) Para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia Y da seção transversal:

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

$$N_{ey} : \underline{766.89} \text{ kN}$$

Onde:

$K_y \cdot L_y$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo Y.

$$K_y \cdot L_y : \underline{4.257} \text{ m}$$

I_y : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

$$I_y : \underline{704.00} \text{ cm}^4$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

(c) Para flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal Z:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + G \cdot J \right]$$

$$N_{ez} : \underline{1982.57} \text{ kN}$$

Onde:

$K_z \cdot L_z$: Comprimento de flambagem por torção.

$$K_z \cdot L_z : \underline{6.000} \text{ m}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

$$C_w : \underline{112398.00} \text{ cm}^6$$

G: Módulo de elasticidade transversal do aço.

$$G : \underline{77000} \text{ MPa}$$

J: Constante de torção da seção transversal.

$$J : \underline{27.14} \text{ cm}^4$$

r_0 : Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento.

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)}$$

$$r_0 : \underline{11.68} \text{ cm}$$

Onde:

r_x, r_y : Raios de giração em relação aos eixos principais X, Y, respectivamente.

$$r_x : \underline{11.15} \text{ cm}$$

$$r_y : \underline{3.50} \text{ cm}$$

x_0, y_0 : Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principais X, Y, respectivamente.

$$x_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

Flambagem local de barras axialmente comprimidas: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F)

Não se aplica nenhuma redução, já que todos os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (b/t) que não superam os valores limite dados na Tabela F.1.

Mesa: Elemento do Grupo 4 da Tabela F.1.

$$(b/t) \leq (b/t)_{lim}$$

$$5.69 \leq 20.79$$

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura.

$$(b/t) : \underline{5.69}$$

Onde:

b: Largura.

$$b : \underline{74.00} \text{ mm}$$

t: Espessura.

$$t : \underline{13.00} \text{ mm}$$

(b/t)_{lim}: Relação limite entre largura e espessura.

$$(b/t)_{lim} = 0.56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$(b/t)_{lim} : \underline{20.79}$$

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

Alma: Elemento do Grupo 2 da Tabela F.1.

$$(b/t) \leq (b/t)_{lim}$$

$$31.58 \leq 55.32$$

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura.

$$(b/t) : \underline{31.58}$$

Onde:

b: Largura.

$$b : \underline{240.00} \text{ mm}$$

t: Espessura.

$$t : \underline{7.60} \text{ mm}$$

(b/t)_{lim}: Relação limite entre largura e espessura.

$$(b/t)_{lim} = 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$(b/t)_{lim} : \underline{55.32}$$

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{sd}}{M_{rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.348} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 3.000 m do nó N41, para a combinação de ações 1.3·PP+CP2Z.

M_{sd}⁺: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$M_{sd}^+ : \underline{22.98} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Já que ' $\lambda \leq \lambda_r$ ', deve-se considerar viga de alma não-esbelta (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G).

$$31.58 \leq 211.62$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{31.58}$$

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

$$h : \underline{240.00} \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \underline{7.60} \text{ mm}$$

$$\lambda_r = 5.70 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_r : \underline{211.62}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} de vigas de alma não-esbelta deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções:

M_{Rd} : 66.02 kN·m

- (a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$M_{Rd} = \frac{1.50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 106.49 kN·m

Onde:

W_x: Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

W_x : 538.20 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

- (b) Estado-límite último de flambagem lateral com torção, FLT (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\lambda > \lambda_p$$

171.62 > 65.34

$$\lambda \leq \lambda_r$$

171.62 ≤ 296.02

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 66.02 kN·m

Onde:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y}$$

λ : 171.62

Sendo:

L_{b,sup}: Distância entre pontos travados à flambagem lateral.

L_{b,sup} : 6.000 m

r_y: Raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão.

r_y : 3.50 cm

$$\lambda_p = 1.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

λ_p : 65.34

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

$$\lambda_r = \frac{1.38 \cdot \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta_1} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2}{I_y}}}$$

λ_r : 296.02

Sendo:

I_y: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

I_y : 704.00 cm⁴

J: Constante de torção da seção transversal.

J : 27.14 cm⁴



C_w: Constante de empenamento da seção transversal.

$$C_w : 112398.00 \text{ cm}^6$$

$$\beta_1 = \frac{M_r}{E \cdot J}$$

$$\beta_1 : 0.010 \text{ cm}^{-1}$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

$$M_{pl} : 87.97 \text{ kN}$$

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : 606.30 \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 145.10 \text{ MPa}$$

$$M_r = W \cdot (f_y - \sigma_r)$$

$$M_r : 54.66 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Sendo:

W_x: Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

$$W_x : 538.20 \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 145.10 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r = 0.30 \cdot f_y$$

$$\sigma_r : 43.53 \text{ MPa}$$

C_b: Fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme.

$$C_b : 1.00$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : 1.10$$

(c) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$5.69 \leq 14.11$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{Rd} : 79.98 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f/2}{t_f}$$

$$\lambda : 5.69$$

Sendo:

b_f: Largura da mesa comprimida.

$$b_f : 148.00 \text{ mm}$$

t_f: Espessura da mesa comprimida.

$$t_f : 13.00 \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_p : 14.11$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : 200000 \text{ MPa}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 145.10 \text{ MPa}$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

$$M_{pl} : 87.97 \text{ kN}$$

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástica.

Z_x : 606.30 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

(d) Estado-limite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$31.58 \leq 139.59$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 79.98 kN·m

Onde:

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

λ : 31.58

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

h : 240.00 mm

t_w: Espessura da alma.

t_w : 7.60 mm

$$\lambda_p = 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

λ_p : 139.59

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

M_{pl} : 87.97 kN

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástica.

Z_x : 606.30 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

η : 0.107 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 3.000 m do nó N41, para a combinação de ações 1.3·PP+CP3Y.

M_{Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

M_{Sd} : 2.01 kN·m

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções:

$$M_{Rd} : \underline{18.82} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

- (a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$M_{Rd} = \frac{1.50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{Rd} : \underline{18.82} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Onde:

W_y : Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

$$W_y : \underline{95.14} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

- (b) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$5.69 \leq 14.11$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{Rd} : \underline{19.31} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f/2}{t_f}$$

$$\lambda : \underline{5.69}$$

Sendo:

b_f : Largura da mesa comprimida.

$$b_f : \underline{148.00} \text{ mm}$$

t_f : Espessura da mesa comprimida.

$$t_f : \underline{13.00} \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_p : \underline{14.11}$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

$$M_{pl} : \underline{21.24} \text{ kN}$$

Onde:

Z_y : Módulo de resistência plástico.

$$Z_y : \underline{146.40} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

- (c) Estado-límite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$31.58 \leq 41.58$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{Rd} : \underline{19.31} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{31.58}$$

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

$$h : \underline{240.00} \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \underline{7.60} \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_p : \underline{41.58}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

$$M_{pl} : \underline{21.24} \text{ kN}$$

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico.

$$Z_y : \underline{146.40} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.004} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N41, para a combinação de ações PP+CP3Y+CP3X.

V_{Sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$$V_{Sd} : \underline{1.24} \text{ kN}$$

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd}, é determinada pela expressão:

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$5.69 \leq 44.74$$

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$V_{Rd} : \underline{304.55} \text{ kN}$$

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f/2}{t_f}$$

$$\lambda : \underline{5.69}$$

Sendo:

b_f: Largura das mesas.

$$b_f : \underline{148.00} \text{ mm}$$

t_f: Espessura das mesas.

$$t_f : \underline{13.00} \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}}$$

$$\lambda_p : \underline{44.74}$$

Sendo:

 k_v : Coeficiente de flambagem.

$k_v : 1.20$

 E : Módulo de elasticidade do aço.

$E : 200000 \text{ MPa}$

 f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$f_y : 145.10 \text{ MPa}$

$$V_{pl} = 0.60 \cdot A_w \cdot f_y$$

$V_{pl} : 335.01 \text{ kN}$

Sendo:

 A_w : Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w = 2 \cdot b_f \cdot t_f$$

$A_w : 38.48 \text{ cm}^2$

 γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$\gamma_{a1} : 1.10$

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

$\eta : 0.054 \checkmark$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N41, para a combinação de ações 1.3·PP+CP2Z.

 V_{Sd} : Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$V_{Sd} : 8.63 \text{ kN}$

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , é determinada pela expressão:

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$31.58 \leq 91.32$

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$V_{Rd} : 160.00 \text{ kN}$

Onde:

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

$\lambda : 31.58$

Sendo:

 h : Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

$h : 240.00 \text{ mm}$

 t_w : Espessura da alma.

$t_w : 7.60 \text{ mm}$

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}}$$

$\lambda_p : 91.32$

Sendo:

 k_v : Coeficiente de flambagem.

$k_v : 5.00$

 E : Módulo de elasticidade do aço.

$E : 200000 \text{ MPa}$

 f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$f_y : 145.10 \text{ MPa}$

$$V_{pl} = 0.60 \cdot A_w \cdot f_y$$

$$V_{pl} : \underline{176.00} \text{ kN}$$

Sendo:

A_w : Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w = d \cdot t_w$$

$$A_w : \underline{20.22} \text{ cm}^2$$

d : Altura total da seção transversal.

$$d : \underline{266.00} \text{ mm}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

Resistência ao esforço axial e flexão combinados (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.1.2)

Deve satisfazer:

$$\eta \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.349} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 3.000 m do nó N41, para a combinação de ações 1.3·PP+CP1X+CP2Z.

$N_{c,Sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.

$$N_{c,Sd} : \underline{1.03} \text{ kN}$$

$M_{x,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$M_{x,Sd} : \underline{22.98} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$M_{y,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$M_{y,Sd} : \underline{0.01} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$N_{Sd} / N_{Rd} < 0.2$$

$$0.002 < 0.200$$

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{2 \cdot N_{c,Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.349}$$

Onde:

$N_{c,Rd}$: Força axial resistente de cálculo de compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3).

$$N_{c,Rd} : \underline{481.50} \text{ kN}$$

$M_{x,Rd}, M_{y,Rd}$: Momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos X e Y da seção transversal (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2).

$$M_{x,Rd} : \underline{66.02} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{y,Rd} : \underline{18.82} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Resistência à torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.1)

Já que a norma não proporciona uma verificação geral para seções não tubulares submetidas exclusivamente à torção, considera-se que este elemento também deve cumprir o seguinte critério:

Deve satisfazer:

$$\eta : \underline{0.001} \checkmark$$

$$\eta = \frac{T_{Sd}}{T_{Rd}} \leq 1$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações PP+CP1Z.

T_{Sd}: Momento de torção solicitante de cálculo, desfavorável.

T_{Sd} : 0.00 kN·m

O momento de torção resistente de cálculo, T_{Rd}, é determinado pela expressão:

$$T_{Rd} = \frac{0.60 \cdot W_T \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

T_{Rd} : 1.65 kN·m

Onde:

W_T: Módulo de resistência à torção.

W_T : 20.88 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

Resistência a interações de esforços e momento de torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{|\sigma_{Sd}|}{\sigma_{Rd}} \leq 1$$

η : 0.352 ✓

$$\eta = \frac{|\tau_{Sd}|}{\tau_{Rd}} \leq 1$$

η : 0.001 ✓

(Já que a norma não proporciona uma verificação da tensão total para seções submetidas a torção combinada com outros esforços, considera-se que este elemento também deve cumprir os seguintes critérios para a tensão de Von Mises:)

$$\eta = \frac{f_{Sd}}{f_{Rd}} \leq 1$$

η : 0.203 ✓

O coeficiente de aproveitamento desfavorável produz-se no nó N41, para a combinação de ações 1.3·PP+CP1Z+CP1Y+CP1X no ponto da seção transversal de coordenadas X = 74.00 mm, Y = -133.00 mm em relação ao centro de gravidade.

As tensões normais σ_{Sd} são dadas por:

$$\sigma_{Sd} = \sigma_{N_{Sd}} + \sigma_{M_{x,Sd}} + \sigma_{M_{y,Sd}}$$

σ_{Sd} : -29.39 MPa

Onde:

σ_{NSd} : -0.18 MPa

$$\sigma_{N_{sd}} = \frac{N_{c,Sd}}{Q \cdot A_g}$$

Sendo:

N_{c,Sd}: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.

Q: Fator de redução total associado à flambagem local (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F).

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$N_{c,Sd} : \underline{1.01} \text{ kN}$$

$$Q : \underline{1.000}$$

$$A_g : \underline{57.60} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{M_{x,Sd}} = - \frac{M_{x,Sd}}{I_x} \cdot Y$$

$$\sigma_{M_{x,Sd}} : \underline{-25.95} \text{ MPa}$$

Sendo:

M_{x,Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

I_x: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X.

Y: Coordenada, em relação ao eixo Y, do ponto desfavorável da seção transversal em relação ao centro de gravidade da seção bruta.

$$M_{x,Sd} : \underline{13.97} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$I_x : \underline{7158.00} \text{ cm}^4$$

$$Y : \underline{-133.00} \text{ mm}$$

$$\sigma_{M_{y,Sd}} = - \frac{M_{y,Sd}}{I_y} \cdot X$$

$$\sigma_{M_{y,Sd}} : \underline{-3.26} \text{ MPa}$$

Sendo:

M_{y,Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

I_y: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

X: Coordenada, em relação ao eixo X, do ponto desfavorável da seção transversal em relação ao centro de gravidade da seção bruta.

$$M_{y,Sd} : \underline{0.31} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$I_y : \underline{704.00} \text{ cm}^4$$

$$X : \underline{74.00} \text{ mm}$$

As tensões tangenciais τ_{sd} são dadas por:

$$\tau_{sd} = \tau_{V_{x,Sd}} + \tau_{V_{y,Sd}} + \tau_{T_{sd}}$$

$$\tau_{sd} : \underline{-0.05} \text{ MPa}$$

Onde:

$$\tau_{V_{x,Sd}} = - \frac{\bar{S}_y}{I_y \cdot t} \cdot V_{x,Sd}$$

$$\tau_{V_{x,Sd}} : \underline{0.00} \text{ MPa}$$

Sendo:

V_{x,Sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

S_y: Momento estático, em relação ao eixo Y, da parte da seção situada a um lado do ponto de verificação.

I_y: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

t: Espessura.

$$V_{x,Sd} : \underline{0.01} \text{ kN}$$

$$S_y : \underline{0.00} \text{ cm}^3$$

$$I_y : \underline{704.00} \text{ cm}^4$$

$$t : \underline{13.00} \text{ mm}$$

$$\tau_{V_{y,Sd}} = - \frac{\bar{S}_x}{I_x \cdot t} \cdot V_{y,Sd}$$

$$\tau_{V_{y,Sd}} : \underline{0.00} \text{ MPa}$$

Sendo:

V_{y,Sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$$V_{y,Sd} : \underline{4.06} \text{ kN}$$

S_x: Momento estático, em relação ao eixo X, da parte da seção situada a um lado do ponto de verificação.

$$\mathbf{S_x : \quad 0.00 \quad cm^3}$$

I_x: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X.

$$\mathbf{I_x : \quad 7158.00 \quad cm^4}$$

t: Espessura.

$$\mathbf{t : \quad 13.00 \quad mm}$$

$$\tau_{Tsd} = \pm \frac{t}{J} \cdot T_{sd}$$

$$\mathbf{\tau_{Tsd} : \quad -0.05 \quad MPa}$$

Sendo:

T_{sd}: Momento de torção solicitante de cálculo, desfavorável.

$$\mathbf{T_{sd} : \quad 0.00 \quad kN \cdot m}$$

J: Constante de torção da seção transversal.

$$\mathbf{J : \quad 27.14 \quad cm^4}$$

t: Espessura.

$$\mathbf{t : \quad 13.00 \quad mm}$$

As tensões totais f_{sd} são dadas por:

$$\mathbf{f_{sd} = \sqrt{\sigma_{sd}^2 + 3 \cdot \tau_{sd}^2}}$$

$$\mathbf{f_{sd} : \quad 29.39 \quad MPa}$$

A tensão resistente de cálculo, σ_{Rd} , é dada pelo menor valor entre os obtidos por a) e b):

$$\mathbf{\sigma_{Rd} : \quad 83.59 \quad MPa}$$

a) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de escoamento sob efeito de tensão normal:

$$\mathbf{\sigma_{Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{a1}}}$$

$$\mathbf{\sigma_{Rd} : \quad 131.91 \quad MPa}$$

Onde:

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$\mathbf{f_y : \quad 145.10 \quad MPa}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\mathbf{\gamma_{a1} : \quad 1.10}$$

b) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão normal:

$$\mathbf{\sigma_{Rd} = \frac{\chi \cdot f_y}{\gamma_{a1}}}$$

$$\mathbf{\sigma_{Rd} : \quad 83.59 \quad MPa}$$

Onde:

χ: Fator de redução total associado à resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3).

$$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$$

$$\mathbf{\chi : \quad 0.634}$$

Sendo:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_e}}$$

$$\mathbf{\lambda_0 : \quad 1.044}$$

$$\sigma_e = \frac{N_e}{Q \cdot A_g}$$

$$\mathbf{\sigma_e : \quad 133.14 \quad MPa}$$

Onde:

N_e: Força axial de flambagem elástica.

$$\mathbf{N_e : \quad 766.89 \quad kN}$$

$$\mathbf{Q : \quad 1.000}$$

Q: Fator de redução total associado à flambagem local (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F).

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

A_g : 57.60 cm²

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1} : 1.10

A tensão resistente de cálculo, τ_{Rd}, é dada pelo menor valor entre os obtidos por a) e b):

τ_{Rd} : 79.04 MPa

(a) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de escoamento sob efeito de tensão de cisalhamento:

$$\tau_{Rd} = \frac{0.60 \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

τ_{Rd} : 79.15 MPa

Onde:

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

(b) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão cisalhamento:

$$\tau_{Rd} = \frac{0.60 \cdot \chi \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

τ_{Rd} : 79.04 MPa

Onde:

χ: Fator de redução total associado à resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3).

$$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$$

χ : 0.999

Sendo:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{0.60 \cdot f_y}{\tau_e}}$$

λ₀ : 0.056

$$\tau_e = k_v \cdot \sigma_E$$

τ_e : 27893.33 MPa

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h}\right)^2$$

σ_E : 5578.67 MPa

Onde:

k_v: Coeficiente de flambagem (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3).

k_v : 5.00

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

ν: Coeficiente de Poisson.

ν : 0.30

t: Espessura.

t : 13.00 mm

h: Largura.

h : 74.00 mm

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

A tensão resistente de cálculo, f_{Rd} é dada por:

$$f_{Rd} = \frac{1.1 \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$f_{Rd} : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

Onde:

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

Verificação Viga Secundária

Perfil: W 250 x 28.4

Material: Aço (A36 - Tensão de Projeto)

Material: aço (AISI 1020) - Perfilado em I

Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
Inicial	Final		Área (cm²)	I _x ⁽¹⁾ (cm4)	I _y ⁽¹⁾ (cm4)	I _t ⁽²⁾ (cm4)
N40	N26	1.750	36.60	4046.00	178.00	10.34

Notas:

⁽¹⁾ Inércia em relação ao eixo indicado

⁽²⁾ Momento de inércia à torção uniforme

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	0.92	1.00	1.00	1.00
L _K	1.602	1.750	1.750	1.750
C _b	-		1.000	

Notação:

β: Coeficiente de flambagem

L_K: Comprimento de flambagem (m)

C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.004} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações 1.3·PP+CP1Z+CP1Y+CP1X.

$N_{c,Sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.

$$N_{c,Sd} : \underline{1.53} \text{ kN}$$

A força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{c,Rd} : \underline{410.44} \text{ kN}$$

Onde:

χ : Fator de redução total associado à resistência à compressão.

$$\chi : \underline{0.850}$$

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : \underline{1.000}$$

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{36.60} \text{ cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

Fator de redução χ : (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3)

$$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$$

$$\chi : \underline{0.850}$$

Onde:

λ_0 : Índice de esbeltez reduzido.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}}$$

$$\lambda_0 : \underline{0.623}$$

Sendo:

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : \underline{1.000}$$

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{36.60} \text{ cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

N_e: Força axial de flambagem elástica.

$$N_e : \underline{1369.25} \text{ kN}$$

Força axial de flambagem elástica: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo E)

A força axial de flambagem elástica, N_e, de uma barra com seção transversal duplamente simétrica ou simétrica em relação a um ponto, é dada pelo menor valor entre os obtidos por (a), (b) e (c):

$$N_e : \underline{1369.25} \text{ kN}$$

(a) Para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia X da seção transversal:

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

$$N_{ex} : \underline{26087.77} \text{ kN}$$

Onde:

K_x·L_x: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

$$K_x \cdot L_x : \underline{1.750} \text{ m}$$

I_x: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X.

$$I_x : \underline{4046.00} \text{ cm}^4$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

(b) Para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia Y da seção transversal:

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

$$N_{ey} : \underline{1369.25} \text{ kN}$$

Onde:

K_y·L_y: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo Y.

$$K_y \cdot L_y : \underline{1.602} \text{ m}$$

I_y: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

$$I_y : \underline{178.00} \text{ cm}^4$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

(c) Para flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal Z:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + G \cdot J \right]$$

$$N_{ez} : \underline{2233.30} \text{ kN}$$

Onde:

K_z·L_z: Comprimento de flambagem por torção.

$$K_z \cdot L_z : \underline{1.750} \text{ m}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

C_w: Constante de empenamento da seção transversal.

$$C_w : \underline{27636.00} \text{ cm}^6$$

G: Módulo de elasticidade transversal do aço.

G : 77000 MPa

J: Constante de torção da seção transversal.

J : 10.34 cm⁴

r₀: Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento.

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)}$$

r₀ : 10.74 cm

Onde:

r_x, r_y: Raios de giração em relação aos eixos principais X, Y, respectivamente.

r_x : 10.51 cm

r_y : 2.21 cm

X₀, Y₀: Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principais X, Y, respectivamente.

X₀ : 0.00 mm

Y₀ : 0.00 mm

Flambagem local de barras axialmente comprimidas: (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F)

Não se aplica nenhuma redução, já que todos os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (b/t) que não superam os valores limite dados na Tabela F.1.

Mesa: Elemento do Grupo 4 da Tabela F.1.

$$(b/t) \leq (b/t)_{lim}$$

$$5.10 \leq 20.79$$

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura.

(b/t) : 5.10

Onde:

b: Largura.

b : 51.00 mm

t: Espessura.

t : 10.00 mm

(b/t)_{lim}: Relação limite entre largura e espessura.

$$(b/t)_{lim} = 0.56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

(b/t)_{lim} : 20.79

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

Alma: Elemento do Grupo 2 da Tabela F.1.

$$(b/t) \leq (b/t)_{lim}$$

$$37.50 \leq 55.32$$

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura.

(b/t) : 37.50

Onde:

b: Largura.

b : 240.00 mm

t: Espessura.

t : 6.40 mm

(b/t)_{lim}: Relação limite entre largura e espessura.

$$(b/t)_{lim} = 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

(b/t)_{lim} : 55.32

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

f_y : Resistência ao escoamento do aço. f_y : 145.10 MPa**Resistência à flexão eixo X** (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

 η : 0.300 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N40, para a combinação de ações 1.3·PP+CP1Z+CP1Y.

 M_{Sd}^+ : Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. M_{Sd}^+ : 13.73 kN·m

Já que ' $\lambda \leq \lambda_r$ ', deve-se considerar viga de alma não-esbelta (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G).

37.50 ≤ 211.62

Onde:

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

 λ : 37.50

Sendo:

 h : Altura da alma, tomada igual à distância entre as faces internas das mesas. h : 240.00 mm t_w : Espessura da alma. t_w : 6.40 mm

$$\lambda_r = 5.70 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

 λ_r : 211.62

Sendo:

 E : Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa f_y : Resistência ao escoamento do aço. f_y : 145.10 MPa

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} de vigas de alma não-esbelta deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções:

 M_{Rd} : 45.83 kN·m

- (a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$M_{Rd} = \frac{1.50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

 M_{Rd} : 61.58 kN·m

Onde:

 W_x : Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão. W_x : 311.23 cm³ f_y : Resistência ao escoamento do aço. f_y : 145.10 MPa γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material. γ_{a1} : 1.10

- (b) Estado-límite último de flambagem lateral com torção, FLT (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\lambda > \lambda_p$$

79.35 > 65.34

$$\lambda \leq \lambda_r$$

$$79.35 \leq 263.51$$

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{Rd} : \underline{45.83} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y}$$

$$\lambda : \underline{79.35}$$

Sendo:

L_{b,sup}: Distância entre pontos travados à flambagem lateral.

$$L_{b,sup} : \underline{1.750} \text{ m}$$

r_y: Raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão.

$$r_y : \underline{2.21} \text{ cm}$$

$$\lambda_p = 1.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_p : \underline{65.34}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

$$\lambda_r = \frac{1.38 \cdot \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta_1} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2}{I_y}}}$$

$$\lambda_r : \underline{263.51}$$

Sendo:

I_y: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

$$I_y : \underline{178.00} \text{ cm}^4$$

J: Constante de torção da seção transversal.

$$J : \underline{10.34} \text{ cm}^4$$

C_w: Constante de empenamento da seção transversal.

$$C_w : \underline{27636.00} \text{ cm}^6$$

$$\beta_1 = \frac{M_r}{E \cdot J}$$

$$\beta_1 : \underline{0.015} \text{ cm}^{-1}$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

$$M_{pl} : \underline{51.84} \text{ kN}$$

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : \underline{357.30} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

$$M_r = W \cdot (f_y - \sigma_r)$$

$$M_r : \underline{31.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Sendo:

W_x: Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

$$W_x : \underline{311.23} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

$$\sigma_r = 0.30 \cdot f_y$$

$$\sigma_r : \underline{43.53} \text{ MPa}$$

C_b: Fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme.

$$C_b : \underline{1.00}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

(c) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$5.10 \leq 14.11$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{Rd} : \underline{47.13} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f/2}{t_f}$$

$$\lambda : \underline{5.10}$$

Sendo:

b_f: Largura da mesa comprimida.

$$b_f : \underline{102.00} \text{ mm}$$

t_f: Espessura da mesa comprimida.

$$t_f : \underline{10.00} \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_p : \underline{14.11}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

$$M_{pl} : \underline{51.84} \text{ kN}$$

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : \underline{357.30} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

(d) Estado-límite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$37.50 \leq 139.59$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{Rd} : \underline{47.13} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{37.50}$$

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

$$h : \underline{240.00} \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \underline{6.40} \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_p : \underline{139.59}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

M_{pl} : 51.84 kN

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástica.

Z_x : 357.30 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

η : 0.237 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N40, para a combinação de ações PP+CP1Z+CP1Y+CP1X.

M_{sd}⁺: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

M_{sd}⁺ : 1.63 kN·m

O momento fletor resistente de cálculo **M_{Rd}** deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções:

M_{Rd} : 6.91 kN·m

(a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$M_{Rd} = \frac{1.50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 6.91 kN·m

Onde:

W_y: Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

W_y : 34.90 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

(b) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

5.10 ≤ **14.11**

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 7.24 kN·m

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f/2}{t_f}$$

λ : 5.10

Sendo:

b_f: Largura da mesa comprimida.**b_f** : 102.00 mm**t_f**: Espessura da mesa comprimida.**t_f** : 10.00 mm

$$\lambda_p = 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

λ_p : 14.11

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.**E** : 200000 MPa**f_y**: Resistência ao escoamento do aço.**f_y** : 145.10 MPa

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

M_{pl} : 7.97 kN

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico.**Z_y** : 54.90 cm³**f_y**: Resistência ao escoamento do aço.**f_y** : 145.10 MPa**γ_{a1}**: Coeficiente de segurança do material.**γ_{a1}** : 1.10

(c) Estado-limite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

37.50 ≤ 41.58

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 7.24 kN·m

Onde:

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

λ : 37.50

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.**h** : 240.00 mm**t_w**: Espessura da alma.**t_w** : 6.40 mm

$$\lambda_p = 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

λ_p : 41.58

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.**E** : 200000 MPa**f_y**: Resistência ao escoamento do aço.**f_y** : 145.10 MPa

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

M_{pl} : 7.97 kN

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico.**Z_y** : 54.90 cm³**f_y**: Resistência ao escoamento do aço.**f_y** : 145.10 MPa**γ_{a1}**: Coeficiente de segurança do material.**γ_{a1}** : 1.10

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.007} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações PP+CP1Z+CP1Y+CP1X.

V_{Sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$$\mathbf{V_{Sd}} : \underline{1.06} \text{ kN}$$

A força cortante resistente de cálculo, **V_{Rd}**, é determinada pela expressão:

$$\mathbf{5.10} \leq \mathbf{44.74}$$

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$\mathbf{V_{Rd}} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$\mathbf{V_{Rd}} : \underline{161.46} \text{ kN}$$

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f/2}{t_f}$$

$$\lambda : \underline{5.10}$$

Sendo:

b_f: Largura das mesas.

$$\mathbf{b_f} : \underline{102.00} \text{ mm}$$

t_f: Espessura das mesas.

$$\mathbf{t_f} : \underline{10.00} \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}}$$

$$\lambda_p : \underline{44.74}$$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem.

$$\mathbf{k_v} : \underline{1.20}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$\mathbf{E} : \underline{200000} \text{ MPa}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$\mathbf{f_y} : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

$$\mathbf{V_{pl}} = 0.60 \cdot A_w \cdot f_y$$

$$\mathbf{V_{pl}} : \underline{177.60} \text{ kN}$$

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$\mathbf{A_w} = 2 \cdot b_f \cdot t_f$$

$$\mathbf{A_w} : \underline{20.40} \text{ cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Deve satisfazer:

$$\eta : \underline{0.108} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N26, para a combinação de ações 1.3·PP+CP1Z+CP1Y.

V_{Sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$$V_{Sd} : 14.17 \text{ kN}$$

A força cortante resistente de cálculo, **V_{Rd}**, é determinada pela expressão:

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$37.50 \leq 91.32$$

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$V_{Rd} : 131.70 \text{ kN}$$

Onde:

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

$$\lambda : 37.50$$

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

$$h : 240.00 \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : 6.40 \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}}$$

$$\lambda_p : 91.32$$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem.

$$k_v : 5.00$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : 200000 \text{ MPa}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 145.10 \text{ MPa}$$

$$V_{pl} = 0.60 \cdot A_w \cdot f_y$$

$$V_{pl} : 144.87 \text{ kN}$$

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w = d \cdot t_w$$

$$A_w : 16.64 \text{ cm}^2$$

d: Altura total da seção transversal.

$$d : 260.00 \text{ mm}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : 1.10$$

Resistência ao esforço axial e flexão combinados (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.1.2)

Deve satisfazer:

$$\eta \leq 1$$

$$\eta : 0.537 \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N40, para a combinação de ações 1.3·PP+CP1Z+CP1Y+CP1X.

N_{c,Sd}: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.

N_{c,Sd} : 1.53 kN

M_{x,Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

M_{x,Sd}⁺ : 13.72 kN·m

M_{y,Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

M_{y,Sd}⁺ : 1.63 kN·m

$$N_{Sd} / N_{Rd} < 0.2$$

$$0.004 < 0.200$$

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{2 \cdot N_{c,Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.537}$$

Onde:

N_{c,Rd}: Força axial resistente de cálculo de compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3).

N_{c,Rd} : 410.44 kN

M_{x,Rd}, M_{y,Rd}: Momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos X e Y da seção transversal (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2).

M_{x,Rd} : 45.83 kN·m

M_{y,Rd} : 6.91 kN·m

Resistência à torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.1)

Já que a norma não proporciona uma verificação geral para seções não tubulares submetidas exclusivamente à torção, considera-se que este elemento também deve cumprir o seguinte critério:

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{T_{Sd}}{T_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.012} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações PP+CP1Z.

T_{Sd}: Momento de torção solicitante de cálculo, desfavorável.

T_{Sd} : 0.01 kN·m

O momento de torção resistente de cálculo, T_{Rd}, é determinado pela expressão:

$$T_{Rd} = \frac{0.60 \cdot W_T \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

T_{Rd} : 0.82 kN·m

Onde:

W_T: Módulo de resistência à torção.

W_T : 10.34 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

Resistência a interações de esforços e momento de torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{|\sigma_{Sd}|}{\sigma_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.813} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{|\tau_{Sd}|}{\tau_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.012} \quad \checkmark$$

(Já que a norma não proporciona uma verificação da tensão total para seções submetidas a torção combinada com outros esforços, considera-se que este elemento também deve cumprir os seguintes critérios para a tensão de Von Mises:)

$$\eta = \frac{f_{Sd}}{f_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.628} \quad \checkmark$$

O coeficiente de aproveitamento desfavorável produz-se no nó N40, para a combinação de ações 1.3-PP+CP1Z+CP1Y+CP1X no ponto da seção transversal de coordenadas X = 51.00 mm, Y = 130.00 mm em relação ao centro de gravidade.

As tensões normais σ_{Sd} são dadas por:

$$\sigma_{Sd} = \sigma_{N_{Sd}} + \sigma_{M_{x,Sd}} + \sigma_{M_{y,Sd}}$$

$$\sigma_{Sd} : \underline{-91.13} \text{ MPa}$$

Onde:

$$\sigma_{N_{Sd}} = \frac{N_{c,Sd}}{Q \cdot A_g}$$

$$\sigma_{N_{Sd}} : \underline{-0.42} \text{ MPa}$$

Sendo:

N_{c,Sd}: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.

$$N_{c,Sd} : \underline{1.53} \text{ kN}$$

Q: Fator de redução total associado à flambagem local (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F).

$$Q : \underline{1.000}$$

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{36.60} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{M_{x,Sd}} = -\frac{M_{x,Sd}}{I_x} \cdot Y$$

$$\sigma_{M_{x,Sd}} : \underline{-44.09} \text{ MPa}$$

Sendo:

M_{x,Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$M_{x,Sd} : \underline{13.72} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

I_x: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X.

$$I_x : \underline{4046.00} \text{ cm}^4$$

Y: Coordenada, em relação ao eixo Y, do ponto desfavorável da seção transversal em relação ao centro de gravidade da seção bruta.

$$Y : \underline{130.00} \text{ mm}$$

$$\sigma_{M_{y,Sd}} = -\frac{M_{y,Sd}}{I_y} \cdot X$$

$$\sigma_{M_{y,Sd}} : \underline{-46.62} \text{ MPa}$$

Sendo:

M_{y,Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$M_{y,Sd}^+ : \underline{1.63} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

I_y: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

$$I_y : \underline{178.00} \text{ cm}^4$$

X: Coordenada, em relação ao eixo X, do ponto desfavorável da seção transversal em relação ao centro de gravidade da seção bruta.

$$X : \underline{51.00} \text{ mm}$$

As tensões tangenciais τ_{Sd} são dadas por:

$$\tau_{Sd} = \tau_{V_{x,Sd}} + \tau_{V_{y,Sd}} + \tau_{T_{Sd}}$$

$$\tau_{Sd} : \underline{-0.93} \text{ MPa}$$

Onde:

$$\tau_{V_{x,Sd}} = -\frac{\bar{S}_y}{I_y \cdot t} \cdot V_{x,Sd}$$

$$\tau_{V_{x,Sd}} : \underline{0.00} \text{ MPa}$$

Sendo:

V_{x,Sd}⁺: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$$V_{x,Sd}^+ : \underline{1.05} \text{ kN}$$

S_y: Momento estático, em relação ao eixo Y, da parte da seção situada a um lado do ponto de verificação.

$$S_y : \underline{0.00} \text{ cm}^3$$

I_y: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

$$I_y : \underline{178.00} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

$$t : \underline{10.00} \text{ mm}$$

$$\tau_{V_{y,Sd}} = -\frac{\bar{S}_x}{I_x \cdot t} \cdot V_{y,Sd}$$

$$\tau_{V_{y,Sd}} : \underline{0.00} \text{ MPa}$$

Sendo:

V_{y,Sd}⁺: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$$V_{y,Sd}^+ : \underline{13.52} \text{ kN}$$

S_x: Momento estático, em relação ao eixo X, da parte da seção situada a um lado do ponto de verificação.

$$S_x : \underline{0.00} \text{ cm}^3$$

I_x: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X.

$$I_x : \underline{4046.00} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

$$t : \underline{10.00} \text{ mm}$$

$$\tau_{T_{Sd}} = \pm \frac{t}{J} \cdot T_{Sd}$$

$$\tau_{T_{Sd}} : \underline{-0.93} \text{ MPa}$$

Sendo:

T_{Sd}: Momento de torção solicitante de cálculo, desfavorável.

$$T_{Sd} : \underline{0.01} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

J: Constante de torção da seção transversal.

$$J : \underline{10.34} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

$$t : \underline{10.00} \text{ mm}$$

As tensões totais f_{Sd} são dadas por:

$$f_{Sd} = \sqrt{\sigma_{Sd}^2 + 3 \cdot \tau_{Sd}^2}$$

$$f_{Sd} : \underline{91.14} \text{ MPa}$$

A tensão resistente de cálculo, σ_{Rd} , é dada pelo menor valor entre os obtidos por a) e b):

$$\sigma_{Rd} : \underline{112.14} \text{ MPa}$$

- (a) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de escoamento sob efeito de tensão normal:

$$\sigma_{Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$\sigma_{Rd} : \underline{131.91} \text{ MPa}$$

Onde:

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

- (b) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão normal:

$$\sigma_{Rd} = \frac{\chi \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$\sigma_{Rd} : \underline{112.14} \text{ MPa}$$

Onde:

χ : Fator de redução total associado à resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3).

$$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$$

$$\chi : \underline{0.850}$$

Sendo:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_e}}$$

$$\lambda_0 : \underline{0.623}$$

$$\sigma_e = \frac{N_e}{Q \cdot A_g}$$

$$\sigma_e : \underline{374.11} \text{ MPa}$$

Onde:

N_e : Força axial de flambagem elástica.

$$N_e : \underline{1369.25} \text{ kN}$$

Q : Fator de redução total associado à flambagem local (ABNT NBR 8800:2008, Anexo F).

$$Q : \underline{1.000}$$

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{36.60} \text{ cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

A tensão resistente de cálculo, τ_{Rd} , é dada pelo menor valor entre os obtidos por a) e b):

$$\tau_{Rd} : \underline{79.06} \text{ MPa}$$

- (a) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de escoamento sob efeito de tensão de cisalhamento:

$$\tau_{Rd} = \frac{0.60 \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$\tau_{Rd} : \underline{79.15} \text{ MPa}$$

Onde:

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

- (b) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão cisalhamento:

$$\tau_{Rd} = \frac{0.60 \cdot \chi \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$\tau_{Rd} : \underline{79.06} \text{ MPa}$$

Onde:

χ : Fator de redução total associado à resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3).

$$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$$

$$\chi : \underline{0.999}$$

Sendo:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{0.60 \cdot f_y}{\tau_e}}$$

$$\lambda_0 : \underline{0.050}$$

$$\tau_e = k_v \cdot \sigma_E$$

$$\tau_e : \underline{34748.56} \text{ MPa}$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h}\right)^2$$

$$\sigma_E : \underline{6949.71} \text{ MPa}$$

Onde:

k_v : Coeficiente de flambagem (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3).

$$k_v : \underline{5.00}$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

ν : Coeficiente de Poisson.

$$\nu : \underline{0.30}$$

t : Espessura.

$$t : \underline{10.00} \text{ mm}$$

h : Largura.

$$h : \underline{51.00} \text{ mm}$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

A tensão resistente de cálculo, f_{Rd} é dada por:

$$f_{Rd} = \frac{1.1 \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$f_{Rd} : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

Onde:

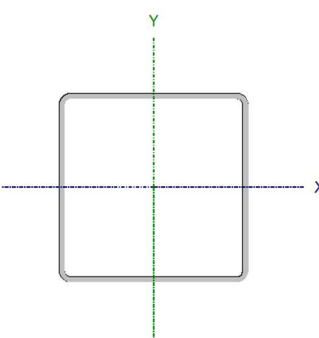
f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

Verificação Coluna
Perfil: 150x150x4.75
Material: Aço (A36 - Tensão de Projeto)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
Inicial	Final		Área (cm²)	I _x ⁽¹⁾ (cm4)	I _y ⁽¹⁾ (cm4)	I _t ⁽²⁾ (cm4)
N33	N23	4.750	27.00	937.93	937.93	1482.47
Notas: ⁽¹⁾ Inércia em relação ao eixo indicado ⁽²⁾ Momento de inércia à torção uniforme						
	Flambagem		Flambagem lateral			
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.		
β	0.70	0.70	0.00	0.00		
L _K	3.322	3.321	0.000	0.000		
C _m	-	-	1.000	1.000		
C _b	-		1.000			
Notação: β: Coeficiente de flambagem L _K : Comprimento de flambagem (m) C _m : Coeficiente de momentos C _b : Fator de modificação para o momento crítico						

Resistência à compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.083} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N33, para a combinação de ações 1.1·PP+CP3Z+CP3X.

 $N_{c,Sd}$: Força normal de compressão solicitante de cálculo.

$$N_{c,Sd} : \underline{24.59} \text{ kN}$$

 A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como:

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma$$

$$N_{c,Rd} : \underline{296.10} \text{ kN}$$

Onde:

 A_{ef} : Área efetiva da seção transversal da barra.

$$A_{ef} : \underline{27.00} \text{ cm}^2$$

 χ : Fator de redução associado à flambagem, $\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$

$$\chi_{xx} : \underline{0.91}$$

$$\chi_{yy} : \underline{0.91}$$

Sendo:

 λ_0 : Índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas.

$$\lambda_{0,xx} : \underline{0.48}$$

$$\lambda_{0,yy} : \underline{0.48}$$

$$\lambda_0 = \left[\frac{Af_y}{N_e} \right]^{0.5}$$

Sendo:

N_e: Força normal de flambagem elástica da barra, conforme 9.7.2.

A: Área bruta da seção transversal da barra.

A: 27.00 cm²

f_y: Tensão de escoamento.

f_y: 145.10 MPa

γ: Coeficiente de ponderação das resistências.

γ: 1.2

A força normal de flambagem elástica **N_e** é o menor valor entre os obtidos por a), b) e c):

N_e: 1677.45 kN

a) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo X.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2}$$

N_{ex}: 1679.03 kN

b) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y.

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2}$$

N_{ey}: 1677.45 kN

c) Força normal de flambagem elástica por torção.

Não é necessário, dado que o comprimento efetivo de flambagem por torção, **K_tL_t**, é nula.

Onde:

I_x: Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo X.

I_x: 937.93 cm⁴

I_y: Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo Y.

I_y: 937.93 cm⁴

E: Módulo de elasticidade.

E: 200000 MPa

K_xL_x: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

K_xL_x: 3.321 m

K_yL_y: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo Y.

K_yL_y: 3.322 m

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

η: 0.305 ✓

O momento fletor desfavorável de cálculo M_{Sd} é obtido para o nó N33, para a combinação de hipóteses PP+CP3Y.

$$M_{Sd} : \underline{5.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como o menor valor calculado em a) y b):

$$M_{Rd} : \underline{16.50} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

a) Início de escoamento da la seção efetiva (9.8.2.1)

$$M_{Rd} = W_{ef} f_y / \gamma$$

$$M_{Rd} : \underline{16.50} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Onde:

W_{ef} : Módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 9.2, com σ calculada para o estado limite último de escoamento da seção.

f_y : Tensão de escoamento.

γ : Coeficiente de ponderação das resistências.

$$W_{ef} : \underline{125.06} \text{ cm}^3$$

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

$$\gamma : \underline{1.1}$$

b) Flambagem lateral com torção (9.8.2.2)

Não procede, pois o comprimento efetivo de flambagem lateral por torção $K_t L_t$ e os comprimentos efetivos de flambagem lateral $K_y L_y^{pos}$ e $K_y L_y^{neg}$ são nulos.

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.023} \checkmark$$

O momento fletor desfavorável de cálculo M_{Sd} é obtido para o nó N23, para a combinação de hipóteses 1.25·PP.

$$M_{Sd} : \underline{0.39} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como:

$$M_{Rd} : \underline{16.50} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{Rd} = W_{ef} f_y / \gamma$$

Onde:

W_{ef} : Módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 9.2, com σ calculada para o estado limite último de escoamento da seção.

$$W_{ef} : \underline{125.06} \text{ cm}^3$$

f_y : Tensão de escoamento.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ : Coeficiente de ponderação das resistências.

$$\gamma : \underline{1.1}$$

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{w,Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.001} \quad \checkmark$$

O esforço cortante solicitante de cálculo desfavorável V_{Sd} produz-se para a combinação de hipóteses 1.25·PP.

$$V_{Sd} : \underline{0.13} \text{ kN}$$

A seção é composta por duas almas iguais. Sobre cada uma delas, o esforço de cálculo é $V_{Sd} = 0.5 V_{Sd}$.

$$V_{Sd} : \underline{0.07} \text{ kN}$$

A força cortante resistente de cálculo da alma V_{Rd} deve ser calculada por:

$$^{(1)}V_{Rd} : \underline{49.25} \text{ kN}$$

$$\text{para } ^{(1)}h/t \leq 1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.6f_yht/\gamma$$

$$1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} : \underline{89.66}$$

$$\text{para } ^{(2)}1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} < h/t \leq 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.65t^2(k_v f_y E)^{0.5}/\gamma$$

$$h/t : \underline{27.58}$$

$$\text{para } ^{(3)}h/t > 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = [0.905Ek_v t^3/h]/\gamma$$

$$1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} : \underline{116.22}$$

Onde:

t: Espessura da alma.

$$t : \underline{4.75} \text{ mm}$$

h: Largura da alma.

$$h : \underline{131.00} \text{ mm}$$

f_y : Tensão de escoamento.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

E: Módulo de elasticidade.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

γ : Coeficiente de ponderação das resistências.

$$\gamma : \underline{1.1}$$

K_v : Coeficiente de flambagem local por cisalhamento, que para a alma sem enrijecedores transversais é dado por:

$$K_v : \underline{5.00}$$

$$k_v = 5.00$$

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{w,Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.020} \quad \checkmark$$

O esforço cortante solicitante de cálculo desfavorável V_{Sd} produz-se para a combinação de hipóteses PP+CP3Y.

$$V_{Sd} : \underline{1.98 \text{ kN}}$$

A seção é composta por duas almas iguais. Sobre cada uma delas, o esforço de cálculo é $V_{Sd} = 0.5 V_{Sd}$.

$$V_{Sd} : \underline{0.99 \text{ kN}}$$

A força cortante resistente de cálculo da alma V_{Rd} deve ser calculada por:

$$^{(1)}V_{Rd} : \underline{49.25 \text{ kN}}$$

$$\text{para } ^{(1)}h/t \leq 1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.6f_yht/\gamma$$

$$1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} : \underline{89.66}$$

$$\text{para } ^{(2)}1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} < h/t \leq 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.65t^2(k_v f_y E)^{0.5}/\gamma$$

$$h/t : \underline{27.58}$$

$$\text{para } ^{(3)}h/t > 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = [0.905Ek_v t^3/h]/\gamma$$

$$1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} : \underline{116.22}$$

Onde:

t: Espessura da alma.

$$t : \underline{4.75 \text{ mm}}$$

h: Largura da alma.

$$h : \underline{131.00 \text{ mm}}$$

f_y: Tensão de escoamento.

$$f_y : \underline{145.10 \text{ MPa}}$$

E: Módulo de elasticidade.

$$E : \underline{200000 \text{ MPa}}$$

γ: Coeficiente de ponderação das resistências.

$$\gamma : \underline{1.1}$$

K_v: Coeficiente de flambagem local por cisalhamento, que para a alma sem enrijecedores transversais é dado por:

$$K_v : \underline{5.00}$$

$$k_v = 5.00$$

Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Os esforços de cálculo desfavoráveis M_{Sd} e V_{Sd} são obtidos no nó N33, para a combinação de hipóteses PP+CP3Y.

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante de cálculo e a força cortante solicitante de cálculo devem satisfazer à seguinte expressão de interação:

$$\eta = \left(\frac{M_{Sd}}{M_{0,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{0,Rd}} \right)^2$$

$$\eta : \underline{0.093} \checkmark$$

Onde:

M_{Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo.

$$M_{Sd} : \underline{5.03 \text{ kN}\cdot\text{m}}$$

M_{0,Rd}: Momento fletor resistente de cálculo conforme 9.8.2.1.

$$M_{0,Rd} : \underline{16.50 \text{ kN}\cdot\text{m}}$$

V_{Sd}: Força cortante solicitante de cálculo.

$$V_{Sd} : \underline{1.98 \text{ kN}}$$

V_{Rd}: Força cortante resistente de cálculo conforme 9.8.3.

$$V_{Rd} : \underline{98.50 \text{ kN}}$$

Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Os esforços de cálculo desfavoráveis M_{Sd} e V_{Sd} são obtidos no nó N23, para a combinação de hipóteses 1.25·PP.

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante de cálculo e a força cortante solicitante de cálculo devem satisfazer à seguinte expressão de interação:

$$\eta = \left(\frac{M_{Sd}}{M_{0,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{0,Rd}} \right)^2 \quad \eta : \underline{0.001} \checkmark$$

Onde:

M_{Sd} : Momento fletor solicitante de cálculo.

$M_{Sd} : 0.39 \text{ kN}\cdot\text{m}$

$M_{0,Rd}$: Momento fletor resistente de cálculo conforme 9.8.2.1.

$M_{0,Rd} : 16.50 \text{ kN}\cdot\text{m}$

V_{Sd} : Força cortante solicitante de cálculo.

$V_{Sd} : 0.13 \text{ kN}$

V_{Rd} : Força cortante resistente de cálculo conforme 9.8.3.

$V_{Rd} : 98.50 \text{ kN}$

Resistência à flexo-compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

Os esforços de cálculo desfavoráveis são obtidos no nó N33, para a combinação de hipóteses 1.1·PP+CP3Z+CP3Y+CP3X.

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1 \quad \eta : \underline{0.400} \checkmark$$

Onde:

$N_{c,Sd}$: Força normal de compressão solicitante de cálculo.

$N_{c,Sd} : 24.59 \text{ kN}$

$M_{x,Sd}$, $M_{y,Sd}$: Momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente.

$M_{x,Sd} : 5.03 \text{ kN}\cdot\text{m}$

$M_{y,Sd} : 0.20 \text{ kN}\cdot\text{m}$

$N_{c,Rd}$: Força normal de compressão resistente de cálculo, conforme 9.7.

$N_{c,Rd} : 296.10 \text{ kN}$

$M_{x,Rd}$, $M_{y,Rd}$: Momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente, calculados conforme 9.8.2.

$M_{x,Rd} : 16.50 \text{ kN}\cdot\text{m}$

$M_{y,Rd} : 16.50 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Resistência à torção (Critério da CYPE)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{T,Sd}}{M_{T,Rd}} \leq 1 \quad \eta : \underline{0.005} \checkmark$$

O momento tissor solicitante de cálculo desfavorável $M_{t,Sd}$ produz-se para a combinação de hipóteses PP+CP3Y. $M_{t,Sd} : 0.08 \text{ kN}\cdot\text{m}$

O momento tissor resistente de cálculo $M_{t,Rd}$ é dado por:

$$M_{t,Rd} = 0.6 f_y W_T / \gamma$$

$$M_{t,Rd} : 15.83 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Onde:

W_T : módulo de resistência à torção

$$W_T : 200.01 \text{ cm}^3$$

f_y : Tensão de escoamento.

$$f_y : 145.10 \text{ MPa}$$

γ : Coeficiente de ponderação das resistências.

$$\gamma : 1.1$$

Verificação Contraventamento

Perfil: 60x60x3

Material: Aço (A36 - Tensão de Projeto)

Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
Inicial	Final		Área (cm ²)	I _x ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
N39	N10	4.070	6.60	35.00	35.00	57.03

Notas:

⁽¹⁾ Inércia em relação ao eixo indicado

⁽²⁾ Momento de inércia à torção uniforme

	Flambagem		Flambagem lateral	
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.
β	0.81	0.72	0.00	0.00
L _K	3.277	2.921	0.000	0.000
C _m	-	-	1.000	1.000
C _b	-		1.000	

Notação:

β: Coeficiente de flambagem

L_K: Comprimento de flambagem (m)

C_m: Coeficiente de momentos

C_b: Fator de modificação para o momento crítico

Resistência à tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.6)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : 0.002 \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N10, para a combinação de ações PP+CP3Y.

$N_{t,Sd}$: Esforço axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável.

$$N_{t,Sd} : 0.21 \text{ kN}$$

A força normal de tração resistente de cálculo $N_{t,Rd}$ deve ser tomada como:

$$N_{t,Rd} = A f_y / \gamma$$

$$N_{t,Rd} : \underline{87.10} \text{ kN}$$

Onde:

A : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A : \underline{6.60} \text{ cm}^2$$

f_y : Tensão de escoamento.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ : Coeficiente de ponderação das resistências.

$$\gamma : \underline{1.1}$$

Resistência à compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.033} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N39, para a combinação de ações 1.1·PP+CP1Z+CP1Y+CP1X.

$N_{c,Sd}$: Força normal de compressão solicitante de cálculo.

$$N_{c,Sd} : \underline{1.41} \text{ kN}$$

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como:

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma$$

$$N_{c,Rd} : \underline{42.81} \text{ kN}$$

Onde:

A_{ef} : Área efetiva da seção transversal da barra.

$$A_{ef} : \underline{6.60} \text{ cm}^2$$

χ : Fator de redução associado à flambagem, $\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$

$$\chi_{xx} : \underline{0.61}$$

$$\chi_{yy} : \underline{0.54}$$

Sendo:

λ_0 : Índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas.

$$\lambda_{0, xx} : \underline{1.09}$$

$$\lambda_{0, yy} : \underline{1.22}$$

$$\lambda_0 = \left[\frac{A f_y}{N_e} \right]^{0.5}$$

Sendo:

N_e: Força normal de flambagem elástica da barra, conforme 9.7.2.

A: Área bruta da seção transversal da barra.

A: 6.60 cm²

f_y: Tensão de escoamento.

f_y: 145.10 MPa

γ: Coeficiente de ponderação das resistências.

γ: 1.2

A força normal de flambagem elástica **N_e** é o menor valor entre os obtidos por a), b) e c):

N_e: 64.33 kN

a) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo X.

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

N_{ex}: 80.99 kN

b) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y.

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

N_{ey}: 64.33 kN

c) Força normal de flambagem elástica por torção.

Não é necessário, dado que o comprimento efetivo de flambagem por torção, **K_tL_t**, é nula.

Onde:

I_x: Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo X.

I_x: 35.00 cm⁴

I_y: Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo Y.

I_y: 35.00 cm⁴

E: Módulo de elasticidade.

E: 200000 MPa

K_xL_x: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

K_xL_x: 2.921 m

K_yL_y: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo Y.

K_yL_y: 3.277 m

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

η: 0.108 ✓

O momento fletor desfavorável de cálculo **M_{Sd}** é obtido para o nó N10, para a combinação de hipóteses 1.1·PP+CP1Z+CP1Y+CP1X.

M_{Sd}: 0.17 kN·m

O momento fletor resistente de cálculo **M_{Rd}** deve ser tomado como:

M_{Rd}: 1.54 kN·m

$$M_{Rd} = W_{ef} f_y / \gamma$$

Onde:

W_{ef}: Módulo de resistência elástica da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 9.2, com σ calculada para o estado limite último de escoamento da seção.

f_y: Tensão de escoamento.

γ: Coeficiente de ponderação das resistências.

$$W_{ef} : \underline{11.67} \text{ cm}^3$$

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

$$\gamma : \underline{1.1}$$

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{w,Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.003} \checkmark$$

O esforço cortante solicitante de cálculo desfavorável **V_{Sd}** produz-se para a combinação de hipóteses 1.1·PP+CP1Z+CP1Y+CP1X.

$$V_{Sd} : \underline{0.06} \text{ kN}$$

A seção é composta por duas almas iguais. Sobre cada uma delas, o esforço de cálculo é **V_{Sd} = 0.5 V_{Sd}**.

$$V_{Sd} : \underline{0.03} \text{ kN}$$

A força cortante resistente de cálculo da alma **V_{Rd}** deve ser calculada por:

$$^{(1)}V_{Rd} : \underline{11.40} \text{ kN}$$

$$\text{para } ^{(1)}h/t \leq 1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.6f_y h t / \gamma$$

$$1.08(EK_v/f_y)^{0.5} : \underline{89.66}$$

$$\text{para } ^{(2)}1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} < h/t \leq 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.65t^2(k_v f_y E)^{0.5} / \gamma$$

$$h/t : \underline{16.00}$$

$$\text{para } ^{(3)}h/t > 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = [0.905Ek_v t^3 / h] / \gamma$$

$$1.4(EK_v/f_y)^{0.5} : \underline{116.22}$$

Onde:

t: Espessura da alma.

$$t : \underline{3.00} \text{ mm}$$

h: Largura da alma.

$$h : \underline{48.00} \text{ mm}$$

f_y: Tensão de escoamento.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

E: Módulo de elasticidade.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

γ: Coeficiente de ponderação das resistências.

$$\gamma : \underline{1.1}$$

K_v: Coeficiente de flambagem local por cisalhamento, que para a alma sem enrijecedores transversais é dado por:

$$K_v : \underline{5.00}$$

$$k_v = 5.00$$

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{w,Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.005} \quad \checkmark$$

O esforço cortante solicitante de cálculo desfavorável V_{Sd} produz-se no nó N39, para a combinação de hipóteses 1.25·PP.

$$V_{Sd} : \underline{0.10} \text{ kN}$$

A seção é composta por duas almas iguais. Sobre cada uma delas, o esforço de cálculo é $V_{Sd} = 0.5 V_{Sd}$.

$$V_{Sd} : \underline{0.05} \text{ kN}$$

A força cortante resistente de cálculo da alma V_{Rd} deve ser calculada por:

$$^{(1)}V_{Rd} : \underline{11.40} \text{ kN}$$

$$\text{para } ^{(1)}h/t \leq 1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.6f_yht/\gamma$$

$$1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} : \underline{89.66}$$

$$\text{para } ^{(2)}1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} < h/t \leq 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.65t^2(k_v f_y E)^{0.5}/\gamma$$

$$h/t : \underline{16.00}$$

$$\text{para } ^{(3)}h/t > 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = [0.905Ek_v t^3/h]/\gamma$$

$$1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} : \underline{116.22}$$

Onde:

t: Espessura da alma.

$$t : \underline{3.00} \text{ mm}$$

h: Largura da alma.

$$h : \underline{48.00} \text{ mm}$$

f_y: Tensão de escoamento.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

E: Módulo de elasticidade.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

γ: Coeficiente de ponderação das resistências.

$$\gamma : \underline{1.1}$$

K_v: Coeficiente de flambagem local por cisalhamento, que para a alma sem enrijecedores transversais é dado por:

$$K_v : \underline{5.00}$$

$$k_v = 5.00$$

Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.4)

Os esforços de cálculo desfavoráveis M_{Sd} e V_{Sd} são obtidos no nó N10, para a combinação de hipóteses 1.1·PP+CP1Z+CP1Y+CP1X.

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante de cálculo e a força cortante solicitante de cálculo devem satisfazer à seguinte expressão de interação:

$$\eta : \underline{0.012} \quad \checkmark$$

$$\eta = \left(\frac{M_{Sd}}{M_{0,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{0,Rd}} \right)^2$$

Onde:

M_{Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo.

M_{Sd} : 0.17 kN·m

M_{0,Rd}: Momento fletor resistente de cálculo conforme 9.8.2.1.

M_{0,Rd} : 1.54 kN·m

V_{Sd}: Força cortante solicitante de cálculo.

V_{Sd} : 0.06 kN

V_{Rd}: Força cortante resistente de cálculo conforme 9.8.3.

V_{Rd} : 22.79 kN

Resistência à flexo-compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

Os esforços de cálculo desfavoráveis são obtidos no nó N10, para a combinação de hipóteses 1.1·PP+CP1Z+CP1Y+CP1X.

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

η : 0.159 ✓

Onde:

N_{c,Sd}: Força normal de compressão solicitante de cálculo.

N_{c,Sd} : 1.25 kN

M_{x,Sd}, M_{y,Sd}: Momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente.

M_{x,Sd} : 0.03 kN·m

M_{y,Sd} : 0.17 kN·m

N_{c,Rd}: Força normal de compressão resistente de cálculo, conforme 9.7.

N_{c,Rd} : 42.81 kN

M_{x,Rd}, M_{y,Rd}: Momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente, calculados conforme 9.8.2.

M_{x,Rd} : 1.54 kN·m

M_{y,Rd} : 1.54 kN·m

Resistência à torção (Critério da CYPE Ingenieros)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{t,Sd}}{M_{t,Rd}} \leq 1$$

η : 0.014 ✓

O momento torsor solicitante de cálculo desfavorável **M_{t,Sd}** produz-se para a combinação de hipóteses 1.1·PP+CP3Z+CP3Y.

M_{t,Sd} : 0.02 kN·m

O momento torsor resistente de cálculo **M_{t,Rd}** é dado por:

$$M_{t,Rd} = 0.6 f_y W_T / \gamma$$

M_{t,Rd} : 1.53 kN·m

Onde:

W_t : módulo de resistência à torção

f_y : Tensão de escoamento.

γ : Coeficiente de ponderação das resistências.

W_t : 19.39 cm³

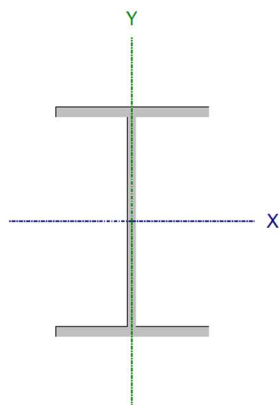
f_y : 145.10 MPa

γ : 1.1

Verificação Viga Suporte Contraventamento

Perfil: W 150 x 18

Material: Aço (A36 - Tensão de Projeto)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
Inicial	Final		Área (cm ²)	I _x ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
N8	N9	6.000	23.40	939.00	126.00	4.34
Notas: ⁽¹⁾ Inércia em relação ao eixo indicado ⁽²⁾ Momento de inércia à torção uniforme						
	Flambagem		Flambagem lateral			
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.		
β	0.95	0.52	0.00	0.00		
L _k	5.697	3.115	0.000	0.000		
C _b	-		1.000			
Notação: β: Coeficiente de flambagem L _k : Comprimento de flambagem (m) C _b : Fator de modificação para o momento crítico						

Resistência à tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

η : 0.002 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações 1.3·PP+CP1Z.

$N_{t,Sd}$: Força axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável.

$N_{t,Sd}$: 0.77 kN

A força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, deve ser determinada pela expressão:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$N_{t,Rd}$: 308.67 kN

Onde:

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

A_g : 23.40 cm²

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1} : 1.10

Resistência à flexão eixo X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.037} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N9, para a combinação de ações 1.3·PP+CP1Z+CP1X.

M_{Sd} : Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$M_{Sd} : \underline{0.67} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Já que ' $\lambda \leq \lambda_r$ ', deve-se considerar viga de alma não-esbelta (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G).

$$23.93 \leq 211.62$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{23.93}$$

Sendo:

h : Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

$$h : \underline{138.80} \text{ mm}$$

t_w : Espessura da alma.

$$t_w : \underline{5.80} \text{ mm}$$

$$\lambda_r = 5.70 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_r : \underline{211.62}$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} de vigas de alma não-esbelta deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções:

$$M_{Rd} : \underline{18.39} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

- (a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$M_{Rd} = \frac{1.50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{Rd} : \underline{24.29} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Onde:

W_x : Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

$$W_x : \underline{122.75} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

- (b) Estado-límite último de flambagem lateral com torção, FLT (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

Não é necessário, pois o comprimento de flambagem lateral é nulo.

- (c) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$7.18 \leq 14.11$$

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{Rd} : \underline{18.39} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f/2}{t_f}$$

$$\lambda : \underline{7.18}$$

Sendo:

b_f: Largura da mesa comprimida.

$$b_f : \underline{102.00} \text{ mm}$$

t_f: Espessura da mesa comprimida.

$$t_f : \underline{7.10} \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_p : \underline{14.11}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

$$M_{pl} : \underline{20.23} \text{ kN}$$

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : \underline{139.40} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

(d) Estado-limite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$23.93 \leq 139.59$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{Rd} : \underline{18.39} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{23.93}$$

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

$$h : \underline{138.80} \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \underline{5.80} \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_p : \underline{139.59}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

$$M_{pl} : \underline{20.23} \text{ kN}$$

Onde:

Z_x : Módulo de resistência plástico.

Z_x : 139.40 cm³

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

Resistência à flexão eixo Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

η : 0.073 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N8, para a combinação de ações PP+CP1Y.

M_{Sd} : Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

M_{Sd} : 0.35 kN·m

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como o menor valor entre os obtidos nas seguintes seções:

M_{Rd} : 4.89 kN·m

(a) Máximo momento fletor resistente de cálculo (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2.2):

$$M_{Rd} = \frac{1.50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 4.89 kN·m

Onde:

W_y : Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

W_y : 24.71 cm³

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

(b) Estado-límite último de flambagem local da mesa comprimida, FLM (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

7.18 ≤ 14.11

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 5.08 kN·m

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f/2}{t_f}$$

λ : 7.18

Sendo:

b_f : Largura da mesa comprimida.

b_f : 102.00 mm

t_f : Espessura da mesa comprimida.

t_f : 7.10 mm

$$\lambda_p = 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

λ_p : 14.11

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

M_{pl} : 5.59 kN

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico.

Z_y : 38.50 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

(c) Estado-limite último de flambagem local da alma, FLA (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

23.93 ≤ 41.58

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

M_{Rd} : 5.08 kN·m

Onde:

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

λ : 23.93

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

h : 138.80 mm

t_w: Espessura da alma.

t_w : 5.80 mm

$$\lambda_p = 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

λ_p : 41.58

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

M_{pl} : 5.59 kN

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico.

Z_y : 38.50 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

η : 0.001 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações PP+CP1Y.

V_{Sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

V_{Sd} : 0.11 kN

A força cortante resistente de cálculo, **V_{Rd}**, é determinada pela expressão:

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$7.18 \leq 44.74$$

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

V_{Rd} : 114.63 kN

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f/2}{t_f}$$

λ : 7.18

Sendo:

b_f: Largura das mesas.

b_f : 102.00 mm

t_f: Espessura das mesas.

t_f : 7.10 mm

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}}$$

λ_p : 44.74

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem.

k_v : 1.20

E: Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 145.10 MPa

$$V_{pl} = 0.60 \cdot A_w \cdot f_y$$

V_{pl} : 126.10 kN

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w = 2 \cdot b_f \cdot t_f$$

A_w : 14.48 cm²

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

η : 0.012 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N9, para a combinação de ações 1.5·PP.

V_{Sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

V_{Sd} : 0.81 kN

A força cortante resistente de cálculo, **V_{Rd}**, é determinada pela expressão:

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$23.93 \leq 91.32$$

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$V_{Rd} : 70.23 \text{ kN}$$

Onde:

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

$$\lambda : 23.93$$

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distancia entre as faces internas das mesas.

$$h : 138.80 \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : 5.80 \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}}$$

$$\lambda_p : 91.32$$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem.

$$k_v : 5.00$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : 200000 \text{ MPa}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 145.10 \text{ MPa}$$

$$V_{pl} = 0.60 \cdot A_w \cdot f_y$$

$$V_{pl} : 77.26 \text{ kN}$$

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w = d \cdot t_w$$

$$A_w : 8.87 \text{ cm}^2$$

d: Altura total da seção transversal.

$$d : 153.00 \text{ mm}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : 1.10$$

Resistência ao esforço axial e flexão combinados (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.1.2)

Deve satisfazer:

$$\eta \leq 1$$

$$\eta : 0.102 \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N9, para a combinação de ações 1.3·PP+CP1Z+CP1Y+CP1X.

N_{t,Sd}: Força axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável.

$$N_{t,Sd} : 0.77 \text{ kN}$$

M_{x,Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$M_{x,Sd} : 0.67 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

M_{y,Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.

$$M_{y,Sd} : 0.31 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$0.002 < 0.200$$

$$N_{Sd} / N_{Rd} < 0.2$$

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{2 \cdot N_{t,Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.102}$$

Onde:

N_{t,Rd}: Força axial resistente de cálculo de tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2).

$$N_{t,Rd} : \underline{308.67} \text{ kN}$$

M_{x,Rd}, M_{y,Rd}: Momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos X e Y da seção transversal (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2).

$$M_{x,Rd} : \underline{18.39} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{y,Rd} : \underline{4.89} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Resistência a interações de esforços e momento de torção (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{|\tau_{Sd}|}{\tau_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.012} \checkmark$$

O coeficiente de aproveitamento desfavorável produz-se no nó N9, para a combinação de ações 1.3·PP+CP3Y+CP3X no ponto da seção transversal de coordenadas X = 0.00 mm, Y = 0.00 mm em relação ao centro de gravidade.

As tensões tangenciais τ_{Sd} são dadas por:

$$\tau_{Sd} = \tau_{V_{x,Sd}} + \tau_{V_{y,Sd}} + \tau_{T_{Sd}}$$

$$\tau_{Sd} : \underline{-0.96} \text{ MPa}$$

Onde:

$$\tau_{V_{x,Sd}} = -\frac{\bar{S}_y}{I_y \cdot t} \cdot V_{x,Sd}$$

$$\tau_{V_{x,Sd}} : \underline{0.00} \text{ MPa}$$

Sendo:

V_{x,Sd}⁺: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$$V_{x,Sd}^+ : \underline{0.08} \text{ kN}$$

S_y: Momento estático, em relação ao eixo Y, da parte da seção situada a um lado do ponto de verificação.

$$S_y : \underline{0.00} \text{ cm}^3$$

I_y: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y.

$$I_y : \underline{126.00} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

$$t : \underline{5.80} \text{ mm}$$

$$\tau_{V_{y,Sd}} = -\frac{\bar{S}_x}{I_x \cdot t} \cdot V_{y,Sd}$$

$$\tau_{V_{y,Sd}} : \underline{-0.96} \text{ MPa}$$

Sendo:

V_{y,Sd}⁺: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

$$V_{y,Sd}^+ : \underline{0.77} \text{ kN}$$

S_x: Momento estático, em relação ao eixo X, da parte da seção situada a um lado do ponto de verificação.

$$S_x : \underline{68.26} \text{ cm}^3$$

I_x: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X.

$$I_x : \underline{939.00} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

$$t : \underline{5.80} \text{ mm}$$

$$\tau_{Tsd} = \pm \frac{t}{J} \cdot T_{sd}$$

$$\tau_{Tsd} : \underline{0.00} \text{ MPa}$$

Sendo:

T_{sd}: Momento de torção solicitante de cálculo, desfavorável.

$$T_{sd} : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

J: Constante de torção da seção transversal.

$$J : \underline{4.34} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

$$t : \underline{5.80} \text{ mm}$$

A tensão resistente de cálculo, τ_{Rd} , é dada pelo menor valor entre os obtidos por a) e b):

$$\tau_{Rd} : \underline{77.15} \text{ MPa}$$

(a) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de escoamento sob efeito de tensão de cisalhamento:

$$\tau_{Rd} = \frac{0.60 \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$\tau_{Rd} : \underline{79.15} \text{ MPa}$$

Onde:

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

(b) Tensão resistente de cálculo para os estados-limites de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão de cisalhamento:

$$\tau_{Rd} = \frac{0.60 \cdot \chi \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$\tau_{Rd} : \underline{77.15} \text{ MPa}$$

Onde:

χ: Fator de redução total associado à resistência à compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.3).

$$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$$

$$\chi : \underline{0.975}$$

Sendo:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{0.60 \cdot f_y}{\tau_e}}$$

$$\lambda_0 : \underline{0.247}$$

$$\tau_e = k_v \cdot \sigma_E$$

$$\tau_e : \underline{1428.31} \text{ MPa}$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h}\right)^2$$

$$\sigma_E : \underline{285.66} \text{ MPa}$$

Onde:

k_v: Coeficiente de flambagem (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.3).

$$k_v : \underline{5.00}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

ν: Coeficiente de Poisson.

$$\nu : \underline{0.30}$$

t: Espessura.

$$t : \underline{5.80} \text{ mm}$$

h: Largura.

$$h : \underline{145.90} \text{ mm}$$

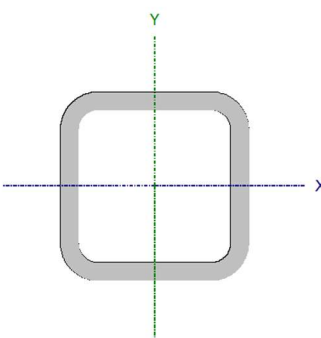
f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \underline{1.10}$$

Verificação Mão Francesa
Perfil: 40x40x4
Material: Aço (A36 - Tensão de Projeto)



Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
Inicial	Final		Área (cm ²)	I _x ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
N25	N26	1.250	5.34	10.92	10.92	19.31
Notas: ⁽¹⁾ Inércia em relação ao eixo indicado ⁽²⁾ Momento de inércia à torção uniforme						
	Flambagem		Flambagem lateral			
	Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.		
β	0.69	0.67	0.00	0.00		
L _k	0.860	0.839	0.000	0.000		
C _m	-	-	1.000	1.000		
C _b	-		1.000			
Notação: β: Coeficiente de flambagem L _k : Comprimento de flambagem (m) C _m : Coeficiente de momentos C _b : Fator de modificação para o momento crítico						

Resistência à compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.381} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N25, para a combinação de ações 1.1·PP+CP1Z+CP1Y.

N_{c,Sd}: Força normal de compressão solicitante de cálculo.

$$\underline{N_{c,Sd} : 22.01 \text{ kN}}$$

 A força normal de compressão resistente de cálculo **N_{c,Rd}** deve ser tomada como:

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma$$

$$\underline{N_{c,Rd} : 57.75 \text{ kN}}$$

Onde:

A_{ef}: Área efetiva da seção transversal da barra.

$$\underline{A_{ef} : 5.34 \text{ cm}^2}$$

 χ: Fator de redução associado à flambagem, $\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$

$$\underline{\chi_{xx} : 0.90}$$

$$\underline{\chi_{yy} : 0.89}$$

Sendo:

 λ₀: Índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas.

$$\underline{\lambda_{0, xx} : 0.50}$$

$$\underline{\lambda_{0, yy} : 0.52}$$

$$\lambda_0 = \left[\frac{Af_y}{N_e} \right]^{0.5}$$

Sendo:

N_e: Força normal de flambagem elástica da barra, conforme 9.7.2.

A: Área bruta da seção transversal da barra.

A: 5.34 cm²

f_y: Tensão de escoamento.

f_y: 145.10 MPa

γ: Coeficiente de ponderação das resistências.

γ: 1.2

A força normal de flambagem elástica **N_e** é o menor valor entre os obtidos por a), b) e c):

N_e: 291.32 kN

a) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo X.

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

N_{ex}: 306.10 kN

b) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y.

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

N_{ey}: 291.32 kN

c) Força normal de flambagem elástica por torção.

Não é necessário, dado que o comprimento efetivo de flambagem por torção, **K_tL_t**, é nula.

Onde:

I_x: Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo X.

I_x: 10.92 cm⁴

I_y: Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo Y.

I_y: 10.92 cm⁴

E: Módulo de elasticidade.

E: 200000 MPa

K_xL_x: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

K_xL_x: 0.839 m

K_yL_y: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo Y.

K_yL_y: 0.860 m

Resistência ao esforço cortante X (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{w,Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

η: 0.002 ✓

O esforço cortante solicitante de cálculo desfavorável V_{Sd} produz-se para a combinação de hipóteses 1.1·PP+CP1Z+CP1Y+CP1X.

$$V_{Sd} : \underline{0.03} \text{ kN}$$

A seção é composta por duas almas iguais. Sobre cada uma delas, o esforço de cálculo é $V_{Sd} = 0.5 V_{Sd}$.

$$V_{Sd} : \underline{0.02} \text{ kN}$$

A força cortante resistente de cálculo da alma V_{Rd} deve ser calculada por:

$$^{(1)}V_{Rd} : \underline{7.60} \text{ kN}$$

para $^{(1)}h/t \leq 1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.6f_yht/\gamma$

$$1.08(EK_v/f_y)^{0.5} : \underline{89.66}$$

para $^{(2)}1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} < h/t \leq 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.65t^2(k_v f_y E)^{0.5}/\gamma$

$$h/t : \underline{6.00}$$

para $^{(3)}h/t > 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = [0.905Ek_v t^3/h]/\gamma$

$$1.4(EK_v/f_y)^{0.5} : \underline{116.22}$$

Onde:

t: Espessura da alma.

$$t : \underline{4.00} \text{ mm}$$

h: Largura da alma.

$$h : \underline{24.00} \text{ mm}$$

f_y: Tensão de escoamento.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

E: Módulo de elasticidade.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

γ : Coeficiente de ponderação das resistências.

$$\gamma : \underline{1.1}$$

K_v: Coeficiente de flambagem local por cisalhamento, que para a alma sem enrijecedores transversais é dado por:

$$K_v : \underline{5.00}$$

$$k_v = 5.00$$

Resistência ao esforço cortante Y (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.8.3)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{w,Sd}}{V_{Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.004} \checkmark$$

O esforço cortante solicitante de cálculo desfavorável V_{Sd} produz-se no nó N26, para a combinação de hipóteses 1.1·PP+CP1Z.

$$V_{Sd} : \underline{0.06} \text{ kN}$$

A seção é composta por duas almas iguais. Sobre cada uma delas, o esforço de cálculo é $V_{Sd} = 0.5 V_{Sd}$.

$$V_{Sd} : \underline{0.03} \text{ kN}$$

A força cortante resistente de cálculo da alma V_{Rd} deve ser calculada por:

$$^{(1)}V_{Rd} : \underline{7.60} \text{ kN}$$

para $^{(1)}h/t \leq 1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.6f_yht/\gamma$

$$1.08(EK_v/f_y)^{0.5} : \underline{89.66}$$

$$\text{para } {}^{(2)}1.08(Ek_v/f_y)^{0.5} < h/t \leq 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = 0.65t^2(k_v f_y E)^{0.5} / \gamma$$

$$h/t : \underline{6.00}$$

$$\text{para } {}^{(3)}h/t > 1.4(Ek_v/f_y)^{0.5} \rightarrow V_{Rd} = [0.905Ek_v t^3 / h] / \gamma$$

$$1.4(EK_v/f_y)^{0.5} : \underline{116.22}$$

Onde:

t: Espessura da alma.

$$t : \underline{4.00} \text{ mm}$$

h: Largura da alma.

$$h : \underline{24.00} \text{ mm}$$

f_y: Tensão de escoamento.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

E: Módulo de elasticidade.

$$E : \underline{200000} \text{ MPa}$$

γ: Coeficiente de ponderação das resistências.

$$\gamma : \underline{1.1}$$

K_v: Coeficiente de flambagem local por cisalhamento, que para a alma sem enrijecedores transversais é dado por:

$$K_v : \underline{5.00}$$

$$k_v = 5.00$$

Resistência à torção (Critério da CYPE)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{T,Sd}}{M_{T,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.016} \checkmark$$

O momento torsor solicitante de cálculo desfavorável **M_{t,Sd}** produz-se para a combinação de hipóteses PP+CP1Z+CP1Y+CP1X.

$$M_{t,Sd} : \underline{0.01} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

O momento torsor resistente de cálculo **M_{t,Rd}** é dado por:

$$M_{t,Rd} = 0.6 f_y W_T / \gamma$$

$$M_{t,Rd} : \underline{0.80} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Onde:

W_t: módulo de resistência à torção

$$W_t : \underline{10.12} \text{ cm}^3$$

f_y: Tensão de escoamento.

$$f_y : \underline{145.10} \text{ MPa}$$

γ: Coeficiente de ponderação das resistências.

$$\gamma : \underline{1.1}$$



CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conforme exposto nesse Memorial de Cálculo, os equipamentos aqui descritos se encontram em conformidade e podem ser utilizados para as atividades a que se destinam, não podendo ultrapassar a capacidade de carga estipulada.

Nenhum item do sistema deve ser inserido, retirado ou modificado, sem autorização expressa, o que resultará na invalidação deste relatório.

Atenciosamente,

Luís Eduardo Wiechoreck
Engenheiro Mecânico
Engenheiro de Segurança do Trabalho
CREA RS2211066380

Robson Monteiro
Técnico de Manutenção