

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
PODER JUDICIÁRIO DO ESTADO DO ACRE
GERÊNCIA DE INSTALAÇÕES

PROJETO DE ENGENHARIA
DA ESCADA EXTERNA
PARA O FÓRUM CRIMINAL

VOLUME ÚNICO
RELATÓRIO DE PROJETO, ORÇAMENTO
COM PLANEJAMENTO DA OBRA E
DETALHAMENTO GRÁFICO

OUTUBRO / 2019

ÍNDICE

ÍNDICE

1	-	APRESENTAÇÃO	01
2	-	MEMORIAL DESCRITIVO	03
2.1	-	Introdução	04
2.2	-	Dos Materiais Usados	04
2.3	-	Dos Concretos	04
3	-	MEMÓRIA DO CÁLCULO ESTRUTURAL	05
4	-	ORÇAMENTO	61
4.1	-	Preâmbulos Gerais	62
4.2	-	Resumo do Orçamento	63
4.3	-	Planilha Analítica	65
5	-	CRONOGRAMA FÍSICO-FINANCEIRO	69
6	-	CURVA ABC DE SERVIÇOS	71
7	-	COMPOSIÇÕES DE CUSTO	74
7.1	-	Composições Unitárias Próprias	75
7.2	-	Composições de BDI (Benefício e Despesas Indiretas)	78
7.3	-	Composições de Leis Sociais	80
8	-	COTAÇÕES	82
8.1	-	Matriz de Cotações	83
9	-	MEMÓRIA DAS QUANTIDADES	104
10	-	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	108
10.1	-	Disposições Gerais	109
10.2	-	Serviços Preliminares	118
10.3	-	Instalações do Canteiro de Obras e Acompanhamento Técnico	123
10.4	-	Estrutura Metálica	130
10.5	-	Instalações Elétricas	144
10.6	-	Estruturas em Concreto Armado	169
11	-	ART	179
12	-	DETALHAMENTO GRÁFICO	181

1. APRESENTAÇÃO

A empresa Vetor Engenharia Ltda, apresenta ao Tribunal de Justiça do Estado do Acre, por meio de encaminhamento a Gerência de Instalações, para fins de apreciação, o Volume Único - Relatório de Projeto e Orçamento com Planejamento da Obra, relativo ao Projeto de Engenharia da Escada Externa para o Fórum Criminal.

O projeto será constituído por um único volume, que contém o memorial descritivo com a introdução ao assunto deste projeto, a memória de cálculo da estrutura om discriminação da concepção estrutural que balizou a estrutura projetada e os principais aspectos técnicos dos elementos constituintes da escada em questão, a memória de cálculo, com conceito e síntese, onde justificamos as escolhas indicas, as normas utilizadas, os materiais empregados e demonstra-se de forma clara as hipóteses, verificações de cálculo e elementos determinados, contém também todas as informações relativas ao orçamento e planejamento da obra em questão, com a explanação de todos os critérios e metodologias que balizaram a composição final do custo desta obra.

São apresentadas também, a planilha resumo e a planilha analítica que contém todas as intervenções que compõem a obra. Fazem parte também deste documento todas as composições que se fizeram necessárias devido à inexistência de insumos ou de serviços na tabela SINAPI.

De forma complementar ao Orçamento, é apresentada a matriz de cotações assim como todas as cotações obtidas para a correta determinação do custo da obra.

Compõe ainda este volume, o cronograma físico-financeiro necessário para o planejamento da obra, assim como a não menos importante curva ABC dos serviços e as memórias de cálculo de todos os serviços a serem executados.

E ainda juntado, as especificações técnicas que norteará a fiscalização nos procedimentos a serem tomados à execução, controle, medição e pagamentos dos serviços.

E por fim, apresenta-se o detalhamento gráfico do projeto.

Abaixo estão apresentados os tópicos que compõem este relatório:

- Memorial Descritivo
- Memória de Cálculo Estrutural
- Orçamento
- Cronograma Físico-Financeiro
- Curva ABC de Serviços
- Composições de Custo
- Cotações
- Memórias de Quantidades
- Especificações Técnicas
- Detalhamento Gráfico

2. MEMORIAL DESCRITIVO

2.1 Introdução

Este é o projeto da escada externa para o Fórum Criminal do Tribunal de Justiça da cidade de Rio Branco/AC, que se inicia no subsolo e será constituído de 04 (quatro) patamares que possibilitarão acesso externo e rota de fuga ao pavimento térreo e os primeiros, segundo e terceiro pisos da edificação existente.

Essa estrutura com altura total de 18 m, será constituída na superestrutura em componentes metálicos, deverá ser fixada na estrutura existente do Fórum criminal e será apoiada sobre fundações em concreto armado.

Os patamares e degraus das escadas serão executados em chapa xadrez antiderrapante, já os pilares e vigas deverão ser de aço laminado do tipo ASTM A572 devendo ser recobertos com pintura epóxi, precedida de emassamento e fundo preparador. Os outros elementos tais como chapas e perfis dobrados utilizados na estrutura e cobertura, deverão ser de aço do tipo SAC 41, COR 300, ou de qualidade superior.

Todos os patamares assim com as escadas terão fechamento lateral com guarda-corpo de aço galvanizado de 1,10m de altura, montantes tubulares de 1.1/2" espaçados de 1,20m, travessa superior de 2" e gradil formado por barras chatas em ferro de 32x4,8mm.

Em cada um dos quatro patamares, deverá ser executado demolição em local indicado no projeto para a instalação de uma porta corta-fogo.

Em observância aos itens constantes na planilha orçamentária deverá ser executado sistema de iluminação ao longo da estrutura da escada e sistema de aterramento, que consiste na cravação de um pedaço de vergalhão em uma das sapatas e o solo que a envolve, procedido da conexão do pilar correspondente a essa sapata ao sistema de aterramento do prédio existente.

Para a implantação do canteiro de obras foi prevista a utilização de contêineres para escritório, almoxarifado e banheiros. No caso dos contêineres que são remunerados pelo aluguel mensal, é importante destacar que o pagamento somente será feito no período, ou períodos, que a obra estiver efetivamente em andamento.

O tapume será do tipo mais utilizado atualmente, que é com fechamento em telhas metálicas estruturado em peças de madeira fixados no chão com concreto magro. Para facilitar a circulação de homens e máquinas o tapume deverá ser executado com distância de 5 m em relação ao gabarito da obra.

Para os diversos serviços dessa obra que requerem, por sua característica, a elevação e manuseio de peças metálicas, portas, telhas e etc, foi considerado a disponibilização de guindaste hidráulico autropelido, com lança telescópica 28,80 m, durante todo o período da obra, que é de 2 meses.

Para a execução dos serviços de montagem e solda das peças metálicas, assim como colocação de patamar e escada, fixação de guarda corpo, execução de iluminação e demais necessidades foi previsto a instalação de andaime do tipo fachadeiro, com piso metálico para aumentar a segurança, no perímetro de toda a obra.

2.2 Dos Materiais Metálicos Usados

Usamos aço resistente à corrosão atmosférica para as chapas, perfis dobrados, SAC 41, e indicamos perfis laminados com proteção epóxi para os pilares e vigas, para que o cliente não se preocupe com a deterioração das estruturas. Eletrodo compatível, classe 60, especificado na NBR 8800, citada na Memória de Cálculo.

O aço usado para os conectores (chumbadores), é o ASTM A108, que possui resistência ao escoamento de 345 MPa e resistência à ruptura de 415 MPa.

Exige-se aço acompanhado de atestado de qualidade emitido pelo fabricante, não pelo fornecedor.

2.3 Dos Concretos

Exige-se dosagem racional dos concretos, com antecedência, para a escolha da areia, da brita e do traço apropriados, visando a fabricação de um concreto com resistência mínima de $F_{ck}=25\text{Mpa}$, que deve ser certificada por laboratório competente.

3. MEMÓRIA DO CÁLCULO ESTRUTURAL

MEMORIAL DESCRITIVO / MEMÓRIA DE CÁLCULO

Cliente: TRIBUNAL DE JUSTIÇA DO ACRE

**Objeto : PROJETO DE ESTRUTURA METÁLICA PARA
ESCADA DE EMERGÊNCIA FORUM
CRIMINAL – TJ ACRE.**

LOCAL : FORUM CRIMINAL – TJ ACRE

Situação Proposta :

Projeto de estrutura metálica para escada externa de emergência. Estrutura composta por colunas e vigas em perfis tipo W laminadas, para degraus da escada e piso em chapa xadrez. Tesouras treliçadas em perfil U de chapas planas dobradas em perfil U de chapas planas dobradas.

Plataforma de acesso aos pisos com colunas e vigas em perfis tipo W laminadas, para piso em chapa xadrez.

1 - Projeto de Estrutura metálica:

1.1 - Normas utilizadas:

NBR-8800 – Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios

NBR-6120 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.

NBR-6123 - Forças devidas ao vento em edificações.

AISC - American Institute of Steel Construction.

1.2 Ações consideradas:

Velocidade básica de vento : 36 m/s.

Sobrecarga de escadas = 300 kg/m²

Sobrecarga de PLATAFORMA DE ACESSO AOS PISOS: 300 kg/m²

1.3 – Características do material a ser empregado para confecção da estrutura metálica:

Perfis soldados, perfis dobrados e cantoneiras laminadas em aço

SAC 41. $F_y = 30 \text{ KN/cm}^2$

$F_u = 40 \text{ KN/cm}^2$

- Perfis W laminados da Gerdau

Açominas. $F_y = 34,5 \text{ KN/cm}^2$

$F_u = 45 \text{ KN/cm}^2$

- Eletrodos para solda – AWS-E-70XX.

Estas soldas deverão ser executadas e inspecionadas conforme requisitos da especificações AWS-Structural Welding Code D1.1.

Coloco-me à disposição para esclarecer quaisquer dúvidas que surgirem.

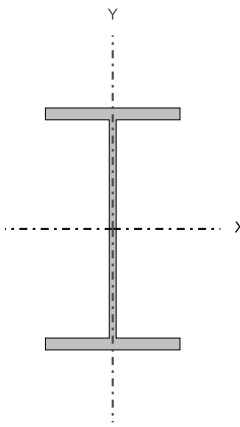
FLAVIO LUIZ CALIXTO

Eng. Civil

CREA-RJ: 48.908

PILARES SEÇÃO MAIS SOLICITADA

Barra N2/N4

Perfil: W 250 x 44.8 Material: Aço (A-36 250Mpa)							
	Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
	Inicial	Final		Área (cm²)	I _x ⁽¹⁾ (cm4)	I _y ⁽¹⁾ (cm4)	I _t ⁽²⁾ (cm4)
	N2	N4	2.070	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	1.00	1.00	0.00	0.00		
	L _K	2.070	2.070	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							

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Estado
	λ	N _t	N _c	M _x	M _y	V _x	V _y	NM _x M _y	T	NMVT	σ τ f	
N2/N4	x: 0 m λ ≤ 200.0 Passa	x: 1.944 m η < 0.1	x: 0 m η = 0.1	x: 0 m η = 8.1	x: 0 m η = 75.5	x: 0 m η = 4.3	η = 3.2	x: 0 m η = 83.6	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	x: 0 m η = 7.3	PASSA η = 83.6
Notação: λ: Limitação do índice de esbeltez N _t : Resistência à tração N _c : Resistência à compressão M _x : Resistência à flexão eixo X M _y : Resistência à flexão eixo Y V _x : Resistência ao esforço cortante X V _y : Resistência ao esforço cortante Y NM _x M _y : Resistência ao esforço axial e flexão combinados T: Resistência à torção NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante σ τ f: Resistência a interações de esforços e momento de torção x: Distância à origem da barra η: Coeficiente de aproveitamento (%) N.P.: Não procede												
Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.P.): ⁽¹⁾ A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor. ⁽²⁾ Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.												

Limitação do índice de esbeltez (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.4)

O índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como o maior relação entre o comprimento de flambagem e o raio de giração, não deve ser superior a 200.

$$\lambda \leq 200$$

$$\lambda : \underline{59.2} \checkmark$$

Onde:

λ: Índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r}$$

$$\lambda_x : \underline{18.6}$$

$$\lambda_y : \underline{59.2}$$

Sendo:

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

$$\mathbf{K_x \cdot L_x} : \underline{2.070} \text{ m}$$

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

$$\mathbf{K_y \cdot L_y} : \underline{2.070} \text{ m}$$

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

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

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

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 num ponto situado a uma distância de 1.944 m do nó N2, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$N_{t,Sd} : \underline{0.027} \text{ t}$$

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

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

$$N_{t,Rd} : \underline{133.445} \text{ t}$$

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.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

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

Deve satisfazer:

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

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

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N2, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$N_{c,Sd} : \underline{0.105} \text{ t}$$

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

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

$$N_{c,Rd} : \underline{110.813} \text{ t}$$

Onde:

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

$$\chi : \underline{0.830}$$

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : \underline{1.000}$$

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

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

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

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

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

$$\chi : \underline{0.830}$$

Onde:

λ₀: Índice de esbeltez reduzido.

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

$$\lambda_0 : \underline{0.666}$$

Sendo:

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : \underline{1.000}$$

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

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

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

N_e: Força axial de flambagem elástica.

$$N_e : \underline{330.592} \text{ t}$$

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):

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

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

Onde:

$K_x \cdot L_x$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

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

E : Módulo de elasticidade do aço.

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

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

Onde:

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

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

E : Módulo de elasticidade do aço.

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

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

Onde:

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

E : Módulo de elasticidade do aço.

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

G : Módulo de elasticidade transversal do aço.

J : Constante de torção da seção transversal.

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

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

Onde:

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

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

$$N_e : \underline{330.592} \text{ t}$$

$$N_{ex} : \underline{3361.335} \text{ t}$$

$$K_x \cdot L_x : \underline{2.070} \text{ m}$$

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

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

$$N_{ey} : \underline{330.592} \text{ t}$$

$$K_y \cdot L_y : \underline{2.070} \text{ m}$$

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

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

$$N_{ez} : \underline{\infty}$$

$$K_z \cdot L_z : \underline{0.000} \text{ m}$$

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$G : \underline{784913} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

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

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

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

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

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.

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

Sendo:

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

Onde:

$$5.69 \leq 15.84$$

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

b: Largura.

t: Espessura.

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

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

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço.

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

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

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

Sendo:

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

Onde:

b: Largura.

t: Espessura.

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

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

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço.

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

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

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

$$(b/t)_{lim} : \underline{15.84}$$

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

$$31.58 \leq 42.14$$

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

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

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

$$(b/t)_{lim} : \underline{42.14}$$

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.081} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N2, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$M_{Sd}^+ : \underline{1.142} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$31.58 \leq 161.22$$

Onde:

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

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

Sendo:

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

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

t_w: Espessura da alma.

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

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

$$\lambda_r : \underline{161.22}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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:

$$M_{Rd} : \underline{14.046} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

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

$$M_{Rd} : \underline{18.703} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

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

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$5.69 \leq 10.75$$

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

$$M_{Rd} : \underline{14.046} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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.

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

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

$$\lambda_p : \underline{10.75}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$M_{pl} : \underline{15.451} \text{ t}$$

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico.

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

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$31.58 \leq 106.35$$

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

$$M_{Rd} : \underline{14.046} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

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

Sendo:

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

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

t_w: Espessura da alma.

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

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

$$\lambda_p : \underline{106.35}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$M_{pl} : \underline{15.451} \text{ t}$$

Onde:

Z_x : Módulo de resistência plástico.

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

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

$$f_y : \frac{2548.42}{\text{kgf/cm}^2}$$

$$\gamma_{a1} : \frac{1.10}{\text{---}}$$

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.755} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N2, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$M_{Sd} : \underline{2.495} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$M_{Rd} : \underline{3.306} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

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

$$M_{Rd} : \underline{3.306} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$5.69 \leq 10.75$$

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

$$M_{Rd} : \underline{3.392} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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.

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

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

$$\lambda_p : \underline{10.75}$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$M_{pl} : \underline{3.731} \text{ t}$$

Onde:

Z_y : Módulo de resistência plástico.

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

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$31.58 \leq 31.68$$

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

$$M_{Rd} : \underline{3.392} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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.

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

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

$$\lambda_p : \underline{31.68}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$M_{pl} : \underline{3.731} \text{ t}$$

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico.

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

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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:

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

$$\eta : \underline{0.043} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N2, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$V_{Sd} : \underline{2.286} \text{ t}$$

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

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$5.69 \leq 34.08$$

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

$$V_{Rd} : \underline{53.489} \text{ t}$$

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.

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

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

$$\lambda_p : \underline{34.08}$$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem.

$$k_v : \underline{1.20}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$V_{pl} : \underline{58.838} \text{ t}$$

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

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

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

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:

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

$$\eta : \underline{0.032} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$V_{Sd} : \underline{0.899} \text{ t}$$

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

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$31.58 \leq 69.57$$

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

$$V_{Rd} : \underline{28.101} \text{ t}$$

Onde:

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

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

Sendo:

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

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

t_w: Espessura da alma.

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

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

$$\lambda_p : \underline{69.57}$$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem.

$$k_v : \underline{5.00}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$V_{pl} : \underline{30.911} \text{ t}$$

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:

$$\eta \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.836} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N2, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

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

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

$$\mathbf{N}_{c,Sd} : \underline{0.105} \text{ t}$$

$$\mathbf{M}_{x,Sd}^+ : \underline{1.142} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$\mathbf{M}_{y,Sd}^- : \underline{2.495} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$\mathbf{0.001} < \mathbf{0.200}$$

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

$$\eta : \underline{0.836}$$

Onde:

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

$$\mathbf{N}_{c,Rd} : \underline{110.813} \text{ t}$$

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).

$$\mathbf{M}_{x,Rd} : \underline{14.046} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$\mathbf{M}_{y,Rd} : \underline{3.306} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.2)

Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.073} \quad \checkmark$$

O coeficiente de aproveitamento desfavorável produz-se no nó N2, para a combinação de ações 1.5·PP no ponto da seção transversal de coordenadas X = 0.00 mm, Y = 126.50 mm em relação ao centro de gravidade.

As tensões tangenciais τ_{Sd} são dadas por:

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

$$\tau_{Sd} : \underline{100.67} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

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

$$\tau_{V_{x,Sd}} : \underline{88.92} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$\mathbf{V}_{x,Sd}^- : \underline{2.286} \text{ t}$$

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

$$\mathbf{S}_y : \underline{35.59} \text{ cm}^3$$

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

$$\mathbf{I}_y : \underline{704.00} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

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

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

$$\tau_{V_{y,Sd}} : \underline{11.76} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

$V_{y,sd}^+$: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.

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

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

t : Espessura.

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

Sendo:

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

J : Constante de torção da seção transversal.

t : Espessura.

$$V_{y,sd}^+ : \frac{0.899}{-121.69} \text{ t cm}^3$$

$$I_x : \frac{7158.00}{13.00} \text{ cm}^4$$

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

$$\tau_{Tsd} : \frac{0.00}{1377.07} \text{ kgf/cm}^2$$

$$T_{sd} : \frac{0.000}{27.14} \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$J : \frac{27.14}{13.00} \text{ cm}^4$$

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

$$\tau_{Rd} : \frac{1377.07}{1390.05} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

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

$$\tau_{Rd} : \frac{1390.05}{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$f_y : \frac{2548.42}{1.10} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

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

$$\tau_{Rd} : \frac{1377.07}{56867.14} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

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

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

$$\chi : \frac{0.991}{0.150}$$

Sendo:

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

$$\lambda_0 : \frac{0.150}{68240.56}$$

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

$$\tau_e : \frac{68240.56}{56867.14} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$\sigma_E : \frac{56867.14}{1.20} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

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

E : Módulo de elasticidade do aço.

ν : Coeficiente de Poisson.

t : Espessura.

h : Largura.

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$k_v : \frac{1.20}{2038736}$$

$$E : \frac{2038736}{0.30} \text{ kgf/cm}^2$$

$$\nu : \frac{0.30}{13.00}$$

$$t : \frac{13.00}{74.00} \text{ mm}$$

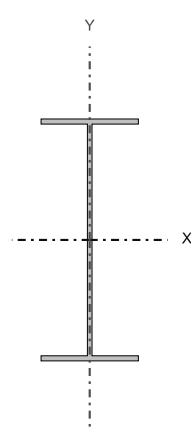
$$h : \frac{74.00}{2548.42} \text{ mm}$$

$$f_y : \frac{2548.42}{1.10} \text{ kgf/cm}^2$$

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

VIGAS INCLINADAS ESCADA
SEÇÃO MAIS SOLICITADA

Barra N13/N9

Perfil: W 250 x 17.9 Material: Aço (A-36 250Mpa)							
	Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
	Inicial	Final		Área (cm²)	I _x ⁽¹⁾ (cm4)	I _y ⁽¹⁾ (cm4)	I _t ⁽²⁾ (cm4)
	N13	N9	3.675	23.10	2291.00	91.00	2.54
	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	1.00	1.00	0.00	0.00		
	L _K	3.675	3.675	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							

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Estado
	λ	N _t	N _c	M _x	M _y	V _x	V _y	NM _x M _y	T	NMVT	σ τ f	
N13/N9	N.P. ⁽¹⁾	x: 3.419 m η = 3.5	N.P. ⁽²⁾	x: 0.153 m η = 15.2	x: 3.419 m η = 19.4	η = 0.2	x: 0.153 m η = 5.8	x: 3.419 m η = 28.9	N.P. ⁽³⁾	N.P. ⁽⁴⁾	x: 0.153 m η = 7.8	PASSA η = 28.9
Notação: λ: Limitação do índice de esbeltez N _t : Resistência à tração N _c : Resistência à compressão M _x : Resistência à flexão eixo X M _y : Resistência à flexão eixo Y V _x : Resistência ao esforço cortante X V _y : Resistência ao esforço cortante Y NM _x M _y : Resistência ao esforço axial e flexão combinados T: Resistência à torção NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante σ τ f: Resistência a interações de esforços e momento de torção x: Distância à origem da barra η: Coeficiente de aproveitamento (%) N.P.: Não procede												
Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.P.): ⁽¹⁾ A verificação não procede, já que não há força axial de compressão. ⁽²⁾ A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de compressão. ⁽³⁾ A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor. ⁽⁴⁾ Não há interação entre a força axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.												

Limitação do índice de esbeltez (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.4)

A verificação não procede, já que não há força axial de compressão.

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.035} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 3.419 m do nó N13, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$\mathbf{N_{t,Sd}} : \underline{1.880} \text{ t}$$

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

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

$$\mathbf{N_{t,Rd}} : \underline{53.517} \text{ t}$$

Onde:

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$\mathbf{A_g} : \underline{23.10} \text{ cm}^2$$

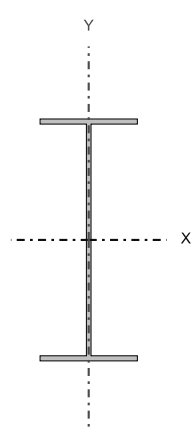
f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$\mathbf{f_y} : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

Barra N19/N33

Perfil: W 250 x 17.9 Material: Aço (A-36 250Mpa)							
	Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
	Inicial	Final		Área (cm²)	I _x ⁽¹⁾ (cm4)	I _y ⁽¹⁾ (cm4)	I _t ⁽²⁾ (cm4)
	N19	N33	0.850	23.10	2291.00	91.00	2.54
	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	1.00	1.00	0.00	0.00		
	L _k	0.850	0.850	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							

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Estado
	λ	N _t	N _c	M _x	M _y	V _x	V _y	NM _x M _y	T	NMVT	σ τ f	
N19/N33	x: 0.46 m λ ≤ 200.0 Passa	x: 0 m η = 1.8	x: 0.72 m η = 0.5	x: 0 m η = 62.2	x: 0 m η = 9.4	x: 0 m η = 2.2	x: 0.067 m η = 12.4	x: 0 m η = 72.4	x: 0.27 m η = 10.5	N.P. ⁽¹⁾	x: 0 m η = 83.0	PASSA η = 83.0
Notação: λ: Limitação do índice de esbeltez N _t : Resistência à tração N _c : Resistência à compressão M _x : Resistência à flexão eixo X M _y : Resistência à flexão eixo Y V _x : Resistência ao esforço cortante X V _y : Resistência ao esforço cortante Y NM _x M _y : Resistência ao esforço axial e flexão combinados T: Resistência à torção NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante σ τ f: Resistência a interações de esforços e momento de torção x: Distância à origem da barra η: Coeficiente de aproveitamento (%) N.P.: Não procede												
Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.P.): ⁽¹⁾ Este caso não está contemplado pela norma e, portanto, não é possível realizar a verificação.												

Limitação do índice de esbeltez (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.4)

O índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como o maior relação entre o comprimento de flambagem e o raio de giração, não deve ser superior a 200.

$$\lambda \leq 200$$

$$\lambda : \underline{42.8} \checkmark$$

Onde:

λ: Índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r}$$

$$\lambda_x : \underline{8.5}$$

$$\lambda_y : \underline{42.8}$$

Sendo:

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

$$\mathbf{K_x \cdot L_x} : \underline{0.850} \text{ m}$$

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

$$\mathbf{K_y \cdot L_y} : \underline{0.850} \text{ m}$$

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

$$\mathbf{r_x} : \underline{9.96} \text{ cm}$$

$$\mathbf{r_y} : \underline{1.98} \text{ cm}$$

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.018} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$N_{t,Sd} : \underline{0.950} \text{ t}$$

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

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

$$N_{t,Rd} : \underline{53.517} \text{ t}$$

Onde:

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{23.10} \text{ cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.005} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.720 m do nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$N_{c,Sd} : \underline{0.241} \text{ t}$$

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

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

$$N_{c,Rd} : \underline{45.828} \text{ t}$$

Onde:

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

$$\chi : \underline{0.913}$$

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : \underline{0.938}$$

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{23.10} \text{ cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

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

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

$$\chi : \underline{0.913}$$

Onde:

λ₀: Índice de esbeltez reduzido.

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

$$\lambda_0 : \underline{0.467}$$

Sendo:

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : \underline{0.938}$$

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{23.10} \text{ cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

N_e: Força axial de flambagem elástica.

$$N_e : \underline{253.434} \text{ t}$$

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

A força axial de flambagem elástica, N_{e_r} , 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):

$$N_e : \underline{253.434} \text{ t}$$

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

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

$$N_{ex} : \underline{6380.401} \text{ t}$$

Onde:

$K_x \cdot L_x$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

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

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$K_x \cdot L_x : \underline{0.850} \text{ m}$$

$$I_x : \underline{2291.00} \text{ cm}^4$$

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

$$N_{ey} : \underline{253.434} \text{ t}$$

Onde:

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

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

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$K_y \cdot L_y : \underline{0.850} \text{ m}$$

$$I_y : \underline{91.00} \text{ cm}^4$$

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

$$N_{ez} : \underline{\infty}$$

Onde:

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

E : Módulo de elasticidade do aço.

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

G : Módulo de elasticidade transversal do aço.

J : Constante de torção da seção transversal.

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

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

$$K_z \cdot L_z : \underline{0.000} \text{ m}$$

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

$$C_w : \underline{13735.00} \text{ cm}^6$$

$$G : \underline{784913} \text{ kgf/cm}^2$$

$$J : \underline{2.54} \text{ cm}^4$$

$$r_0 : \underline{10.15} \text{ cm}$$

Onde:

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

X_0, Y_0 : Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principais X, Y, respectivamente.

$$r_x : \underline{9.96} \text{ cm}$$

$$r_y : \underline{1.98} \text{ cm}$$

$$X_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$Y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

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

As barras submetidas a força axial de compressão, nas quais os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (b/t) maiores que os valores limite dados na Tabela F.1, têm o fator de redução total Q dado por:

$$Q = Q_s \cdot Q_a$$

$$Q : \underline{0.938}$$

Onde:

Q_s : Fator de redução que tem em conta a flambagem local dos elementos AL. Quando existem dois ou mais elementos AL com fatores de redução Q_s diferentes, adota-se o menor destes fatores.

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

$$Q_s : \underline{1.000}$$

$$(b/t) \leq 0.56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$9.53 \leq 15.84$$

$$Q_s = 1.000$$

$$Q_s : \underline{1.000}$$

Sendo:

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

$$(b/t) : \underline{9.53}$$

Onde:

b: Largura.

$$b : \underline{50.50} \text{ mm}$$

t: Espessura.

$$t : \underline{5.30} \text{ mm}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

Q_a: Fator de redução que leva em conta a flambagem local dos elementos AA.

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g}$$

$$Q_a : \underline{0.938}$$

Sendo:

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{23.10} \text{ cm}^2$$

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

$$A_{ef} : \underline{21.67} \text{ cm}^2$$

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef}) \cdot t$$

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

$$(b/t) > 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$50.08 > 42.14$$

$$b_{ef} = 1.92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \cdot \left[1 - \frac{c_a}{b/t} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b$$

$$b_{ef} : \underline{210.62} \text{ mm}$$

Sendo:

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

$$(b/t) : \underline{50.08}$$

Onde:

b: Largura.

$$b : \underline{240.40} \text{ mm}$$

t: Espessura.

$$t : \underline{4.80} \text{ mm}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

C_a: Coeficiente para elementos que não sejam mesas ou almas de seções tubulares retangulares.

$$C_a : \underline{0.34}$$

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.622} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$M_{sd} : \underline{3.038} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$50.08 \leq 161.22$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{50.08}$$

Sendo:

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

$$h : \underline{240.40} \text{ mm}$$

t_w : Espessura da alma.

$$t_w : \underline{4.80} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_r : \underline{161.22}$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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:

$$M_{Rd} : \underline{4.888} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

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

$$M_{Rd} : \underline{6.344} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$W_x : \underline{182.55} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$9.53 \leq 10.75$$

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

$$M_{Rd} : \underline{4.888} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{9.53}$$

Sendo:

b_f : Largura da mesa comprimida.

$$b_f : \underline{101.00} \text{ mm}$$

t_f : Espessura da mesa comprimida.

$$t_f : \underline{5.30} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{10.75}$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$M_{pl} : \underline{5.377} \text{ t}$$

Onde:

Z_x : Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : \underline{211.00} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$50.08 \leq 106.35$$

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

$$M_{Rd} : \underline{4.888} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{50.08}$$

Sendo:

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

$$h : \underline{240.40} \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \underline{4.80} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{106.35}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$M_{pl} : \underline{5.377} \text{ t}$$

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : \underline{211.00} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.094} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$M_{sd} : \underline{0.039} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$M_{Rd} : \underline{0.417} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

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

$$M_{Rd} : \underline{0.626} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$W_y : \underline{18.02} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$9.53 \leq 10.75$$

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

$$M_{Rd} : \underline{0.667} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{9.53}$$

Sendo:

b_f: Largura da mesa comprimida.

$$b_f : \underline{101.00} \text{ mm}$$

t_f: Espessura da mesa comprimida.

$$t_f : \underline{5.30} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{10.75}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

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

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico.

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$E : \frac{2038736}{\text{kgf/cm}^2}$$

$$f_y : \frac{2548.42}{\text{kgf/cm}^2}$$

$$M_{pl} : \frac{0.734}{t}$$

$$Z_y : \frac{28.80}{\text{cm}^3}$$

$$f_y : \frac{2548.42}{\text{kgf/cm}^2}$$

$$\gamma_{a1} : \frac{1.10}{\text{---}}$$

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

$$\lambda > \lambda_r$$

$$50.08 > 39.60$$

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

$$M_{Rd} : \frac{0.417}{t \cdot m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \frac{50.08}{\text{---}}$$

Sendo:

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

$$h : \frac{240.40}{\text{mm}}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \frac{4.80}{\text{mm}}$$

$$\lambda_r = 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_r : \frac{39.60}{\text{---}}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \frac{2038736}{\text{kgf/cm}^2}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \frac{2548.42}{\text{kgf/cm}^2}$$

$$M_{cr} = \frac{W_{ef}^2}{W} \cdot f_y$$

$$M_{cr} : \frac{0.459}{t \cdot m}$$

Sendo:

W_{ef,y}: Módulo de resistência mínimo elástico, relativo ao eixo de flexão, para uma seção que tem uma mesa comprimida de largura igual a b_{ef} dada por F.3.2, com σ igual a f_y.

$$W_{ef,y} : \frac{18.02}{\text{cm}^3}$$

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

$$W_y : \frac{18.02}{\text{cm}^3}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \frac{2548.42}{\text{kgf/cm}^2}$$

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

$$M_{pl} : \frac{0.734}{t}$$

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico.

$$Z_y : \frac{28.80}{\text{cm}^3}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \frac{2548.42}{\text{kgf/cm}^2}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \frac{1.10}{\text{---}}$$

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.022} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$V_{Sd} : \underline{0.331} \text{ t}$$

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

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$9.53 \leq 34.08$$

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

$$V_{Rd} : \underline{14.882} \text{ t}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{9.53}$$

Sendo:

b_f: Largura das mesas.

$$b_f : \underline{101.00} \text{ mm}$$

t_f: Espessura das mesas.

$$t_f : \underline{5.30} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{34.08}$$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem.

$$k_v : \underline{1.20}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$V_{pl} : \underline{16.370} \text{ t}$$

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

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

$$A_w : \underline{10.71} \text{ cm}^2$$

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:

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

$$\eta : \underline{0.124} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.067 m do nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$V_{Sd} : \underline{2.072} \text{ t}$$

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

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$50.08 \leq 69.57$$

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

$$V_{Rd} : \underline{16.747} \text{ t}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{50.08}$$

Sendo:

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

$$h : \underline{240.40} \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \underline{4.80} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{69.57}$$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem.

$$k_v : \underline{5.00}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$V_{pl} : \underline{18.422} \text{ t}$$

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w = d \cdot t_w$$

$$A_w : \underline{12.05} \text{ cm}^2$$

d: Altura total da seção transversal.

$$d : \underline{251.00} \text{ mm}$$

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:

$$\eta \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.724} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$N_{t,Sd} : \underline{0.950} \text{ t}$$

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

$$M_{x,Sd} : \underline{3.038} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$M_{y,Sd} : \underline{0.039} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$0.018 < 0.200$$

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

$$\eta : \underline{0.724}$$

Onde:

$N_{t,Rd}$: Força axial resistente de cálculo de tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2).

$$N_{t,Rd} : \underline{53.517} \text{ t}$$

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

$$M_{x,Rd} : \underline{4.888} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$M_{y,Rd} : \underline{0.417} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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:

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

$$\eta : \underline{0.105} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.270 m do nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$T_{Sd} : \underline{0.007} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

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

$$T_{Rd} : \underline{0.067} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

W_T : Módulo de resistência à torção.

$$W_T : \underline{4.79} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

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

Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.2)

Este caso não está contemplado pela norma e, portanto, não é possível realizar a verificação.

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.830} \quad \checkmark$$

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

$$\eta : \underline{0.070} \quad \checkmark$$

(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:)

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

$$\eta : \underline{0.758} \quad \checkmark$$

O coeficiente de aproveitamento desfavorável produz-se no nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP no ponto da seção transversal de coordenadas X = 50.50 mm, Y = 125.50 mm em relação ao centro de gravidade.

As tensões normais σ_{Sd} são dadas por:

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

$$\sigma_{Sd} : \underline{1923.23} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

$$\sigma_{N_{Sd}} = \frac{N_{t,Sd}}{A_g}$$

$$\sigma_{N_{Sd}} : \underline{41.11} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$N_{t,Sd} : \underline{0.950} \text{ t}$$

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{23.10} \text{ cm}^2$$

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

$$\sigma_{M_{x,Sd}} : \underline{1664.37} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$M_{x,Sd} : \underline{3.038} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$I_x : \underline{2291.00} \text{ cm}^4$$

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

$$Y : \underline{125.50} \text{ mm}$$

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

$$\sigma_{M_{y,Sd}} : \underline{217.75} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$M_{y,Sd} : \underline{0.039} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$I_y : \underline{91.00} \text{ cm}^4$$

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

$$X : \underline{50.50} \text{ mm}$$

As tensões tangenciais τ_{Sd} são dadas por:

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

$$\tau_{Sd} : \underline{-96.82} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

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

$$\tau_{V_{x,Sd}} : \underline{0.00} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$V_{x,Sd} : \underline{0.331} \text{ t}$$

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.

$$I_y : \underline{91.00} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

$$t : \underline{5.30} \text{ mm}$$

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

$$\tau_{V_{y,Sd}} : \underline{0.00} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$V_{y,Sd} : \underline{1.885} \text{ t}$$

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.

$$I_x : \underline{2291.00} \text{ cm}^4$$

t : Espessura.

$$t : \underline{5.30} \text{ mm}$$

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

$$\tau_{T_{Sd}} : \underline{-96.82} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$T_{Sd} : \underline{0.005} \text{ t}\cdot\text{m}$$

J : Constante de torção da seção transversal.

$$J : \underline{2.54} \text{ cm}^4$$

t : Espessura.

$$t : \underline{5.30} \text{ mm}$$

As tensões totais f_{Sd} são dadas por:

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

$$f_{Sd} : \underline{1930.53} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$\sigma_{Rd} : \underline{2316.75} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

$$\sigma_{Rd} : \underline{2316.75} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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:

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

$$\sigma_{Rd} : \underline{2316.75} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

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

$$\chi : \underline{1.000}$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\tau_{Rd} : \underline{1381.31} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

$$\tau_{Rd} : \underline{1390.05} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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:

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

$$\tau_{Rd} : \underline{1381.31} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

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

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

$$\chi : \underline{0.994}$$

Sendo:

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

$$\lambda_0 : \underline{0.123}$$

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

$$\tau_e : \underline{101479.21} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$\sigma_E : \underline{20295.84} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

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

$$\mathbf{k_v} : \underline{5.00}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$\mathbf{E} : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

ν: Coeficiente de Poisson.

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

t: Espessura.

$$\mathbf{t} : \underline{5.30} \text{ mm}$$

h: Largura.

$$\mathbf{h} : \underline{50.50} \text{ mm}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$\mathbf{f_y} : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

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

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

$$\mathbf{f_{Rd}} : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$\mathbf{f_y} : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

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

A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de compressão.

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.152} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.153 m do nó N13, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$M_{sd} : \underline{0.745} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$50.08 \leq \underline{161.22}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{50.08}$$

Sendo:

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

$$h : \underline{240.40} \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \underline{4.80} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_r : \underline{161.22}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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:

$$M_{Rd} : \underline{4.888} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

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

$$M_{Rd} : \underline{6.344} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$W_x : \underline{182.55} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$9.53 \leq \underline{10.75}$$

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

$$M_{Rd} : \underline{4.888} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{9.53}$$

Sendo:

b_f: Largura da mesa comprimida.

$$b_f : \underline{101.00} \text{ mm}$$

t_f : Espessura da mesa comprimida.

$$t_f : \underline{5.30} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{10.75}$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$M_{pl} : \underline{5.377} \text{ t}$$

Onde:

Z_x : Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : \underline{211.00} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$50.08 \leq 106.35$$

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

$$M_{Rd} : \underline{4.888} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{50.08}$$

Sendo:

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

$$h : \underline{240.40} \text{ mm}$$

t_w : Espessura da alma.

$$t_w : \underline{4.80} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{106.35}$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$M_{pl} : \underline{5.377} \text{ t}$$

Onde:

Z_x : Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : \underline{211.00} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

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

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.194} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 3.419 m do nó N13, para a combinação de ações 1.5.PP.

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

$$M_{Sd} : \underline{0.081} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$M_{Rd} : \underline{0.417} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

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

$$M_{Rd} : \underline{0.626} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$W_y : \underline{18.02} \text{ cm}^3$$

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

$$\lambda \leq \lambda_p$$

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

Onde:

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

Sendo:

b_f : Largura da mesa comprimida.

t_f : Espessura da mesa comprimida.

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

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

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

Onde:

Z_y : Módulo de resistência plástico.

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$9.53 \leq 10.75$$

$$M_{Rd} : \underline{0.667} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$\lambda : \underline{9.53}$$

$$b_f : \underline{101.00} \text{ mm}$$

$$t_f : \underline{5.30} \text{ mm}$$

$$\lambda_p : \underline{10.75}$$

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

$$M_{pl} : \underline{0.734} \text{ t}$$

$$Z_y : \underline{28.80} \text{ cm}^3$$

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

$$\lambda > \lambda_r$$

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

Onde:

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

Sendo:

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

t_w : Espessura da alma.

$$\lambda_r = 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$M_{cr} = \frac{W_{ef}^2}{W} \cdot f_y$$

Sendo:

$W_{ef,y}$: Módulo de resistência mínimo elástico, relativo ao eixo de flexão, para uma seção que tem uma mesa comprimida de largura igual a b_{ef} dada por F.3.2, com σ igual a f_y .

$$50.08 > 39.60$$

$$M_{Rd} : \underline{0.417} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$\lambda : \underline{50.08}$$

$$h : \underline{240.40} \text{ mm}$$

$$t_w : \underline{4.80} \text{ mm}$$

$$\lambda_r : \underline{39.60}$$

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

$$M_{cr} : \underline{0.459} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$W_{ef,y} : \underline{18.02} \text{ cm}^3$$

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

$$W_y : \underline{18.02} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$M_{pl} : \underline{0.734} \text{ t}$$

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico.

$$Z_y : \underline{28.80} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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:

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

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

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$V_{sd} : \underline{0.037} \text{ t}$$

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

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$9.53 \leq 34.08$$

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

$$V_{Rd} : \underline{14.882} \text{ t}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{9.53}$$

Sendo:

b_f: Largura das mesas.

$$b_f : \underline{101.00} \text{ mm}$$

t_f: Espessura das mesas.

$$t_f : \underline{5.30} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{34.08}$$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem.

$$k_v : \underline{1.20}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$V_{pl} : \underline{16.370} \text{ t}$$

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

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

$$A_w : \underline{10.71} \text{ cm}^2$$

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:

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

$$\eta : \underline{0.058} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.153 m do nó N13, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$V_{Sd} : \underline{0.969} \text{ t}$$

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

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$50.08 \leq 69.57$$

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

$$V_{Rd} : \underline{16.747} \text{ t}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{50.08}$$

Sendo:

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

$$h : \underline{240.40} \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \underline{4.80} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{69.57}$$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem.

$$k_v : \underline{5.00}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$V_{pl} : \underline{18.422} \text{ t}$$

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w = d \cdot t_w$$

$$A_w : \underline{12.05} \text{ cm}^2$$

d: Altura total da seção transversal.

$$d : \underline{251.00} \text{ mm}$$

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:

$$\eta \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.289} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 3.419 m do nó N13, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$\mathbf{N}_{t,Sd} : \underline{1.880} \text{ t}$$

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

$$\mathbf{M}_{x,Sd}^+ : \underline{0.377} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$\mathbf{M}_{y,Sd}^- : \underline{0.081} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$\mathbf{0.035} < \mathbf{0.200}$$

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

$$\eta : \underline{0.289}$$

Onde:

N_{t,Rd}: Força axial resistente de cálculo de tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2).

$$\mathbf{N}_{t,Rd} : \underline{53.517} \text{ t}$$

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).

$$\mathbf{M}_{x,Rd} : \underline{4.888} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$\mathbf{M}_{y,Rd} : \underline{0.417} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.2)

Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.078} \quad \checkmark$$

O coeficiente de aproveitamento desfavorável produz-se em um ponto situado a uma distância 0.153 m do nó N13 para a combinação de ações 1.5·PP e 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:

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

$$\tau_{Sd} : \underline{89.89} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

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

$$\tau_{V_{x,Sd}} : \underline{0.00} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$\mathbf{V}_{x,Sd}^+ : \underline{0.037} \text{ t}$$

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

$$\mathbf{S}_y : \underline{0.00} \text{ cm}^3$$

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

$$\mathbf{I}_y : \underline{91.00} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

$$\mathbf{t} : \underline{4.80} \text{ mm}$$

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

$$\tau_{V_{y,Sd}} : \underline{89.89} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$\mathbf{V}_{y,Sd} : \underline{0.969} \text{ t}$$

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

$$\mathbf{S}_x : \underline{101.98} \text{ cm}^3$$

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

$$\mathbf{I}_x : \underline{2291.00} \text{ cm}^4$$

t : Espessura.

$$\mathbf{t} : \underline{4.80} \text{ mm}$$

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

$$\tau_{T_{Sd}} : \underline{0.00} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$\mathbf{T}_{Sd} : \underline{0.000} \text{ t}\cdot\text{m}$$

J : Constante de torção da seção transversal.

$$\mathbf{J} : \underline{2.54} \text{ cm}^4$$

t : Espessura.

$$\mathbf{t} : \underline{4.80} \text{ mm}$$

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

$$\tau_{Rd} : \underline{1158.74} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

$$\tau_{Rd} : \underline{1390.05} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$\mathbf{f}_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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:

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

$$\tau_{Rd} : \underline{1158.74} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

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

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

$$\chi : \underline{0.834}$$

Sendo:

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

$$\lambda_0 : \underline{0.659}$$

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

$$\tau_e : \underline{3516.25} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$\sigma_E : \underline{703.25} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

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

$$\mathbf{k}_v : \underline{5.00}$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$\mathbf{E} : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

ν : Coeficiente de Poisson.

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

t : Espessura.

$$\mathbf{t} : \underline{4.80} \text{ mm}$$

h : Largura.

$$\mathbf{h} : \underline{245.70} \text{ mm}$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

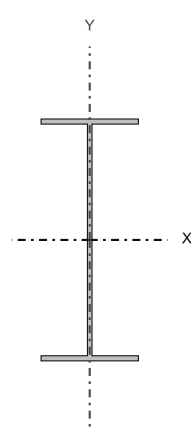
$$\mathbf{f}_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

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

VIGAS PATAMAR
SEÇÃO MAIS SOLICITADA

Barra N19/N33

Perfil: W 250 x 17.9 Material: Aço (A-36 250Mpa)							
	Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
	Inicial	Final		Área (cm²)	I _x ⁽¹⁾ (cm4)	I _y ⁽¹⁾ (cm4)	I _t ⁽²⁾ (cm4)
	N19	N33	0.850	23.10	2291.00	91.00	2.54
	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	1.00	1.00	0.00	0.00		
	L _K	0.850	0.850	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							

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Estado
	λ	N _t	N _c	M _x	M _y	V _x	V _y	NM _x M _y	T	NMVT	σ τ f	
N19/N33	x: 0.46 m λ ≤ 200.0 Passa	x: 0 m η = 1.8	x: 0.72 m η = 0.5	x: 0 m η = 62.2	x: 0 m η = 9.4	x: 0 m η = 2.2	x: 0.067 m η = 12.4	x: 0 m η = 72.4	x: 0.27 m η = 10.5	N.P. ⁽¹⁾	x: 0 m η = 83.0	PASSA η = 83.0
Notação: λ: Limitação do índice de esbeltez N _t : Resistência à tração N _c : Resistência à compressão M _x : Resistência à flexão eixo X M _y : Resistência à flexão eixo Y V _x : Resistência ao esforço cortante X V _y : Resistência ao esforço cortante Y NM _x M _y : Resistência ao esforço axial e flexão combinados T: Resistência à torção NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante σ τ f: Resistência a interações de esforços e momento de torção x: Distância à origem da barra η: Coeficiente de aproveitamento (%) N.P.: Não procede												
Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.P.): ⁽¹⁾ Este caso não está contemplado pela norma e, portanto, não é possível realizar a verificação.												

Limitação do índice de esbeltez (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3.4)

O índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como o maior relação entre o comprimento de flambagem e o raio de giração, não deve ser superior a 200.

$$\lambda \leq 200$$

$$\lambda : \underline{42.8} \checkmark$$

Onde:

λ: Índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r}$$

$$\lambda_x : \underline{8.5}$$

$$\lambda_y : \underline{42.8}$$

Sendo:

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

$$\mathbf{K_x \cdot L_x} : \underline{0.850} \text{ m}$$

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

$$\mathbf{K_y \cdot L_y} : \underline{0.850} \text{ m}$$

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

$$\mathbf{r_x} : \underline{9.96} \text{ cm}$$

$$\mathbf{r_y} : \underline{1.98} \text{ cm}$$

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.018} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$N_{t,Sd} : \underline{0.950} \text{ t}$$

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

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

$$N_{t,Rd} : \underline{53.517} \text{ t}$$

Onde:

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{23.10} \text{ cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.005} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.720 m do nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$N_{c,Sd} : \underline{0.241} \text{ t}$$

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

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

$$N_{c,Rd} : \underline{45.828} \text{ t}$$

Onde:

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

$$\chi : \underline{0.913}$$

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : \underline{0.938}$$

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{23.10} \text{ cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

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

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

$$\chi : \underline{0.913}$$

Onde:

λ₀: Índice de esbeltez reduzido.

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

$$\lambda_0 : \underline{0.467}$$

Sendo:

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : \underline{0.938}$$

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{23.10} \text{ cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

N_e: Força axial de flambagem elástica.

$$N_e : \underline{253.434} \text{ t}$$

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

A força axial de flambagem elástica, N_{e_r} , 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):

$$N_e : \underline{253.434} \text{ t}$$

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

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

$$N_{ex} : \underline{6380.401} \text{ t}$$

Onde:

$K_x \cdot L_x$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

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

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$K_x \cdot L_x : \underline{0.850} \text{ m}$$

$$I_x : \underline{2291.00} \text{ cm}^4$$

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

$$N_{ey} : \underline{253.434} \text{ t}$$

Onde:

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

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

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$K_y \cdot L_y : \underline{0.850} \text{ m}$$

$$I_y : \underline{91.00} \text{ cm}^4$$

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

$$N_{ez} : \underline{\infty}$$

Onde:

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

E : Módulo de elasticidade do aço.

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

G : Módulo de elasticidade transversal do aço.

J : Constante de torção da seção transversal.

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

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

$$K_z \cdot L_z : \underline{0.000} \text{ m}$$

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

$$C_w : \underline{13735.00} \text{ cm}^6$$

$$G : \underline{784913} \text{ kgf/cm}^2$$

$$J : \underline{2.54} \text{ cm}^4$$

$$r_0 : \underline{10.15} \text{ cm}$$

Onde:

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

X_0, Y_0 : Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principais X, Y, respectivamente.

$$r_x : \underline{9.96} \text{ cm}$$

$$r_y : \underline{1.98} \text{ cm}$$

$$X_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$Y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

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

As barras submetidas a força axial de compressão, nas quais os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (b/t) maiores que os valores limite dados na Tabela F.1, têm o fator de redução total Q dado por:

$$Q = Q_s \cdot Q_a$$

$$Q : \underline{0.938}$$

Onde:

Q_s : Fator de redução que tem em conta a flambagem local dos elementos AL. Quando existem dois ou mais elementos AL com fatores de redução Q_s diferentes, adota-se o menor destes fatores.

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

$$Q_s : \underline{1.000}$$

$$(b/t) \leq 0.56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$9.53 \leq 15.84$$

$$Q_s = 1.000$$

$$Q_s : \underline{1.000}$$

Sendo:

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

$$(b/t) : \underline{9.53}$$

Onde:

b: Largura.

$$b : \underline{50.50} \text{ mm}$$

t: Espessura.

$$t : \underline{5.30} \text{ mm}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

Q_a: Fator de redução que leva em conta a flambagem local dos elementos AA.

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g}$$

$$Q_a : \underline{0.938}$$

Sendo:

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{23.10} \text{ cm}^2$$

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

$$A_{ef} : \underline{21.67} \text{ cm}^2$$

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef}) \cdot t$$

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

$$(b/t) > 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$50.08 > 42.14$$

$$b_{ef} = 1.92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \cdot \left[1 - \frac{c_a}{b/t} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b$$

$$b_{ef} : \underline{210.62} \text{ mm}$$

Sendo:

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

$$(b/t) : \underline{50.08}$$

Onde:

b: Largura.

$$b : \underline{240.40} \text{ mm}$$

t: Espessura.

$$t : \underline{4.80} \text{ mm}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

C_a: Coeficiente para elementos que não sejam mesas ou almas de seções tubulares retangulares.

$$C_a : \underline{0.34}$$

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.622} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$M_{sd} : \underline{3.038} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$50.08 \leq 161.22$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{50.08}$$

Sendo:

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

$$h : \underline{240.40} \text{ mm}$$

t_w : Espessura da alma.

$$t_w : \underline{4.80} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_r : \underline{161.22}$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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:

$$M_{Rd} : \underline{4.888} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

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

$$M_{Rd} : \underline{6.344} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$W_x : \underline{182.55} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$9.53 \leq 10.75$$

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

$$M_{Rd} : \underline{4.888} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{9.53}$$

Sendo:

b_f : Largura da mesa comprimida.

$$b_f : \underline{101.00} \text{ mm}$$

t_f : Espessura da mesa comprimida.

$$t_f : \underline{5.30} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{10.75}$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$M_{pl} : \underline{5.377} \text{ t}$$

Onde:

Z_x : Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : \underline{211.00} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$50.08 \leq 106.35$$

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

$$M_{Rd} : \underline{4.888} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{50.08}$$

Sendo:

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

$$h : \underline{240.40} \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \underline{4.80} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{106.35}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$M_{pl} : \underline{5.377} \text{ t}$$

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : \underline{211.00} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.094} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$M_{Sd} : \underline{0.039} \text{ t·m}$$

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

$$M_{Rd} : \underline{0.417} \text{ t·m}$$

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

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

$$M_{Rd} : \underline{0.626} \text{ t·m}$$

Onde:

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

$$W_y : \underline{18.02} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$9.53 \leq 10.75$$

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

$$M_{Rd} : \underline{0.667} \text{ t·m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{9.53}$$

Sendo:

b_f: Largura da mesa comprimida.

$$b_f : \underline{101.00} \text{ mm}$$

t_f: Espessura da mesa comprimida.

$$t_f : \underline{5.30} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{10.75}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

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

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico.

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$E : \frac{2038736}{\text{kgf/cm}^2}$$

$$f_y : \frac{2548.42}{\text{kgf/cm}^2}$$

$$M_{pl} : \frac{0.734}{t}$$

$$Z_y : \frac{28.80}{\text{cm}^3}$$

$$f_y : \frac{2548.42}{\text{kgf/cm}^2}$$

$$\gamma_{a1} : \frac{1.10}{\text{---}}$$

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

$$\lambda > \lambda_r$$

$$50.08 > 39.60$$

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

$$M_{Rd} : \frac{0.417}{t \cdot m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \frac{50.08}{\text{---}}$$

Sendo:

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

$$h : \frac{240.40}{\text{mm}}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \frac{4.80}{\text{mm}}$$

$$\lambda_r = 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_r : \frac{39.60}{\text{---}}$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \frac{2038736}{\text{kgf/cm}^2}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \frac{2548.42}{\text{kgf/cm}^2}$$

$$M_{cr} = \frac{W_{ef}^2}{W} \cdot f_y$$

$$M_{cr} : \frac{0.459}{t \cdot m}$$

Sendo:

W_{ef,y}: Módulo de resistência mínimo elástico, relativo ao eixo de flexão, para uma seção que tem uma mesa comprimida de largura igual a b_{ef} dada por F.3.2, com σ igual a f_y.

$$W_{ef,y} : \frac{18.02}{\text{cm}^3}$$

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

$$W_y : \frac{18.02}{\text{cm}^3}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \frac{2548.42}{\text{kgf/cm}^2}$$

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

$$M_{pl} : \frac{0.734}{t}$$

Onde:

Z_y: Módulo de resistência plástico.

$$Z_y : \frac{28.80}{\text{cm}^3}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \frac{2548.42}{\text{kgf/cm}^2}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : \frac{1.10}{\text{---}}$$

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.022} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$\mathbf{V_{Sd}} : \underline{0.331} \text{ t}$$

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

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$\mathbf{9.53} \leq \mathbf{34.08}$$

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

$$\mathbf{V_{Rd}} : \underline{14.882} \text{ t}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{9.53}$$

Sendo:

b_f: Largura das mesas.

$$\mathbf{b_f} : \underline{101.00} \text{ mm}$$

t_f: Espessura das mesas.

$$\mathbf{t_f} : \underline{5.30} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{34.08}$$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem.

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

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$\mathbf{E} : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$\mathbf{f_y} : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$\mathbf{V_{pl}} : \underline{16.370} \text{ t}$$

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

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

$$\mathbf{A_w} : \underline{10.71} \text{ cm}^2$$

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:

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

$$\eta : \underline{0.124} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.067 m do nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$V_{Sd} : \underline{2.072} \text{ t}$$

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

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$50.08 \leq 69.57$$

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

$$V_{Rd} : \underline{16.747} \text{ t}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{50.08}$$

Sendo:

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

$$h : \underline{240.40} \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : \underline{4.80} \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : \underline{69.57}$$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem.

$$k_v : \underline{5.00}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$V_{pl} : \underline{18.422} \text{ t}$$

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w = d \cdot t_w$$

$$A_w : \underline{12.05} \text{ cm}^2$$

d: Altura total da seção transversal.

$$d : \underline{251.00} \text{ mm}$$

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:

$$\eta \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.724} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$N_{t,Sd} : \underline{0.950} \text{ t}$$

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

$$M_{x,Sd} : \underline{3.038} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$M_{y,Sd} : \underline{0.039} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$0.018 < 0.200$$

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

$$\eta : \underline{0.724}$$

Onde:

$N_{t,Rd}$: Força axial resistente de cálculo de tração (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.2).

$$N_{t,Rd} : \underline{53.517} \text{ t}$$

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

$$M_{x,Rd} : \underline{4.888} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$M_{y,Rd} : \underline{0.417} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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:

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

$$\eta : \underline{0.105} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se num ponto situado a uma distância de 0.270 m do nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP.

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

$$T_{Sd} : \underline{0.007} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

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

$$T_{Rd} : \underline{0.067} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Onde:

W_T : Módulo de resistência à torção.

$$W_T : \underline{4.79} \text{ cm}^3$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

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

Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.5.2.2)

Este caso não está contemplado pela norma e, portanto, não é possível realizar a verificação.

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.830} \quad \checkmark$$

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

$$\eta : \underline{0.070} \quad \checkmark$$

(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:)

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

$$\eta : \underline{0.758} \quad \checkmark$$

O coeficiente de aproveitamento desfavorável produz-se no nó N19, para a combinação de ações 1.5·PP no ponto da seção transversal de coordenadas X = 50.50 mm, Y = 125.50 mm em relação ao centro de gravidade.

As tensões normais σ_{Sd} são dadas por:

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

$$\sigma_{Sd} : \underline{1923.23} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

$$\sigma_{N_{Sd}} = \frac{N_{t,Sd}}{A_g}$$

$$\sigma_{N_{Sd}} : \underline{41.11} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$N_{t,Sd} : \underline{0.950} \text{ t}$$

A_g: Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{23.10} \text{ cm}^2$$

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

$$\sigma_{M_{x,Sd}} : \underline{1664.37} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$M_{x,Sd} : \underline{3.038} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$I_x : \underline{2291.00} \text{ cm}^4$$

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

$$Y : \underline{125.50} \text{ mm}$$

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

$$\sigma_{M_{y,Sd}} : \underline{217.75} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$M_{y,Sd} : \underline{0.039} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$I_y : \underline{91.00} \text{ cm}^4$$

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

$$X : \underline{50.50} \text{ mm}$$

As tensões tangenciais τ_{Sd} são dadas por:

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

$$\tau_{Sd} : \underline{-96.82} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

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

$$\tau_{V_{x,Sd}} : \underline{0.00} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$V_{x,Sd} : \underline{0.331} \text{ t}$$

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.

$$I_y : \underline{91.00} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

$$t : \underline{5.30} \text{ mm}$$

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

$$\tau_{V_{y,Sd}} : \underline{0.00} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$V_{y,Sd} : \underline{1.885} \text{ t}$$

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.

$$I_x : \underline{2291.00} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

$$t : \underline{5.30} \text{ mm}$$

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

$$\tau_{T_{Sd}} : \underline{-96.82} \text{ kgf/cm}^2$$

Sendo:

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

$$T_{Sd} : \underline{0.005} \text{ t}\cdot\text{m}$$

J: Constante de torção da seção transversal.

$$J : \underline{2.54} \text{ cm}^4$$

t: Espessura.

$$t : \underline{5.30} \text{ mm}$$

As tensões totais **f_{Sd}** são dadas por:

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

$$f_{Sd} : \underline{1930.53} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$\sigma_{Rd} : \underline{2316.75} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

$$\sigma_{Rd} : \underline{2316.75} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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:

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

$$\sigma_{Rd} : \underline{2316.75} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

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

$$\chi : \underline{1.000}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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):

$$\tau_{Rd} : \underline{1381.31} \text{ kgf/cm}^2$$

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

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

$$\tau_{Rd} : \underline{1390.05} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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:

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

$$\tau_{Rd} : \underline{1381.31} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

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

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

$$\chi : \underline{0.994}$$

Sendo:

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

$$\lambda_0 : \underline{0.123}$$

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

$$\tau_e : \underline{101479.21} \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$\sigma_E : \underline{20295.84} \text{ kgf/cm}^2$$

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.

$$E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$$

ν: Coeficiente de Poisson.

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

t: Espessura.

$$t : \underline{5.30} \text{ mm}$$

h: Largura.

$$h : \underline{50.50} \text{ mm}$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

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

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

$$f_{Rd} : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

**DEGRAUS DA ESCADA
SEÇÃO MAIS SOLICITADA**

Barra N1/N2

Perfil: Z300X50X6.3 Material: Aço (USI SAC 41)									
	Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas					
	Inicial	Final		Área (cm²)	I _x ⁽¹⁾ (cm4)	I _y ⁽¹⁾ (cm4)	I _{xy} ⁽³⁾ (cm4)	I _t ⁽²⁾ (cm4)	α ⁽⁴⁾ (graus)
	N1	N2	1.650	23.88	2487.65	43.22	-204.30	3.16	4.7
	Notas: ⁽¹⁾ Inércia em relação ao eixo indicado ⁽²⁾ Momento de inércia à torção uniforme ⁽³⁾ Produto de inércia ⁽⁴⁾ É o ângulo que forma o eixo principal de inércia U em relação ao eixo X, positivo no sentido anti-horário.								
		Flambagem		Flambagem lateral					
		Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.				
	β	1.00	1.00	0.00	0.00				
	L _k	1.650	1.650	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									

Barra	VERIFICAÇÕES (NBR 14762: 2001)													Estado
	b/t	λ	N_t	N_c	M_x	M_y	V_x	V_y	$M_x V_y$	$M_y V_x$	$N_t M_x M_y$	$N_t M_y M_x$	M_t	
N1/N2	(b _w /t) ≤ 200 Passa	$\lambda_{xx} \leq 300$ $\lambda_{yy} \leq 300$ Passa	$N_{t, Sd} = 0.00$ N.P. ⁽¹⁾	$N_{c, Sd} = 0.00$ N.P. ⁽²⁾	$M_{Sd} = 0.00$ N.P. ⁽³⁾	x: 0 m $\eta = 15.0$	x: 0 m $\eta = 1.5$	$V_{Sd} = 0.00$ N.P. ⁽⁴⁾	N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\eta = 2.3$	N.P. ⁽⁶⁾	N.P. ⁽⁷⁾	$M_{t, Sd} = 0.00$ N.P. ⁽⁸⁾	PASSA $\eta = 15.0$
Notação: b/t: Valores máximos da relação comprimento-espessura λ : Limitação de esbeltez N_t : Resistência à tração N_c : Resistência à compressão M_x : Resistência à flexão eixo X M_y : Resistência à flexão eixo Y V_x : Resistência ao esforço cortante X V_y : Resistência ao esforço cortante Y $M_x V_y$: Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados $M_y V_x$: Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados $N_t M_x M_y$: Resistência à flexo-compressão $N_t M_y M_x$: Resistência à flexo-tração M_t : Resistência à torção x: Distância à origem da barra η : Coeficiente de aproveitamento (%) N.P.: Não procede														
Verificações desnecessárias para o tipo de perfil (N.P.): ⁽¹⁾ A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de tração. ⁽²⁾ A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de compressão. ⁽³⁾ A verificação não será executada, já que não existe momento fletor. ⁽⁴⁾ A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante. ⁽⁵⁾ Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada. ⁽⁶⁾ Não há interação entre o esforço axial de compressão e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada. ⁽⁷⁾ Não há interação entre o esforço axial de tração e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada. ⁽⁸⁾ A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.														

Valores máximos da relação comprimento-espessura (NBR 14762: 2001 Artigo 7.1 Tabela 3)

Elemento: Alma

Em almas de vigas sem enrijecedores transversais, a relação largura-espessura não deve ultrapassar o valor 200.

$$(b/t) \leq 200$$

$$(b/t) : \underline{44} \quad \checkmark$$

Sendo:

b: Comprimento do elemento.

t: A espessura.

$$b : \underline{274.80} \text{ mm}$$

$$t : \underline{6.30} \text{ mm}$$

Limitação de esbeltez (NBR 14762: 2001, Itens 7.6.2 e 7.7.4)

É recomendado que o índice de esbeltez λ das barras tracionadas não exceda o valor 300.

$$\lambda = KL/r < 300$$

$$\lambda_{\max} : \underline{122.7} \quad \checkmark$$

Onde:

$\lambda_{\max}$: Esbeltez máxima.

$$\lambda_{\max} : \underline{122.7}$$

Resistência à tração (NBR 14762: 2001, Artigo 7.6)

A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de tração.

Resistência à compressão (NBR 14762: 2001, Artigo 7.7)

A verificação não será executada, já que não existe esforço axial de compressão.

Resistência à flexão eixo X (NBR 14762: 2001, Artigo 7.8.1)

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

Resistência à flexão eixo Y (NBR 14762: 2001, Artigo 7.8.1)

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.150} \quad \checkmark$$

O momento fletor desfavorável de cálculo M_{Sd} é obtido para o nó N1, para a combinação de hipóteses 1.25·PP.

$$M_{Sd} : \underline{0.027} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

$$M_{Rd} : \underline{0.177} \text{ t}\cdot\text{m}$$

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

Onde:

W_{ef} : Módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 7.2, com σ calculada para o estado limite último de escoamento da seção.

f_y : Tensão de escoamento.

γ : Coeficiente de ponderação das resistências.

$$W_{ef} : \underline{7.66} \text{ cm}^3$$

$$f_y : \underline{2548.42} \text{ kgf/cm}^2$$

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

Resistência ao esforço cortante X (NBR 14762: 2001, Artigo 7.8.2)

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.015} \quad \checkmark$$

O esforço cortante solicitante de cálculo desfavorável V_{sd} produz-se no nó N1, para a combinação de hipóteses 1.25·PP.

$$V_{sd} : \underline{0.097} \quad t$$

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

$$V_{sd} : \underline{0.048} \quad t$$

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

$$^{(1)}V_{Rd} : \underline{3.275} \quad t$$

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

$$1.08(EK_v/f_y)^{0.5} : \underline{33.88}$$

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

$$h/t : \underline{5.94}$$

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

$$1.4(EK_v/f_y)^{0.5} : \underline{43.92}$$

Onde:

t: Espessura da alma.

$$t : \underline{6.30} \quad mm$$

h: Largura da alma.

$$h : \underline{37.40} \quad mm$$

f_y: Tensão de escoamento.

$$f_y : \underline{2548.42} \quad kgf/cm^2$$

E: Módulo de elasticidade.

$$E : \underline{2089704} \quad kgf/cm^2$$

γ : Coeficiente de ponderação das resistências.

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

K_v: Coeficiente de flambagem local por esforço cortante que, para uma mesa, é dado por:

$$K_v : \underline{1.20}$$

$$k_v = 1.20$$

Resistência ao esforço cortante Y (NBR 14762: 2001, Artigo 7.8.2)

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

Resistência ao momento fletor X e esforço cortante Y combinados (NBR 14762: 2001, Artigo 7.8.3)

Não há interação entre o momento fletor e o esforço cortante para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência ao momento fletor Y e esforço cortante X combinados (NBR 14762: 2001, Artigo 7.8.3)

Os esforços de cálculo desfavoráveis M_{sd} e V_{sd} são obtidos no nó N1, 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:

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

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

Onde:

M_{sd}: Momento fletor solicitante de cálculo.

$$M_{sd} : \underline{0.027} \quad t \cdot m$$

M_{0,Rd}: Momento fletor resistente de cálculo conforme 7.8.1.1.

$$M_{0,Rd} : \underline{0.177} \quad t \cdot m$$

V_{sd}: Força cortante solicitante de cálculo.

$$V_{sd} : \underline{0.097} \quad t$$

V_{Rd}: Força cortante resistente de cálculo conforme 7.8.2.

$$V_{Rd} : \underline{6.550} \quad t$$

Resistência à flexo-compressão (NBR 14762: 2001, Artigo 7.9.2)

Não há interação entre o esforço axial de compressão e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência à flexo-tração (NBR 14762: 2001, Artigo 7.9.3)

Não há interação entre o esforço axial de tração e o momento fletor para nenhuma combinação. Assim a verificação não será executada.

Resistência à torção (Critério da CYPE Ingenieros)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.