

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 1 of 101	

INSTITUTO IDD

**PÓS-GRADUAÇÃO
ESTRUTURAS METÁLICAS**

**MEMORIAL DE CÁLCULO
EDIFÍCIO INDUSTRIAL EM AÇO**

ALUNOS: Mauro Cesar Chimentão
Ricardo Weigert Machado

Data	Revisão	Descrição	Elaboração	Verificação	Aprovação

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 2 of 101	

SUMÁRIO

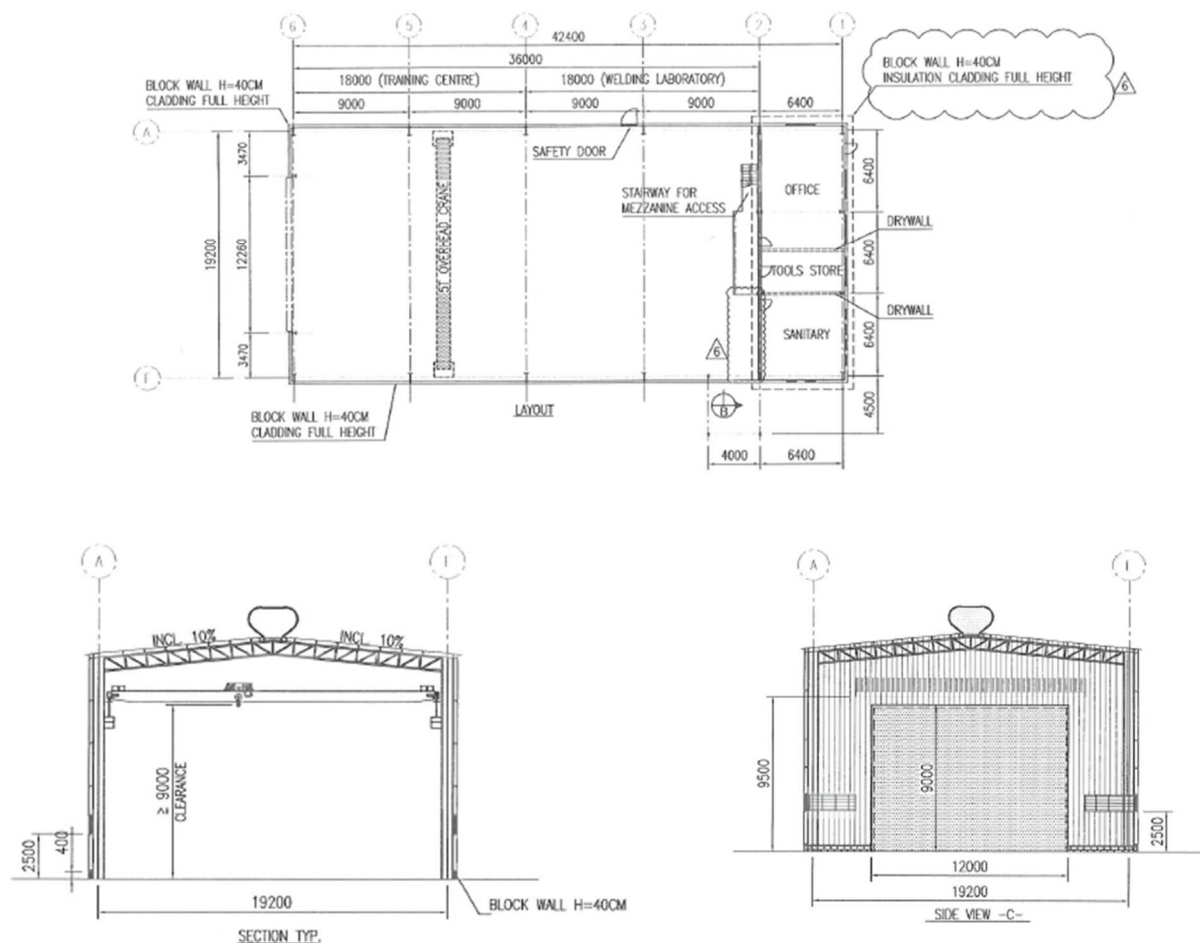
1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	3
2	NORMAS UTILIZADAS.....	3
3	MATERIAIS UTILIZADOS.....	4
4	DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA	4
5	CARREGAMENTOS E COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....	7
5.1	Carregamentos	7
5.2	Cargas Permanentes (Dead Load)	8
5.3	Cargas Acidentais (Live Load)	8
5.4	Ponte Rolante (Crane Load)	9
5.5	Cargas Vento (Wind).....	15
5.6	Combinações de Ações	18
5.7	Estado Limite Último (ELU)	19
5.8	Estado Limite Serviço (ELS)	20
6	ANÁLISE ESTRUTURAL	22
6.1	Pórtico Plano.....	23
6.2	Barras 1 e 2 – Pilares – Trecho de 9 m (ELU – NBR8800).....	41
6.3	Barras 1 e 2 – Pilares – Trecho de 3 m (ELU – NBR8800).....	52
6.4	Barras 3 e 4 – Consoles (ELU – NBR8800).....	63
6.5	Barras 5 e 6 – Banzo Inferior (ELU – NBR8800).....	74
6.6	Barras 7 e 8 – Banzo Superior (ELU – NBR8800)	79
6.7	Barras 9 a 24 – Diagonais (ELU – NBR8800).....	84
6.8	Barras 25 a 39 –Montantes (ELU – NBR8800)	89
6.9	Deslocamento no Pórtico (ELS).....	94
6.10	Sistema de Contraventamento, Terças de cobertura e Fechamento	95
6.11	Viga de Rolamento (ELU/ELS).....	96
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
8	ANEXOS	101

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 3 of 101	

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Este documento tem por objetivo apresentar o memorial de cálculo, bem como as premissas adotadas no mesmo e seus resultados, para a estrutura metálica do edifício industrial do Laboratório de Soldagem da empresa Saipem do Brasil, localizado em terreno plano ou fracamente acidentado, em região com edificações baixas e esparsas.

O edifício tem suas dimensões principais aproximadas com 36000x19200x14160mm, conforme ilustração que segue:



2 NORMAS UTILIZADAS

As Normas, publicações, recomendações e literaturas adotadas no projeto serão as seguintes:

- NBR 6123 - 1988 - Forças devidas ao vento em edificações;
- NBR 8800 - 2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios;
- NBR 6120 - 1980 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações;

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 4 of 101	

- AISE Technical Report 13 - Guide for the Design and Construction of Mill Buildings;
- Edifícios Industriais em Aço, Projeto e Cálculo, Ildony H. Belei, 6ª Edição de 2010, Editora Pini;
- Estruturas de Aço, Dimensionamento Prático de acordo com a Norma 8800:2008, Walter Pfeil e Michele Pfeil, 8ª Edição de 2009;
- Guia de Especificações Perfilor, Arcelor Mittal, Telhas Metálicas, 3ª Edição de setembro de 2007;
- Catálogo comercial sistema de ventilação, venezianas industriais IVI;

3 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a evolução dos cálculos adotados nesse projeto, foram definidos os seguintes materiais e seus respectivos limites de escoamento e ruptura:

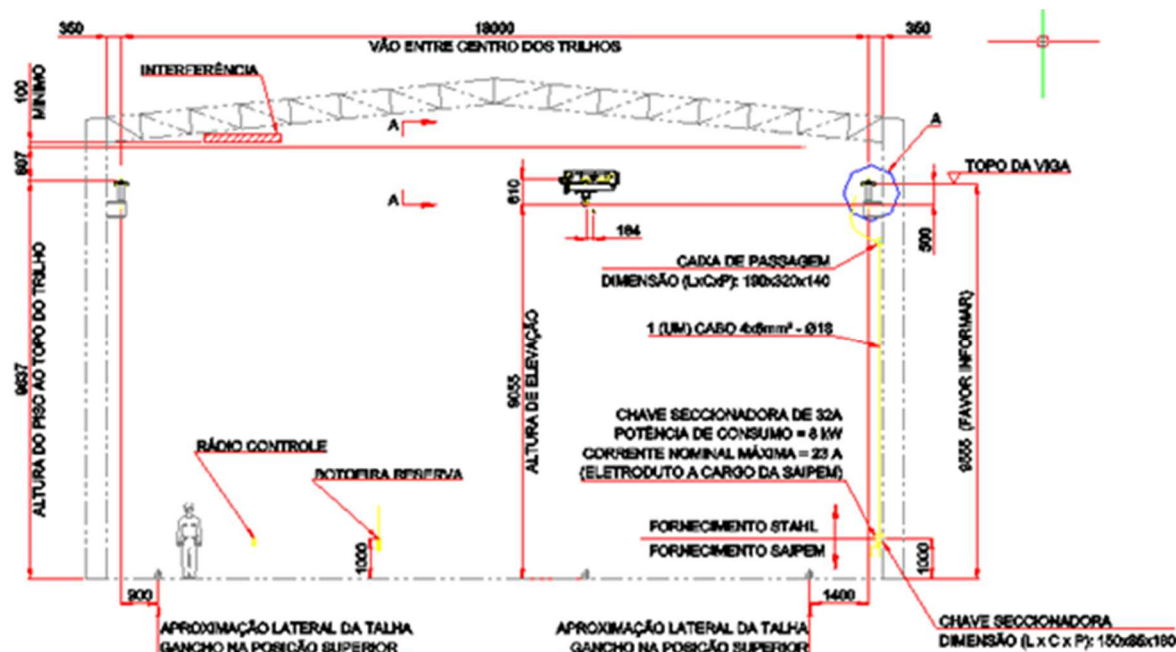
- Perfis laminados em aço ASTM A36, $f_y=250\text{MPa}$, $f_u=400\text{MPa}$;
- Chumbadores em SAE 1020, $f_y=210\text{MPa}$, $f_u=380\text{MPa}$;
- Eletrodos AWS70XX, 70Ksi ($f_u=485\text{MPa}$);

4 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A definição do sistema estrutural adotado nesse projeto obedeceu às premissas de projeto impostas pelo professor, como segue:

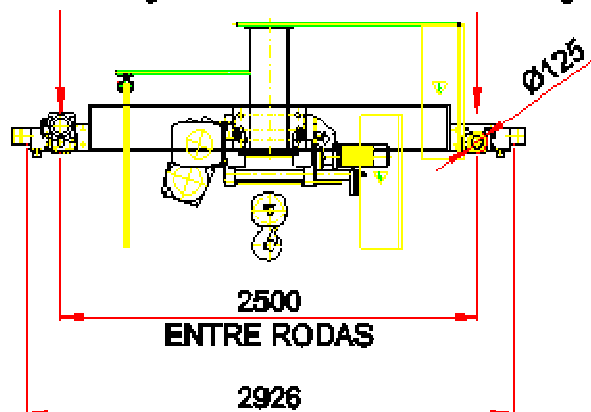
- Vigas treliçadas;
- Banzos, superior e inferior, em perfil “W” laminado da série Aço Minas;
- Diagonais e montantes em cantoneiras laminadas, série nacional;
- Colunas e “consolo” em perfil laminado de alma cheia;
- Vigas de rolamento em perfil soldado monossimétrico, com enrijecedores de alma e de apoio;

Bem como a referência geométrica definida nos arquitetônicos de referência, 176037-AD1-ENG-A-XL-0029-R06 folhas 01 a 03, características de utilização, especificações da ponte rolante 176037-STM-ENG-M-XL-0001-RB folhas 01 a 03, da marca STAHL capacidade 5,0t com vão de 18m, conforme detalhe que segue:



RA = 3500 kgf

RB = 3500 kgf



CORTE A-A

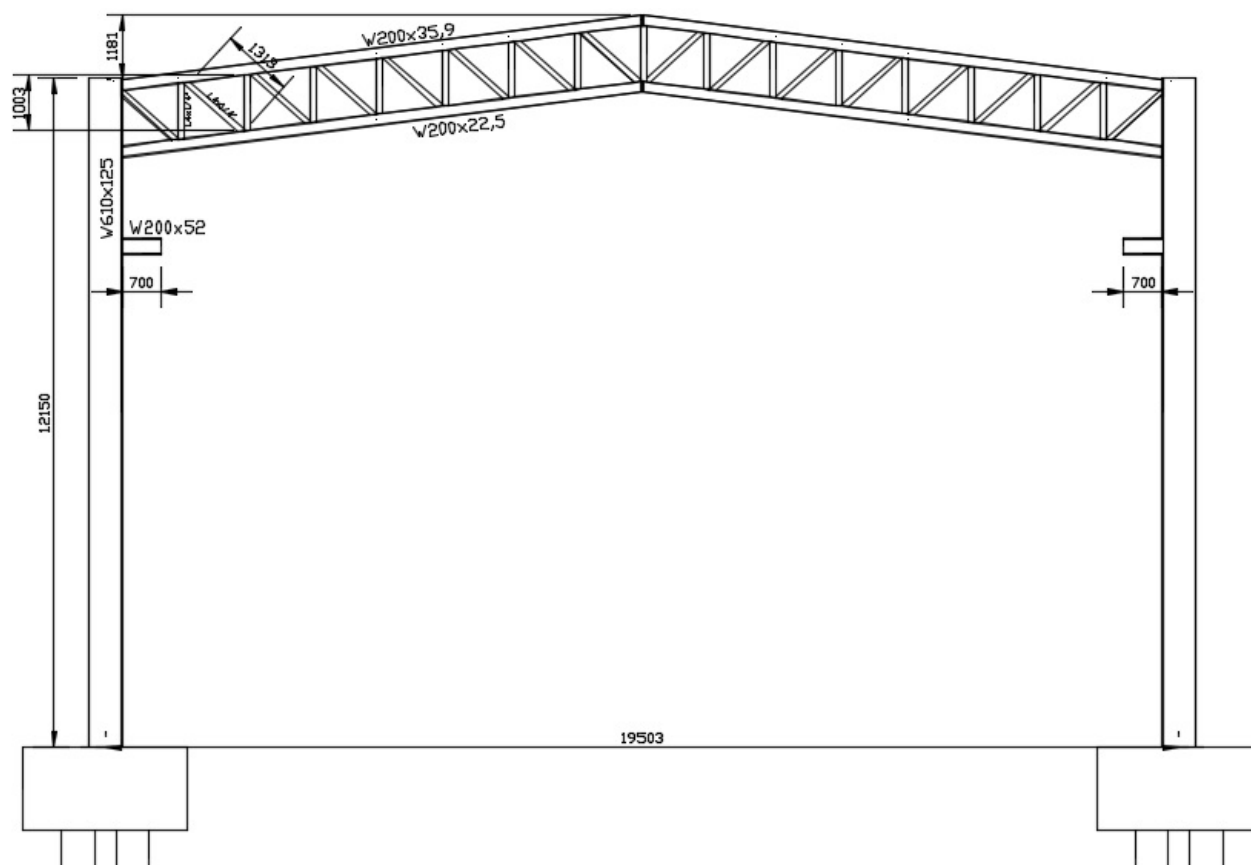
01 (uma) PONTE ROLANTE APOIADA STAHL UNIVIGA CAPACIDADE 5,0 t
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA PONTE ROLANTE:

Capacidade principal	5.000 kg
Vão da ponte	18.000 mm
Distância entre rodas	2.500 mm
Quantidade e diâmetro das rodas	4 x 125 mm
Velocidade de translação (Inversor)	4,0 ... 40,0 m/min
Potência de translação	2 x 0,75 kW
Motorreductor de translação	SF 15220184
Peso da ponte (sem talha)	3.850 kg
Reação máxima / roda	3.500 kg
Ambiente de trabalho	Interno
Temperatura ambiente	45 °C

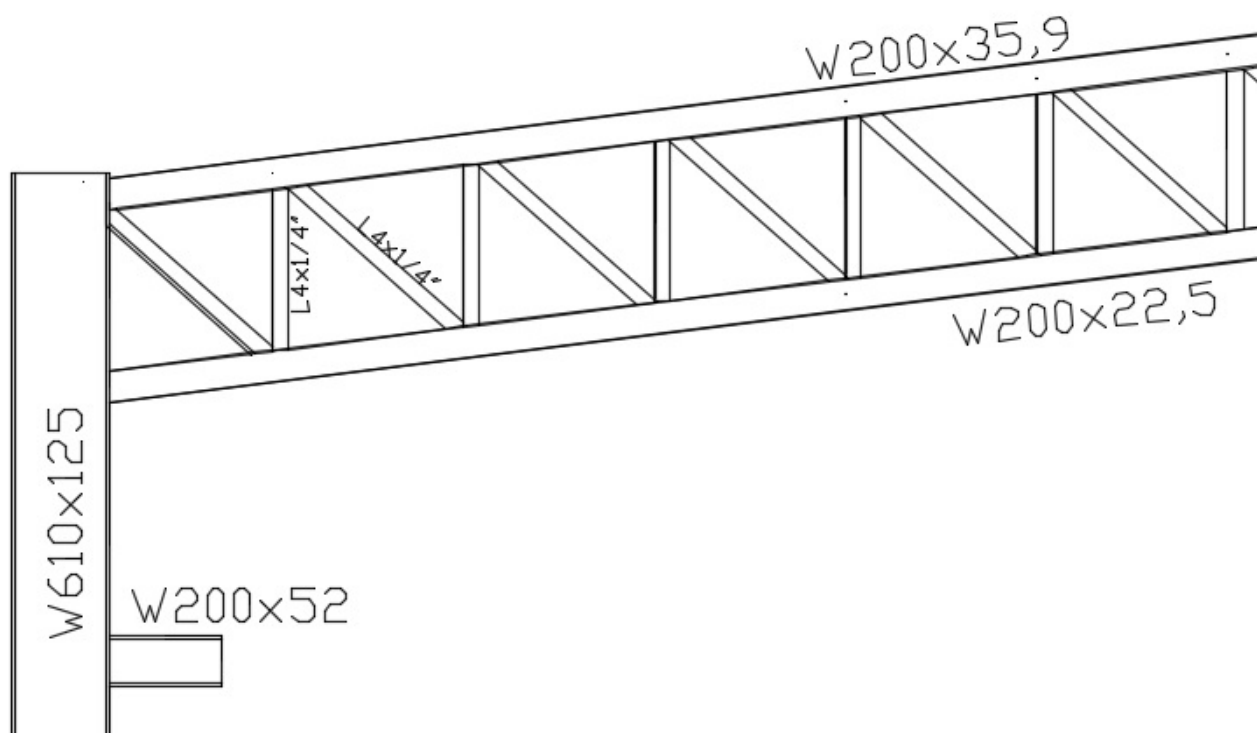
	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 6 of 101	

Com base nas premissas definidas, desenvolvemos um projeto com sistema estrutural aporticado engastado nas bases na direção do plano dos pórticos (transversal ao edifício), e rotulados da direção longitudinal na edificação, com os esforços horizontais, seja do vento, seja do impacto longitudinal da ponte rolante, ou suas combinações, suportados por sistema de contraventamento. No plano do pórtico, optamos por engastar a base dos pilares penalizando um pouco a fundação e otimizando os perfis adotados como pilares, pois identificamos esse benefício para esse caso específico.

Trata-se de pórticos planos treliçados na viga superior, com banzos inferior e superior composto por perfis laminados de “alma cheia”, da série Gerdau Açominas e montantes e diagonais em cantoneira laminada de abas iguais simples. Para os pilares e seus consoles fora definido perfil “W” tipo “H”, da série Gerdau-Açominas, conforme croqui que segue:



	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 7 of 101	



5 CARREGAMENTOS E COMBINAÇÕES DE AÇÕES

5.1 CARREGAMENTOS

Os carregamentos atuantes na estrutura foram definidos de forma conjunta entre as diferentes equipes e o orientador deste trabalho, de forma a gerar uma isonomia na interpretação de tais esforços nos diferentes trabalhos orientados.

Os carregamentos foram classificados em quatro distintos grupos, cargas permanentes, cargas acidentais, cargas provenientes da ação do vento e proveniente da utilização da ponte rolante, no sentido de agrupá-los segundo essas características, para a aplicação das combinações previstas em norma, como segue:

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 8 of 101	

5.2 CARGAS PERMANENTES (DEAD LOAD)

Galpão - Cobertura		
- PP + 10%	(Software)	kg/m ²
- Telha de Cobertura LR 40 0.80mm	7,50	kg/m ²
- Terças, Correntes e Tirantes	5,00	kg/m ²
Somatório	12,50	kg/m ²
- Lanternim IVI 600 (ALA)	35,00	kg/m
Galpão - Fechamento		
- PP + 10%	(Software)	kg/m ²
- Telha de Fechamento LR33 0.80mm	7	kg/m ²
- Terças, Correntes e Tirantes	8	kg/m ²
Somatório (Terças, telhas, acessórios)	15	kg/m ²
- Veneziana IVI VA100	6	kg/m ²
Viga de Rolamento		
- Viga metálica	100	kg/m
- Trilhos e acessórios (TR37)	40	kg/m
Somatório (Viga, trilhos, acessórios)	140	kg/m
Mezanino		
Fôrma Perfilor 59S 0.80mm h=150mm	295	kg/m ²
Revestimento + Regularização	150	kg/m ²
Escada	150	kg/m ²
Corrimão	30	kg/m
Parede	1400	kg/m ³

5.3 CARGAS ACIDENTAIS (LIVE LOAD)

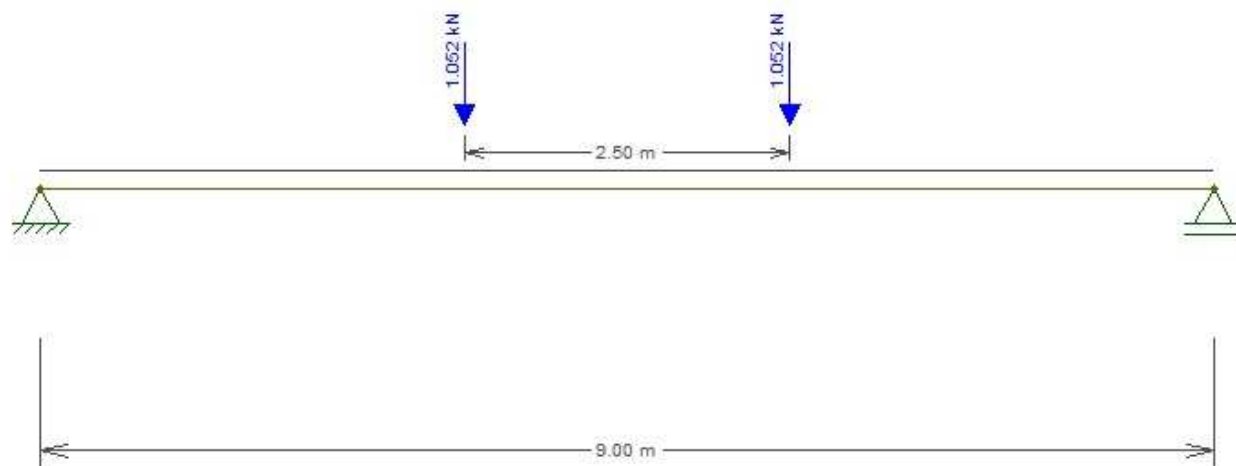
Galpão - Cobertura		
Sobrecarga na Cobertura	100	kg/m ²
Mezanino		
Sobrecarga - Piso	1000	kg/m ²
Sobrecarga - Escada	300	kg/m ²

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 9 of 101	

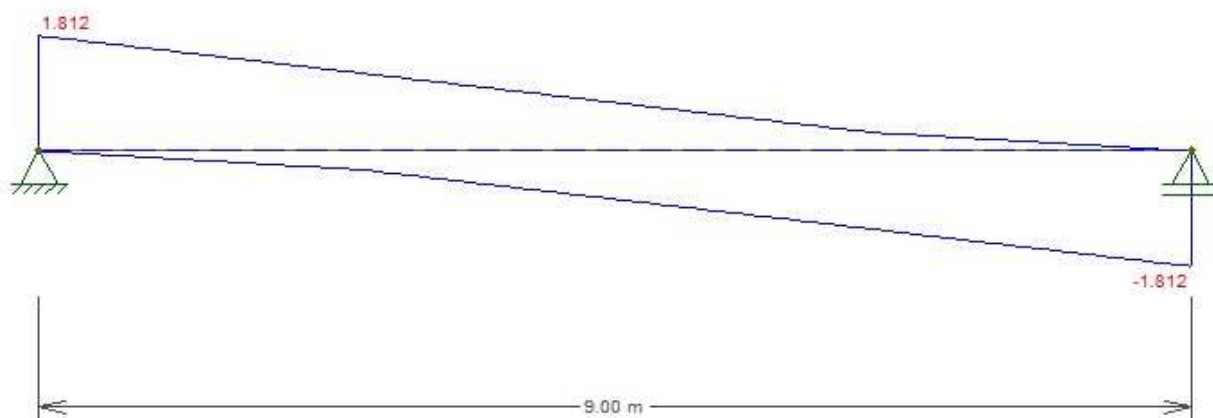
5.4 **PONTE ROLANTE (CRANE LOAD)**

Tendo em vista a simetria do galpão e sua ponte rolante, segue abaixo os carregamentos considerando o troller apenas posicionado à esquerda. Tais carregamentos se espelham na alternância dos valores entre os lados para o caso do posicionamento no lado oposto.

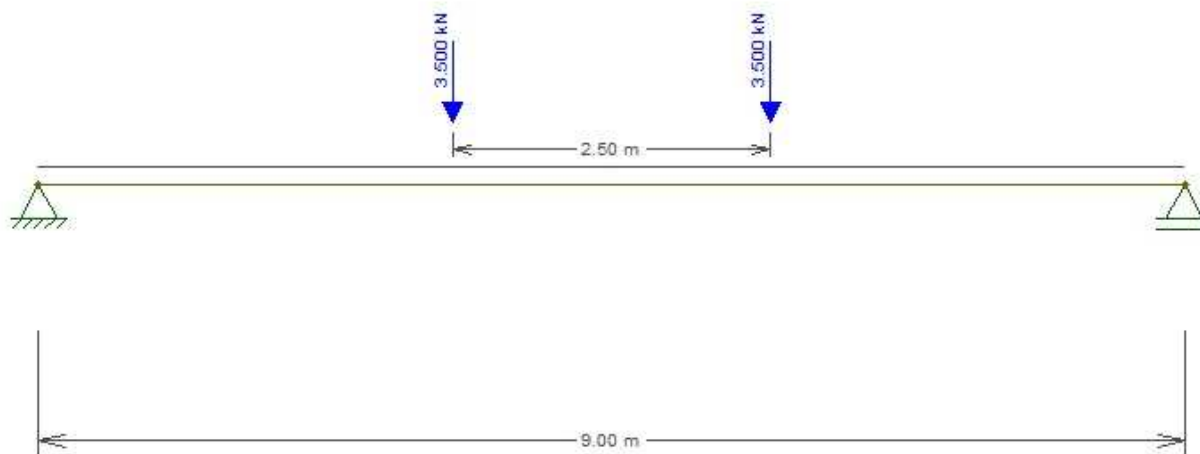
Ponte Rolante		
Crane Dead Load – CD	4.207	kg
LE – CD (por roda)	1052	kg
LE – CD (no apoio)	1811	kg
LD – CD (por roda)	1052	kg
LD – CD (no apoio)	1811	kg
Vertical Load – CVS		
LE – CVS (por roda)	3500	kg
LE – CVS (no apoio)	6028	kg
LD – CVS (por roda)	1103	kg
LD – CVS (no apoio)	1900	kg
Vertical Impact – Ci		
LE – Ci (por roda)	875	kg
LE – Ci (no apoio)	1507	kg
LD – Ci (por roda)	276	kg
LD – Ci (no apoio)	475	kg
Longitudinal Traction – Cls		
LE – Cls (por roda)	700	kg
LE – Cls (no apoio)	1206	kg
LD – Cls (por roda)	221	kg
LD – Cls (no apoio)	380	kg
Side Trust – Css		
LE – Css (por roda)	1000	kg
LE – Css (no apoio)	1722	kg
LD – Css (por roda)	1000	kg
LD – Css (no apoio)	1722	kg



Trem-tipo da CD- Crane Dead Load

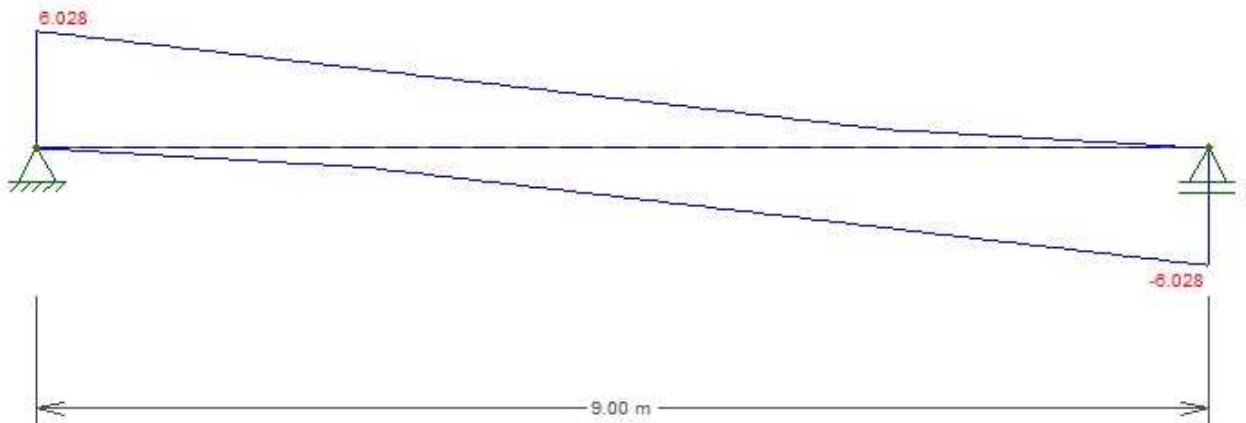


Linha de Influência – CD – Crane Dead Load

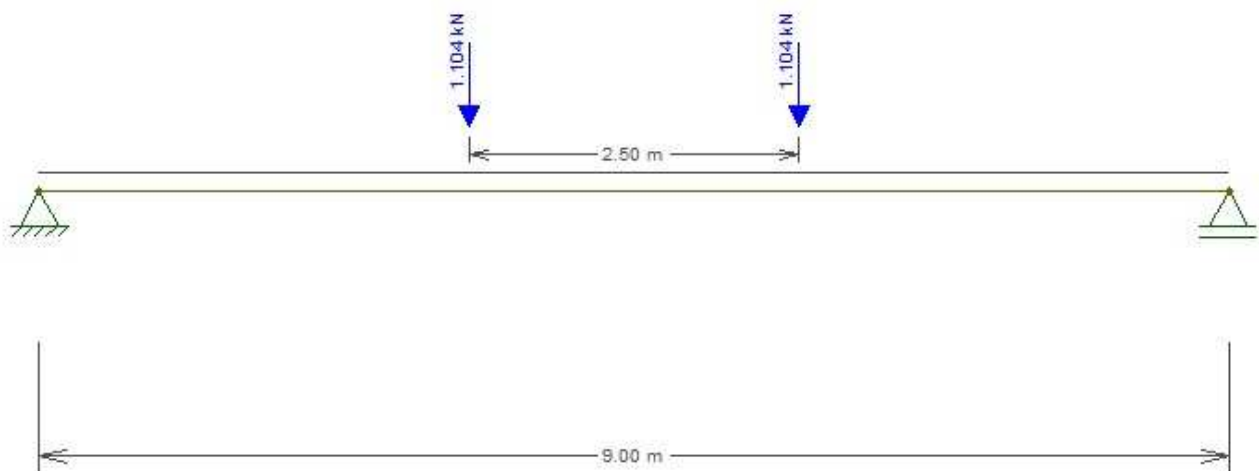


Trem-tipo - LE- CVS – Vertical Load

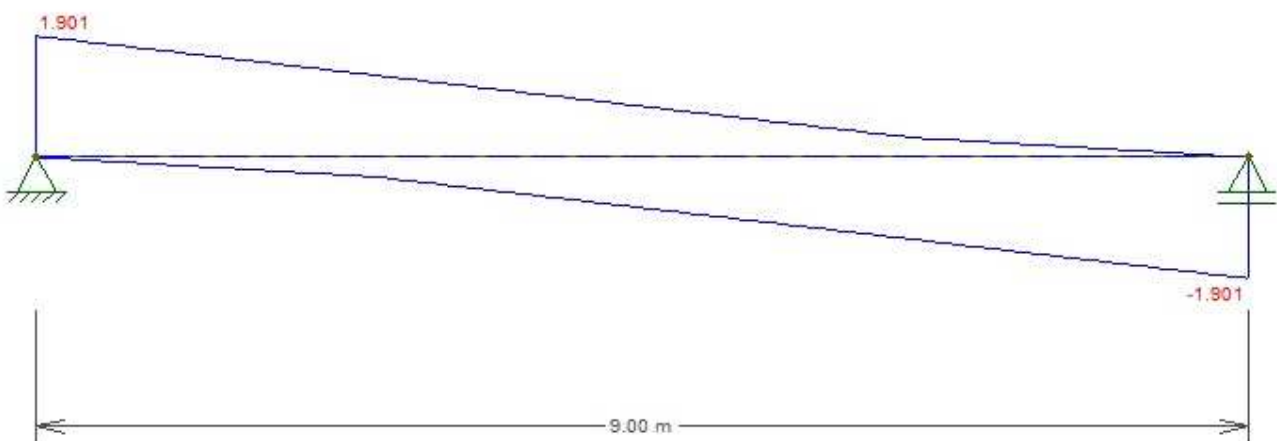
	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 11 of 101	



Linha de Influência - LE- CVS – Vertical Load

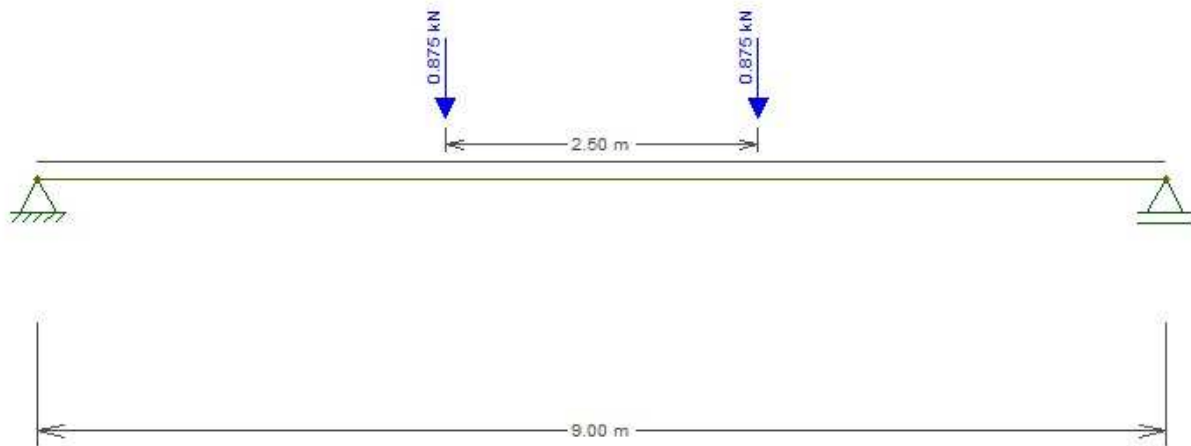


Trem-tipo - LD- CVS – Vertical Load

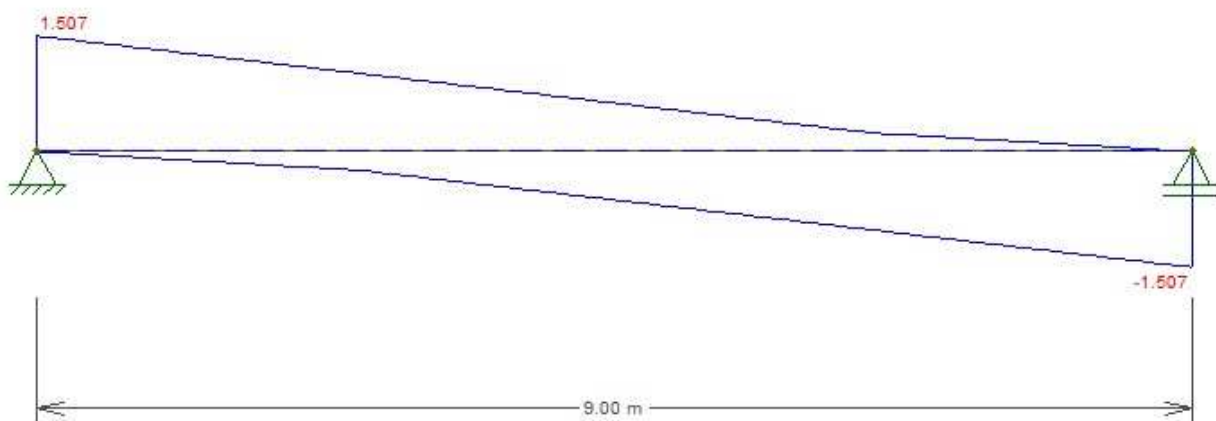


Linha de Influência - LD- CVS – Vertical Load

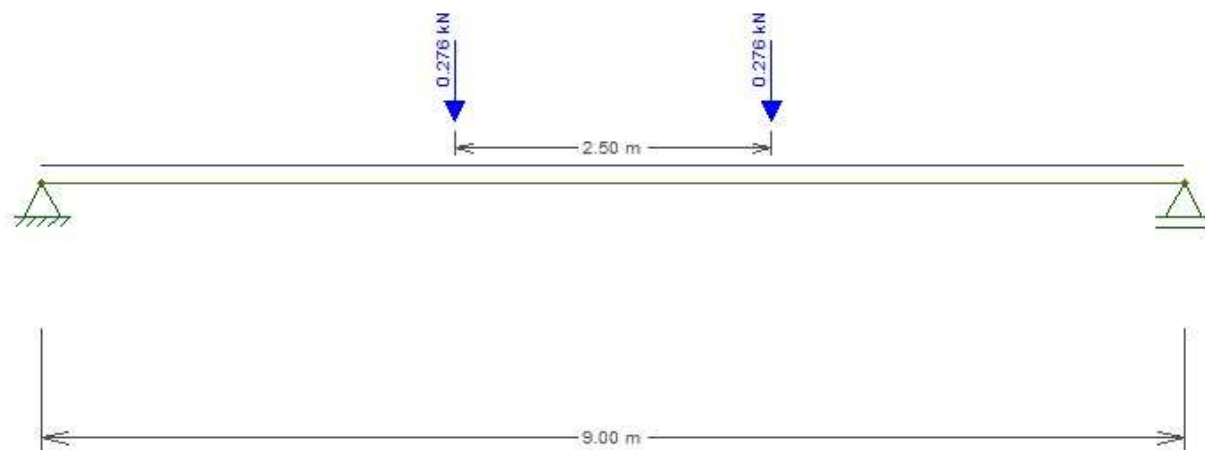
	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 12 of 101	



Trem-tipo - LE- Ci – Vertical Impact

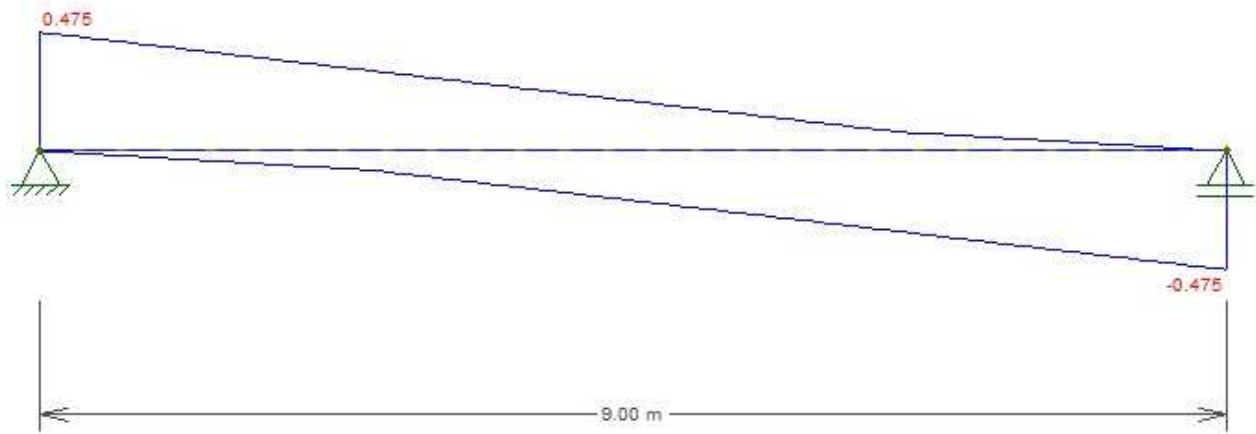


Linha de Influência - LE- Ci – Vertical Impact

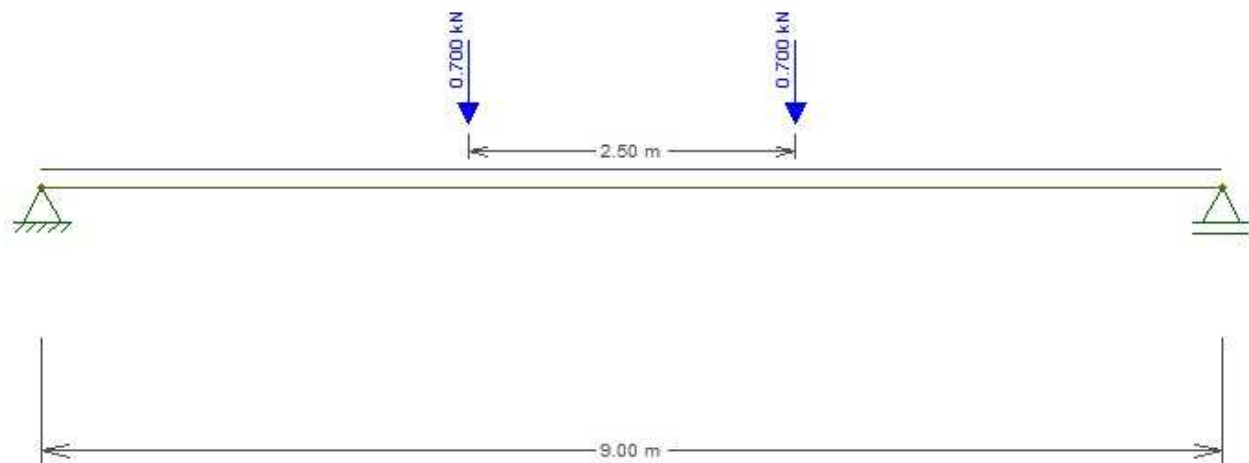


Trem-tipo - LD- Ci – Vertical Impact

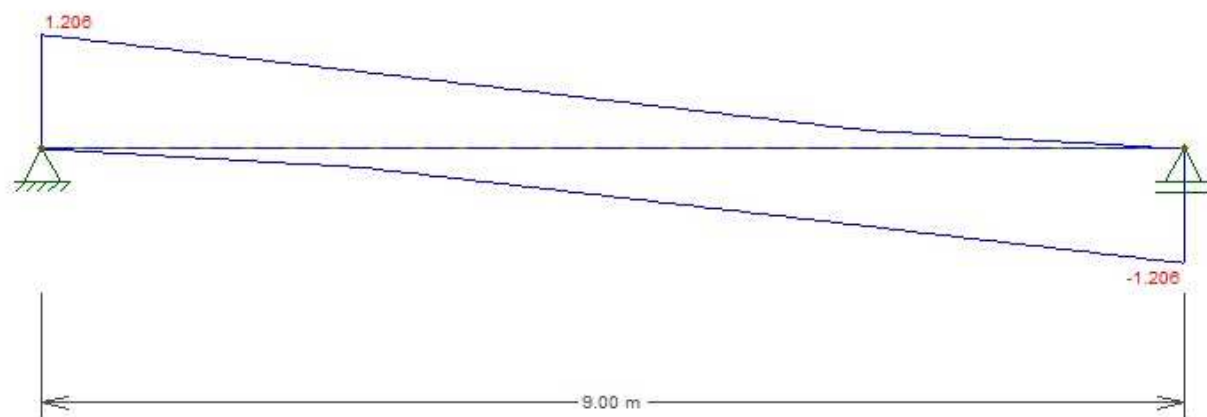
	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 13 of 101	



Linha de Influência - LD- Ci – Vertical Impact

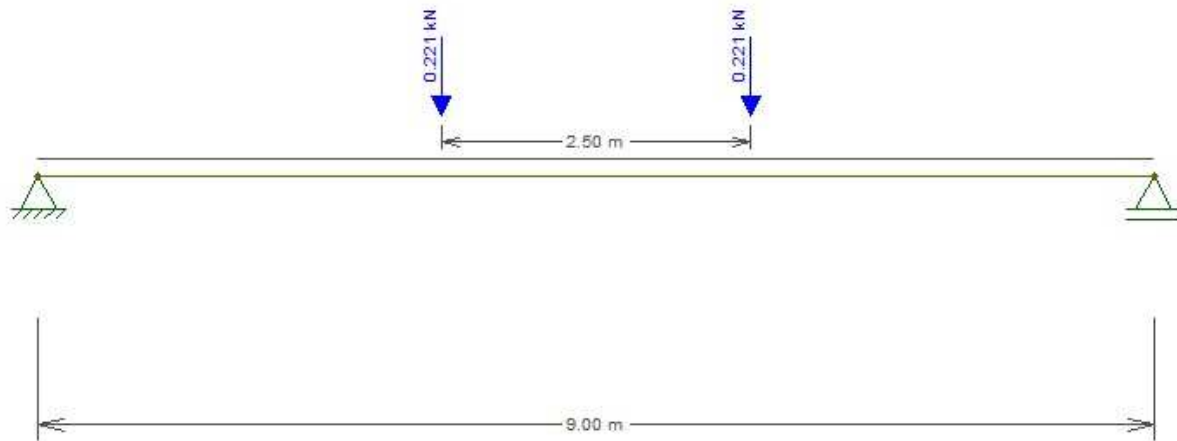


Trem-tipo - LE- Cls – Longitudinal Traction

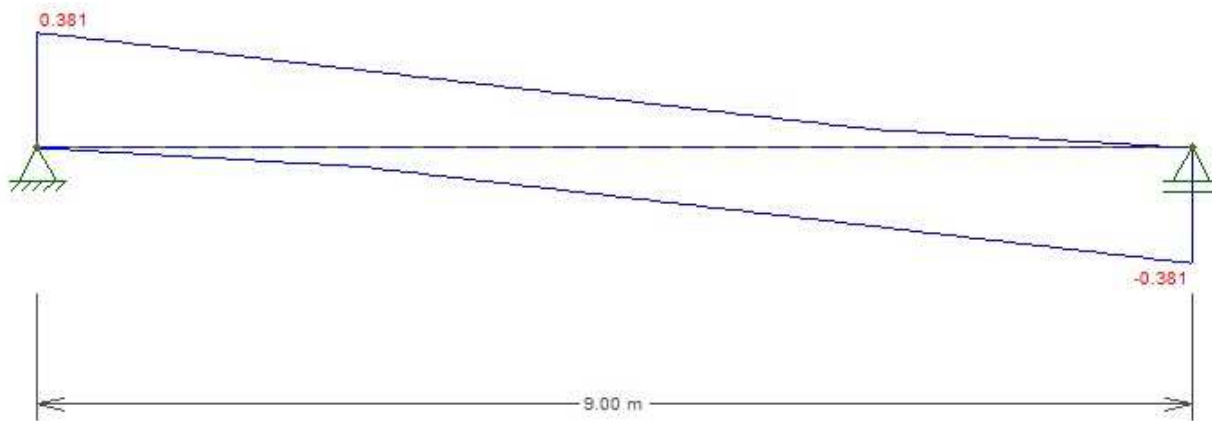


Linha de Influência - LE- Cls – Longitudinal Traction

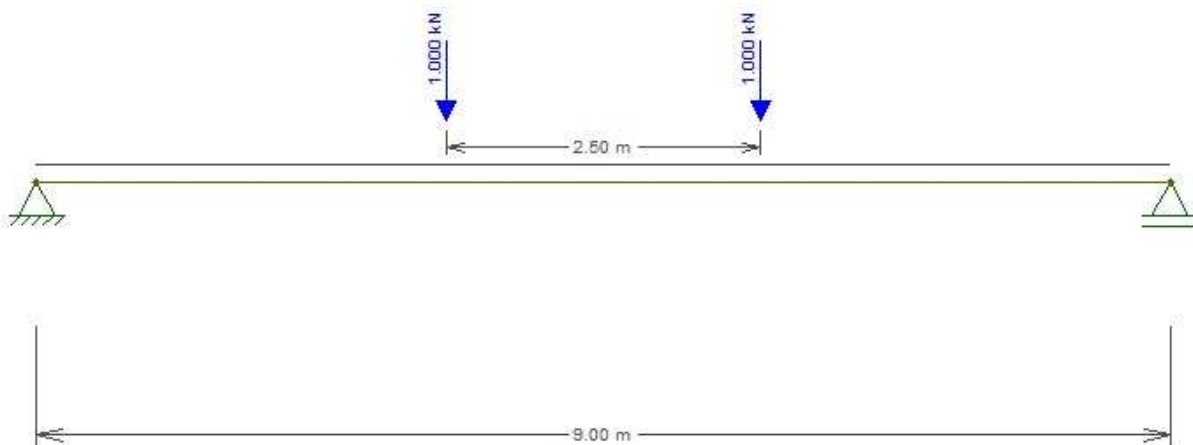
	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 14 of 101	



Trem-tipo - LD- Cls – Longitudinal Traction

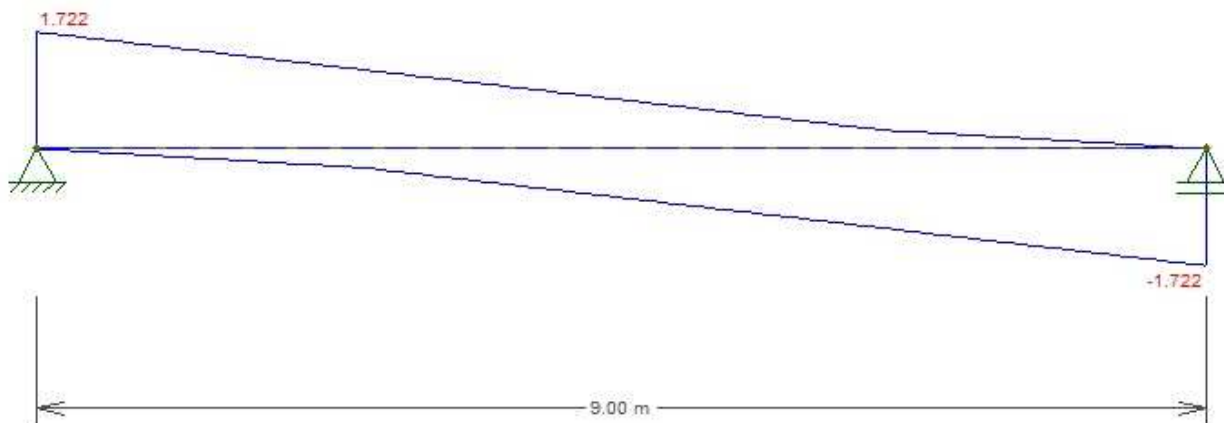


Linha de Influência - LD- Cls – Longitudinal Traction



Trem-tipo - Css – Side Trust

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 15 of 101	



Linha de Influência - Css – Side Trust

5.5 CARGAS VENTO (WIND)

Os esforços provenientes da ação do vento de projeto na estrutura foram calculados conforme preconiza a norma brasileira NBR6123 /1988 - Forças devidas ao vento em edificações, partindo das premissas de projeto conforme segue:

Dados básicos:

- Velocidade Básica do Vento $V_0 = 38 m/s$;
- Fator Topográfico $S_1 = 1$;
- Fator de rugosidade do terreno, Categoria III, Classe B (vento 90°) e Classe A (vento 0°), Fator Estatístico $S_3 = 1$;
- Para o vento atuando a 0° , $V_0 S_{2-5} = 0,88$; $S_{2-10} = 0,94$; $S_{2-12,5} = 0,965$;
- Para o vento atuando a 90° , $V_0 S_{2-5} = 0,86$; $S_{2-10} = 0,92$; $S_{2-12,5} = 0,947$;

Pressão Dinâmica do Vento “q”:

- Velocidade Característica do Vento $V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$;
- Pressão dinâmica do vento $q = 0,613 \cdot V_k^2 \therefore$
- Para o vento atuando a 0° , $q_5 = 0,615 kN/m^2$; $q_{10} = 0,706 N/m^2$; $q_{15} = 0,743 N/m^2$
- Para o vento atuando a 90° , $q_5 = 0,586 kN/m^2$; $q_{10} = 0,678 N/m^2$; $q_{15} = 0,716 N/m^2$;

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 16 of 101	

Verificação de Abertura Dominante:

	Lado	Área [m²]	Portão	Veneziana	Lanternim	Total [m²]	Permeabilidade
Fachada	C	239,62	108	3,1	-	111,1	46,4%
Esquerda	A	470,4	-	18	-	18	3,8%
Direita	B	470,4	-	18	-	18	3,8%
Fundos	D	239,62	-	-	-	0	0,0%
Água Esq.	-	407,04	-	-	9,6	9,6	2,4%
Água Dir.	-	407,04	-	-	9,6	9,6	2,4%

- Área Dominante 111,1m²;
- Outras Áreas 55,2m²;
- Razão;

$$\frac{\text{Abertura Dominante}}{\text{Outras áreas}} = 2,01;$$
- Conforme item 6.2.5 da NBR 6123/88, seguem os valores:

Cpi	V0
Barlavento	0,5
Sotavento	-0,3
Cpi	V90
Face paralelas	-0,9

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 17 of 101	

Coeficientes de Pressão e Forma:

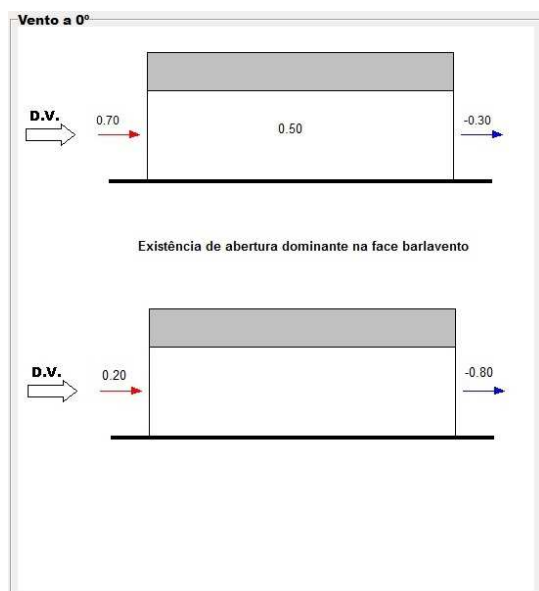


Figura 1 – V0 - Barlavento

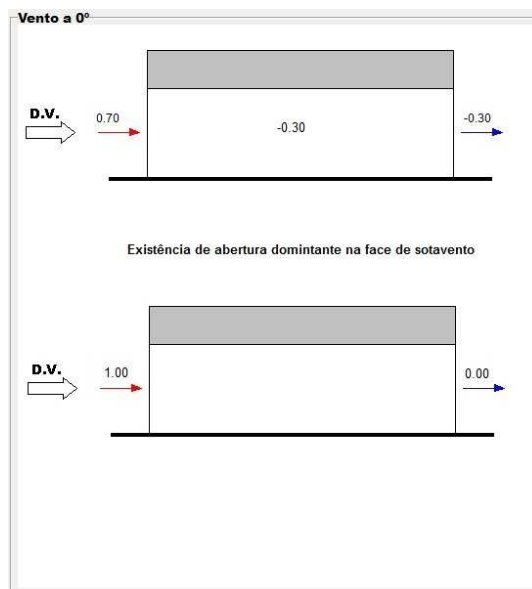


Figura 2 - V0 - Sota-vento

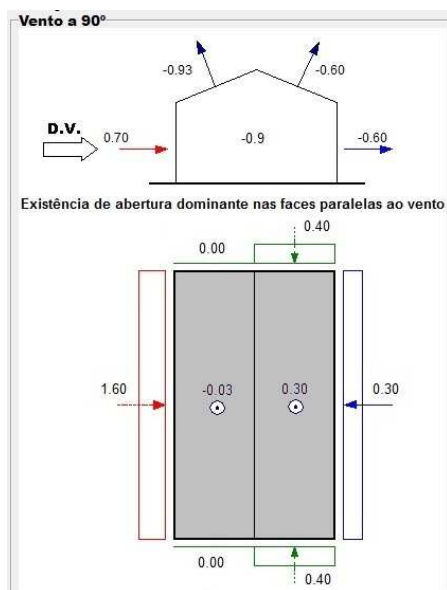


Figura 3 - V90 - Faces Paralelas

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 18 of 101	

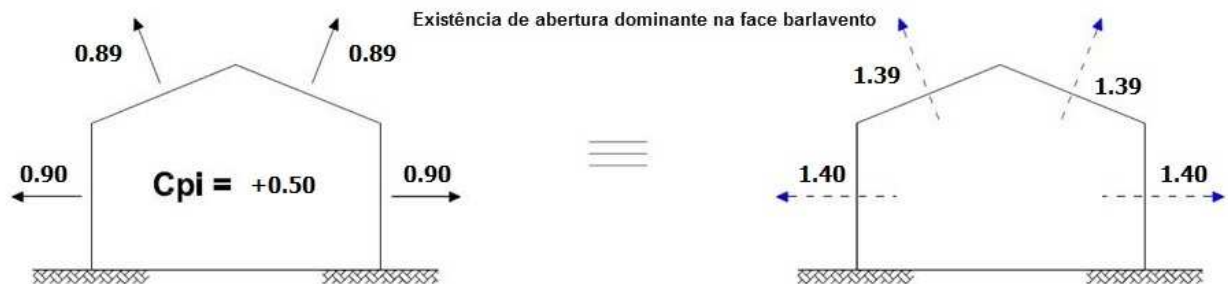


Figura 4 - V0 à Barlavento

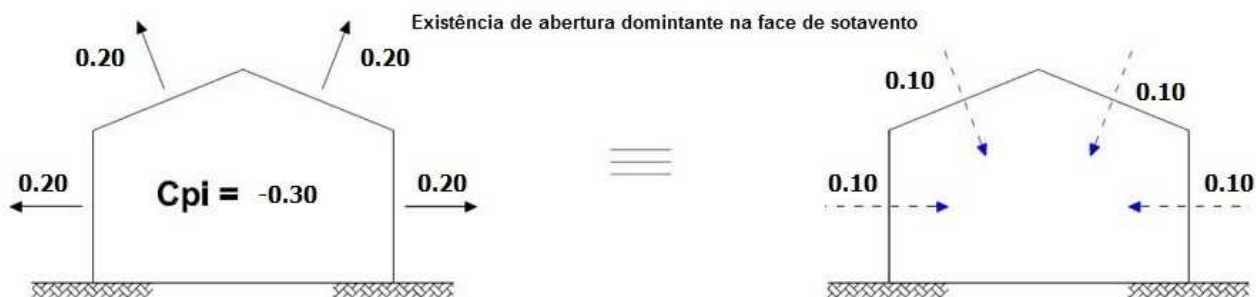


Figura 4 - V0 à Sota-vento

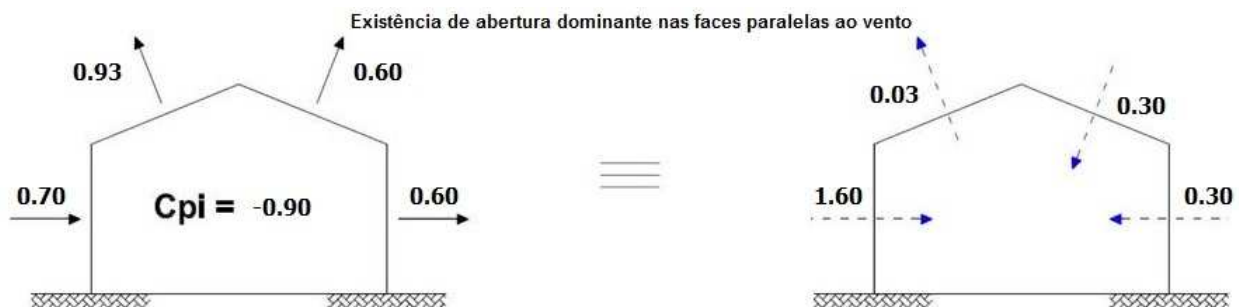


Figura 5 - V90 à Faces Paralelas

5.6 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Para essa estrutura devido às suas características peculiares, em especial a existência de ponte rolante, foram utilizadas as combinações de carregamento previstas no AISE Technical Report 13 - Guide for the Design and Construction of Mill Buildings, publicação específica da norma americana, como segue:

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 19 of 101	

5.7 ESTADO LIMITE ÚLTIMO (ELU)

Comb1	(D+PP)
Comb2	(D+PP) + LR
Comb3	(D+PP) + 0,75 LR
Comb4	(D+PP) + W1
Comb5	(D+PP) + W2
Comb6	(D+PP) + W3
Comb7	(D+PP) + W4
Comb8	(D+PP) + 0,75 W1 + 0,75 LR
Comb9	(D+PP) + 0,75 W2 + 0,75 LR
Comb10	(D+PP) + 0,75 W3 + 0,75 LR
Comb11	(D+PP) + 0,75 W4 + 0,75 LR
Comb12	0,6 (D+PP) + W1
Comb13	0,6 (D+PP) + W2
Comb14	0,6 (D+PP) + W3
Comb15	0,6 (D+PP) + W4
Comb16	(D+PP) + Cd
Comb17	(D+PP) + Cd + LR
Comb18	(D+PP) + Cd + 0,75 LR
Comb19	(D+PP) + Cd + W1
Comb20	(D+PP) + Cd + W2
Comb21	(D+PP) + Cd + W3
Comb22	(D+PP) + Cd + W4
Comb23	(D+PP) + Cd + 0,75 W1 + 0,75 LR
Comb24	(D+PP) + Cd + 0,75 W2 + 0,75 LR
Comb25	(D+PP) + Cd + 0,75 W3 + 0,75 LR
Comb26	(D+PP) + Cd + 0,75 W4 + 0,75 LR
Comb27	0,6 (D+PP) + 0,6 Cd + W1
Comb28	0,6 (D+PP) + 0,6 Cd + W2
Comb29	0,6 (D+PP) + 0,6 Cd + W3
Comb30	0,6 (D+PP) + 0,6 Cd + W4

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 20 of 101	

		Css para a	Ponte para a
Comb31	(D+PP) + LR + Cd + Cvs_E + Ci_E + Css_E ← + Cls_E (Uma Ponte)	Esquerda	Esquerda
Comb32	(D+PP) + LR + Cd + Cvs_D + Ci_D + Css_E ← + Cls_D (Uma Ponte)		Direita
Comb33	(D+PP) + LR + Cd + Cvs_E + Ci_E + Css_D → + Cls_E (Uma Ponte)	Direita	Esquerda
Comb34	(D+PP) + LR + Cd + Cvs_D + Ci_D + Css_D → + Cls_D (Uma Ponte)		Direita
Comb35	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cd + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W1)	Esquerda	Esquerda
Comb36	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cd + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W2)		
Comb37	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cd + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W3)		
Comb38	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cd + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W4)		
Comb39	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W1)	Esquerda	Direita
Comb40	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W2)		
Comb41	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W3)		
Comb42	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W4)		
Comb43	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W1)	Direita	Esquerda
Comb44	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W2)		
Comb45	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W3)		
Comb46	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W4)		
Comb47	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W1)	Direita	Esquerda
Comb48	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W2)		
Comb49	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W3)		
Comb50	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W4)		
Comb51	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 (0,67 Cbs)	-	Esquerda
Comb52	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 (0,67 Cbs)	-	Direita

5.8 ESTADO LIMITE SERVIÇO (ELS)

Comb1	(D+PP)
Comb2	(D+PP) + LR
Comb3	(D+PP) + 0,75 LR
Comb4	(D+PP) + W1
Comb5	(D+PP) + W2
Comb6	(D+PP) + W3
Comb7	(D+PP) + W4
Comb8	(D+PP) + 0,75 W1 + 0,75 LR
Comb9	(D+PP) + 0,75 W2 + 0,75 LR

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 21 of 101	

Comb10	(D+PP) + 0,75 W3 + 0,75 LR
Comb11	(D+PP) + 0,75 W4 + 0,75 LR
Comb12	0,6 (D+PP) + W1
Comb13	0,6 (D+PP) + W2
Comb14	0,6 (D+PP) + W3
Comb15	0,6 (D+PP) + W4
Comb16	(D+PP) + Cd
Comb17	(D+PP) + Cd + LR
Comb18	(D+PP) + Cd + 0,75 LR
Comb19	(D+PP) + Cd + W1
Comb20	(D+PP) + Cd + W2
Comb21	(D+PP) + Cd + W3
Comb22	(D+PP) + Cd + W4
Comb23	(D+PP) + Cd + 0,75 W1 + 0,75 LR
Comb24	(D+PP) + Cd + 0,75 W2 + 0,75 LR
Comb25	(D+PP) + Cd + 0,75 W3 + 0,75 LR
Comb26	(D+PP) + Cd + 0,75 W4 + 0,75 LR
Comb27	0,6 (D+PP) + 0,6 Cd + W1
Comb28	0,6 (D+PP) + 0,6 Cd + W2
Comb29	0,6 (D+PP) + 0,6 Cd + W3
Comb30	0,6 (D+PP) + 0,6 Cd + W4

		Css para a	Ponte para a
Comb31	(D+PP) + LR + Cd + Cvs_E + Ci_E + Css_E ← + Cls_E (Uma Ponte)	Esquerda	Esquerda
Comb32	(D+PP) + LR + Cd + Cvs_D + Ci_D + Css_E ← + Cls_D (Uma Ponte)		Direita
Comb33	(D+PP) + LR + Cd + Cvs_E + Ci_E + Css_D → + Cls_E (Uma Ponte)	Direita	Esquerda
Comb34	(D+PP) + LR + Cd + Cvs_D + Ci_D + Css_D → + Cls_D (Uma Ponte)		Direita
Comb35	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cd + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W1)	Esquerda	Esquerda
Comb36	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cd + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W2)		
Comb37	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cd + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W3)		
Comb38	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cd + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W4)		
Comb39	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W1)	Esquerda	Direita
Comb40	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W2)		
Comb41	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W3)		
Comb42	0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_E + 0,75 (0,5 W4)		

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 22 of 101	

Comb43	$0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W1)$	Direita	Esquerda
Comb44	$0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W2)$		
Comb45	$0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W3)$		
Comb46	$0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W4)$		
Comb47	$0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W1)$	Direita	Esquerda
Comb48	$0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W2)$		
Comb49	$0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W3)$		
Comb50	$0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 Css_D + 0,75 (0,5 W4)$		
Comb51	$0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_E + 0,75 Ci_E + 0,75 (0,67 Cbs)$	-	Esquerda
Comb52	$0,75 (D+PP) + 0,75 LR + 0,75 Cvs_D + 0,75 Ci_D + 0,75 (0,67 Cbs)$	-	Direita

6 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural da edificação industrial em questão foi realizada com o apoio de duas distintas ferramentas eletrônicas (softwares), o CYPE Metálicas 3D e o SAP 2000, regido pela boa técnica, as práticas aplicáveis das normas internacionais e nacionais específicas e a experiência da equipe de projeto.

Dadas às restrições e premissas impostas, tanto no que diz respeito aos arquitetônicos, quanto as premissas de sistema estrutural e composição dos elementos dos pórticos impostas pelo orientador, o modelo estrutural foi concebido e avaliado através de pórticos planos treliçados na viga superior, com banzos inferior e superior composto por perfis laminados de “alma cheia”, da série Gerdau Açominas e montantes e diagonais em cantoneira laminada de abas iguais simples. Para os pilares e seus consoles fora definido perfil “W” tipo “H”, da série Gerdau-Açominas. Sendo os demais elementos, como viga de rolamento, terças de cobertura e fechamento e sistemas de contraventamento vertical e horizontal, avaliados separadamente.

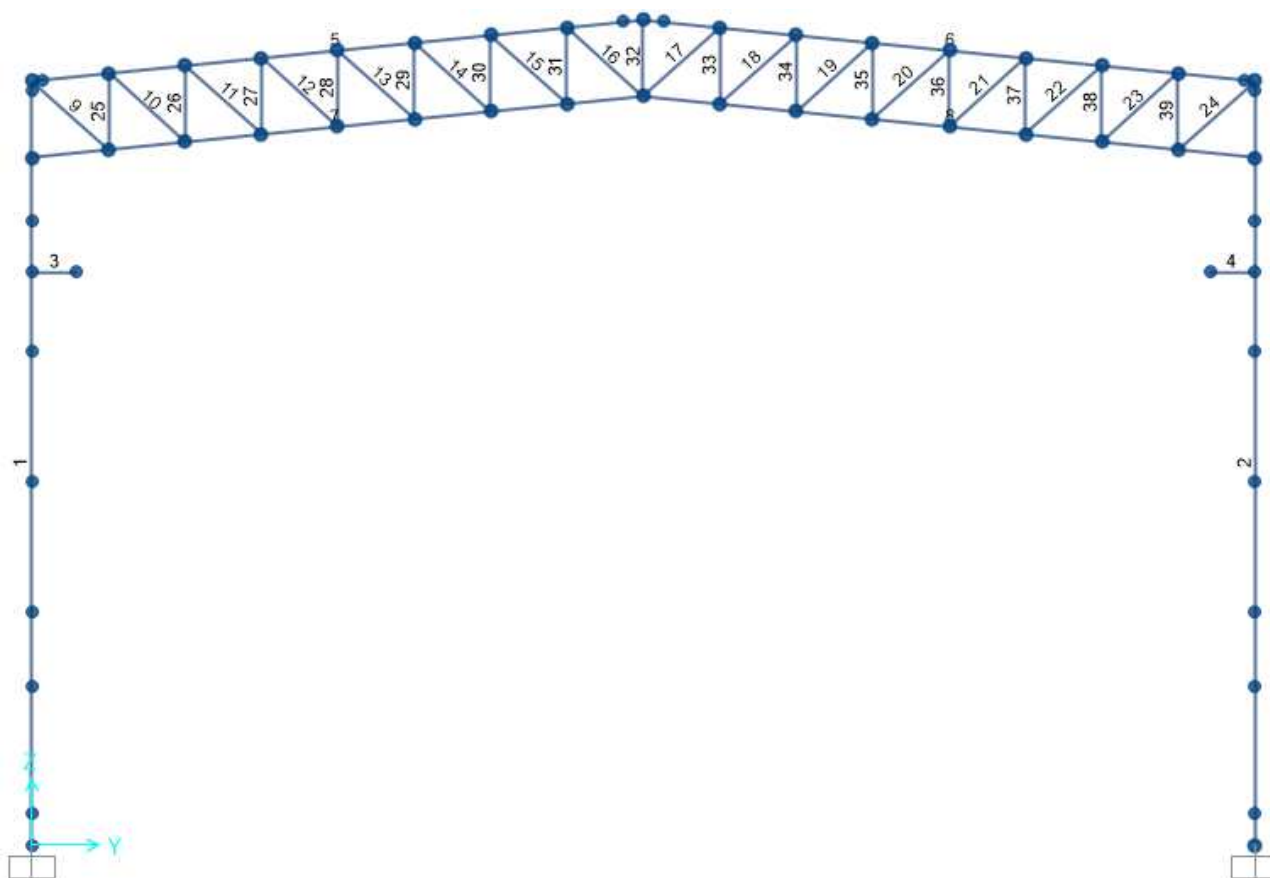
Definido o modelo estrutural, sua modelagem, aplicação dos carregamentos e determinação dos esforços foi realizada com o auxílio da ferramenta computacional denominada SAP2000. Com uma interface, sofisticada, intuitiva e versátil proporcionada por um sistema de análise estrutural eficiente e ferramentas de auxílio ao projeto para engenheiros é reconhecida no mercado como importante ferramenta desde a análise de um pequeno e simples pórtico 2D até uma análise dinâmica não-linear 3D grande e complexa.

Para o dimensionamento das barras, foram extraídos os outputs do SAP, tabelados, e filtrados entre máximos e mínimos. Os carregamentos foram aplicados individualmente em cada barra e avaliados com o auxílio de outra importante ferramenta computacional, o CYPE Metálicas 3D, para dimensionamento de cada elemento baseado nas premissas da NBR8800. O CYPE Metálicas é um software para cálculo estrutural e dimensionamento de elementos estruturais metálicos, estruturas de alumínio e estruturas de madeira. Por se tratar de um software específico para cálculo de estruturas metálicas, apoiado na

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 23 of 101	

norma brasileira e que apresenta uma memória de cálculo detalhada do processo de dimensionamento dos perfis, oferece segurança e agilidade neste dimensionamento.

6.1 PÓRTICO PLANO



Geometria do Pórtico com Identificação de Barras

Critérios de projeto:

- Cargas aplicadas diretamente nos nós;
- Pilares engastados na base;
- Banzo Superior e Inferior como elemento contínuo;
- Montantes e diagonais articulados nos extremos;

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 24 of 101	

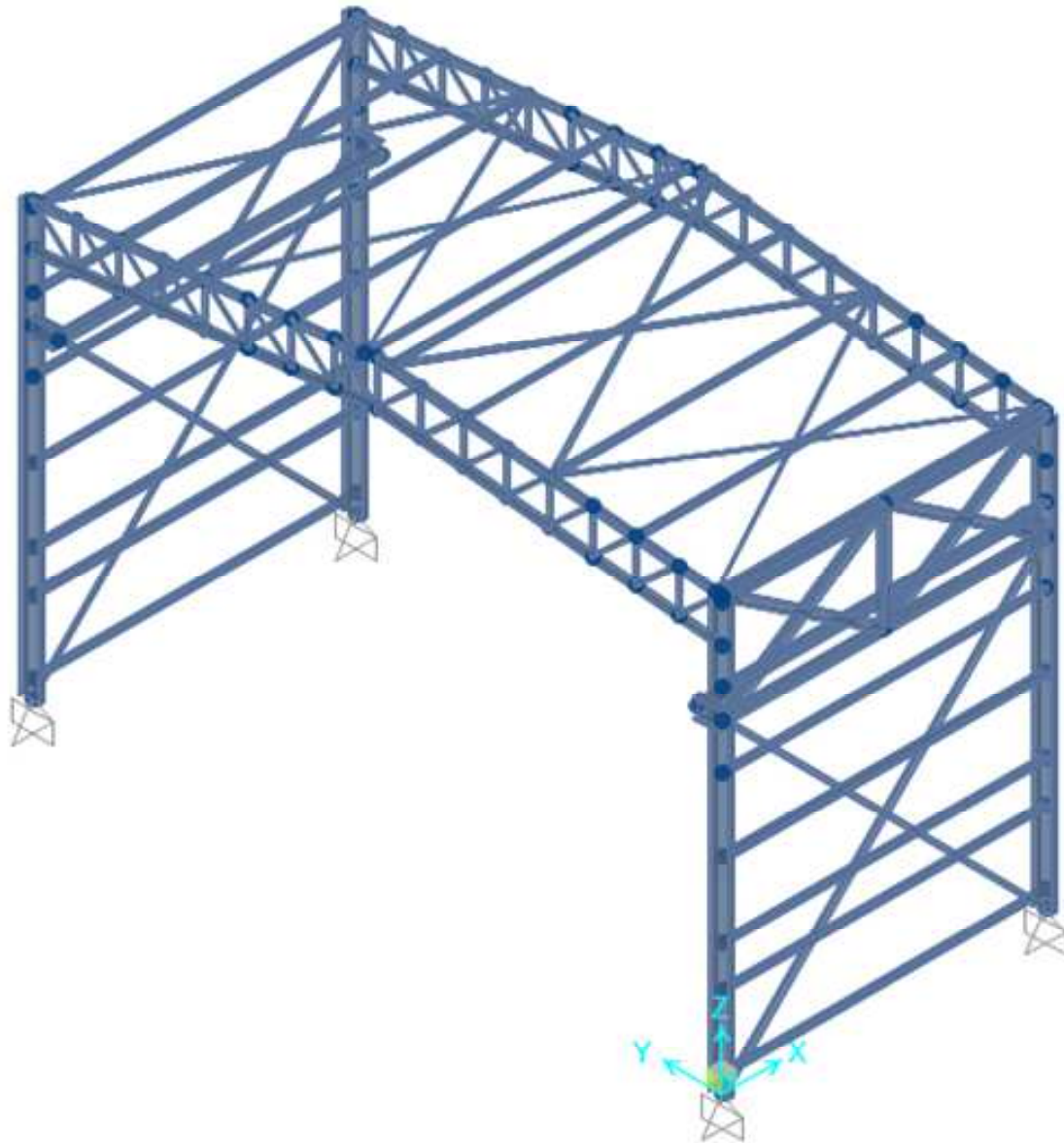


Ilustração travamento lateral fora do plano para pórtico

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 25 of 101	

Outputs do software SAP2000 já tratados e filtrados em Excel:

TABLE: Element Forces - Frames									
Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN- cm	Text	cm
1	0	ENV	Combination	Max	57	74	24123	1-1	0,00
1	50	ENV	Combination	Max	57	70	20516	1-1	50,00
1	50	ENV	Combination	Max	58	70	20516	1-2	0,00
1	250	ENV	Combination	Max	59	53	8198	1-2	200,00
1	250	ENV	Combination	Max	60	53	8198	1-3	0,00
1	365	ENV	Combination	Max	60	43	4160	1-3	115,00
1	365	ENV	Combination	Max	61	43	4160	1-4	0,00
1	570	ENV	Combination	Max	62	25	5349	1-4	205,00
1	570	ENV	Combination	Max	64	25	5349	1-5	0,00
1	600	ENV	Combination	Max	64	22	5649	1-5	30,00
1	775	ENV	Combination	Max	65	25	8888	1-5	205,00
1	775	ENV	Combination	Max	67	25	8888	1-6	0,00
1	900	ENV	Combination	Max	67	36	13558	1-6	125,00
1	900	ENV	Combination	Max	74	36	12000	1-7	0,00
1	980	ENV	Combination	Max	75	43	14999	1-7	80,00
1	980	ENV	Combination	Max	76	43	14999	1-8	0,00
1	1080	ENV	Combination	Max	77	52	18875	1-8	100,00
1	1080	ENV	Combination	Max	62	158	18875	1-9	0,00
1	1185	ENV	Combination	Max	62	157	2348	1-9	105,00
1	1185	ENV	Combination	Max	63	157	2348	1-10	0,00
1	1200	ENV	Combination	Max	63	156	0	1-10	15,00
1	0	ENV	Combination	Min	-174	-45	-15515	1-1	0,00
1	50	ENV	Combination	Min	-174	-42	-14160	1-1	50,00
1	50	ENV	Combination	Min	-173	-42	-14160	1-2	0,00
1	250	ENV	Combination	Min	-172	-30	-8575	1-2	200,00
1	250	ENV	Combination	Min	-170	-30	-8575	1-3	0,00
1	365	ENV	Combination	Min	-170	-31	-6049	1-3	115,00
1	365	ENV	Combination	Min	-168	-31	-6049	1-4	0,00
1	570	ENV	Combination	Min	-167	-34	-4456	1-4	205,00
1	570	ENV	Combination	Min	-165	-34	-4456	1-5	0,00

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 26 of 101	

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN- cm	Text	cm
1	600	ENV	Combination	Min	-165	-34	-5169	1-5	30,00
1	775	ENV	Combination	Min	-164	-37	-7575	1-5	205,00
1	775	ENV	Combination	Min	-162	-37	-7575	1-6	0,00
1	900	ENV	Combination	Min	-161	-38	-7464	1-6	125,00
1	900	ENV	Combination	Min	-111	-38	-9042	1-7	0,00
1	980	ENV	Combination	Min	-110	-39	-8345	1-7	80,00
1	980	ENV	Combination	Min	-108	-39	-8345	1-8	0,00
1	1080	ENV	Combination	Min	-107	-41	-12323	1-8	100,00
1	1080	ENV	Combination	Min	-95	-108	-12323	1-9	0,00
1	1185	ENV	Combination	Min	-94	-98	-1467	1-9	105,00
1	1185	ENV	Combination	Min	-93	-98	-1467	1-10	0,00
1	1200	ENV	Combination	Min	-93	-97	0	1-10	15,00
2	0	ENV	Combination	Max	57	45	15515	2-1	0,00
2	50	ENV	Combination	Max	57	42	14160	2-1	50,00
2	50	ENV	Combination	Max	58	42	14160	2-2	0,00
2	250	ENV	Combination	Max	59	30	8575	2-2	200,00
2	250	ENV	Combination	Max	60	30	8575	2-3	0,00
2	365	ENV	Combination	Max	60	31	6049	2-3	115,00
2	365	ENV	Combination	Max	61	31	6049	2-4	0,00
2	570	ENV	Combination	Max	62	34	4456	2-4	205,00
2	570	ENV	Combination	Max	64	34	4456	2-5	0,00
2	600	ENV	Combination	Max	64	34	5169	2-5	30,00
2	775	ENV	Combination	Max	65	37	7575	2-5	205,00
2	775	ENV	Combination	Max	67	37	7575	2-6	0,00
2	900	ENV	Combination	Max	67	38	7464	2-6	125,00
2	900	ENV	Combination	Max	74	38	9042	2-7	0,00
2	980	ENV	Combination	Max	75	39	8345	2-7	80,00
2	980	ENV	Combination	Max	76	39	8345	2-8	0,00
2	1080	ENV	Combination	Max	77	41	12323	2-8	100,00
2	1080	ENV	Combination	Max	62	108	12323	2-9	0,00
2	1185	ENV	Combination	Max	62	98	1467	2-9	105,00
2	1185	ENV	Combination	Max	63	98	1467	2-10	0,00

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 27 of 101	

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN- cm	Text	cm
2	1200	ENV	Combination	Max	63	97	0	2-10	15,00
2	0	ENV	Combination	Min	-174	-74	-24123	2-1	0,00
2	50	ENV	Combination	Min	-174	-70	-20516	2-1	50,00
2	50	ENV	Combination	Min	-173	-70	-20516	2-2	0,00
2	250	ENV	Combination	Min	-172	-53	-8198	2-2	200,00
2	250	ENV	Combination	Min	-170	-53	-8198	2-3	0,00
2	365	ENV	Combination	Min	-170	-43	-4160	2-3	115,00
2	365	ENV	Combination	Min	-168	-43	-4160	2-4	0,00
2	570	ENV	Combination	Min	-167	-25	-5349	2-4	205,00
2	570	ENV	Combination	Min	-165	-25	-5349	2-5	0,00
2	600	ENV	Combination	Min	-165	-22	-5649	2-5	30,00
2	775	ENV	Combination	Min	-164	-25	-8888	2-5	205,00
2	775	ENV	Combination	Min	-162	-25	-8888	2-6	0,00
2	900	ENV	Combination	Min	-161	-36	-13558	2-6	125,00
2	900	ENV	Combination	Min	-111	-36	-12000	2-7	0,00
2	980	ENV	Combination	Min	-110	-43	-14999	2-7	80,00
2	980	ENV	Combination	Min	-108	-43	-14999	2-8	0,00
2	1080	ENV	Combination	Min	-107	-52	-18875	2-8	100,00
2	1080	ENV	Combination	Min	-95	-158	-18875	2-9	0,00
2	1185	ENV	Combination	Min	-94	-157	-2348	2-9	105,00
2	1185	ENV	Combination	Min	-93	-157	-2348	2-10	0,00
2	1200	ENV	Combination	Min	-93	-156	0	2-10	15,00
3	0	ENV	Combination	Max	17	-7	-502	3-1	0,00
3	35	ENV	Combination	Max	17	-7	-248	3-1	35,00
3	70	ENV	Combination	Max	17	-7	0	3-1	70,00
3	0	ENV	Combination	Min	-17	-106	-7378	3-1	0,00
3	35	ENV	Combination	Min	-17	-105	-3685	3-1	35,00
3	70	ENV	Combination	Min	-17	-105	0	3-1	70,00
4	0	ENV	Combination	Max	17	-7	-502	4-1	0,00
4	35	ENV	Combination	Max	17	-7	-248	4-1	35,00
4	70	ENV	Combination	Max	17	-7	0	4-1	70,00
4	0	ENV	Combination	Min	-17	-106	-7378	4-1	0,00

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 28 of 101	

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN- cm	Text	cm
4	35	ENV	Combination	Min	-17	-105	-3685	4-1	35,00
4	70	ENV	Combination	Min	-17	-105	0	4-1	70,00
5	0	ENV	Combination	Max	74	4	0	5-1	0,00
5	15,075	ENV	Combination	Max	74	2	152	5-1	15,08
5	15,075	ENV	Combination	Max	74	4	152	5-2	0,00
5	120,599	ENV	Combination	Max	74	3	142	5-2	105,52
5	120,599	ENV	Combination	Max	48	6	142	5-3	0,00
5	241,197	ENV	Combination	Max	48	1	167	5-3	120,60
5	241,197	ENV	Combination	Max	78	6	167	5-4	0,00
5	361,796	ENV	Combination	Max	78	2	73	5-4	120,60
5	361,796	ENV	Combination	Max	116	6	73	5-5	0,00
5	482,394	ENV	Combination	Max	116	1	221	5-5	120,60
5	482,394	ENV	Combination	Max	144	6	221	5-6	0,00
5	602,993	ENV	Combination	Max	144	2	118	5-6	120,60
5	602,993	ENV	Combination	Max	161	5	118	5-7	0,00
5	723,591	ENV	Combination	Max	161	1	264	5-7	120,60
5	723,591	ENV	Combination	Max	169	6	264	5-8	0,00
5	844,19	ENV	Combination	Max	169	1	187	5-8	120,60
5	844,19	ENV	Combination	Max	168	4	187	5-9	0,00
5	932,125	ENV	Combination	Max	168	0	295	5-9	87,94
5	932,125	ENV	Combination	Max	168	13	295	5-10	0,00
5	964,788	ENV	Combination	Max	168	13	62	5-10	32,66
5	0	ENV	Combination	Min	-62	-10	0	5-1	0,00
5	15,075	ENV	Combination	Min	-62	-10	-44	5-1	15,08
5	15,075	ENV	Combination	Min	-62	0	-44	5-2	0,00
5	120,599	ENV	Combination	Min	-62	-7	-127	5-2	105,52
5	120,599	ENV	Combination	Min	-88	-3	-127	5-3	0,00
5	241,197	ENV	Combination	Min	-88	-5	-53	5-3	120,60
5	241,197	ENV	Combination	Min	-136	-1	-53	5-4	0,00
5	361,796	ENV	Combination	Min	-136	-5	-49	5-4	120,60
5	361,796	ENV	Combination	Min	-198	-2	-49	5-5	0,00
5	482,394	ENV	Combination	Min	-198	-5	-29	5-5	120,60

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 29 of 101	

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN- cm	Text	cm
5	482,394	ENV	Combination	Min	-237	-1	-29	5-6	0,00
5	602,993	ENV	Combination	Min	-237	-5	-29	5-6	120,60
5	602,993	ENV	Combination	Min	-273	-2	-29	5-7	0,00
5	723,591	ENV	Combination	Min	-273	-6	-13	5-7	120,60
5	723,591	ENV	Combination	Min	-287	-1	-13	5-8	0,00
5	844,19	ENV	Combination	Min	-287	-5	-52	5-8	120,60
5	844,19	ENV	Combination	Min	-297	-2	-52	5-9	0,00
5	932,125	ENV	Combination	Min	-297	-4	-60	5-9	87,94
5	932,125	ENV	Combination	Min	-296	-2	-60	5-10	0,00
5	964,788	ENV	Combination	Min	-296	-5	-118	5-10	32,66
6	0	ENV	Combination	Max	74	4	0	6-1	0,00
6	15,075	ENV	Combination	Max	74	2	152	6-1	15,08
6	15,075	ENV	Combination	Max	74	4	152	6-2	0,00
6	120,599	ENV	Combination	Max	74	3	142	6-2	105,52
6	120,599	ENV	Combination	Max	48	6	142	6-3	0,00
6	241,197	ENV	Combination	Max	48	1	167	6-3	120,60
6	241,197	ENV	Combination	Max	78	6	167	6-4	0,00
6	361,796	ENV	Combination	Max	78	2	73	6-4	120,60
6	361,796	ENV	Combination	Max	116	6	73	6-5	0,00
6	482,394	ENV	Combination	Max	116	1	221	6-5	120,60
6	482,394	ENV	Combination	Max	144	6	221	6-6	0,00
6	602,993	ENV	Combination	Max	144	2	118	6-6	120,60
6	602,993	ENV	Combination	Max	161	5	118	6-7	0,00
6	723,591	ENV	Combination	Max	161	1	264	6-7	120,60
6	723,591	ENV	Combination	Max	169	6	264	6-8	0,00
6	844,19	ENV	Combination	Max	169	1	187	6-8	120,60
6	844,19	ENV	Combination	Max	168	4	187	6-9	0,00
6	932,125	ENV	Combination	Max	168	0	295	6-9	87,94
6	932,125	ENV	Combination	Max	168	13	295	6-10	0,00
6	964,788	ENV	Combination	Max	168	13	62	6-10	32,66
6	0	ENV	Combination	Min	-62	-10	0	6-1	0,00
6	15,075	ENV	Combination	Min	-62	-10	-44	6-1	15,08

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 30 of 101	

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN-cm	Text	cm
6	15,075	ENV	Combination	Min	-62	0	-44	6-2	0,00
6	120,599	ENV	Combination	Min	-62	-7	-127	6-2	105,52
6	120,599	ENV	Combination	Min	-88	-3	-127	6-3	0,00
6	241,197	ENV	Combination	Min	-88	-5	-53	6-3	120,60
6	241,197	ENV	Combination	Min	-136	-1	-53	6-4	0,00
6	361,796	ENV	Combination	Min	-136	-5	-49	6-4	120,60
6	361,796	ENV	Combination	Min	-198	-2	-49	6-5	0,00
6	482,394	ENV	Combination	Min	-198	-5	-29	6-5	120,60
6	482,394	ENV	Combination	Min	-237	-1	-29	6-6	0,00
6	602,993	ENV	Combination	Min	-237	-5	-29	6-6	120,60
6	602,993	ENV	Combination	Min	-273	-2	-29	6-7	0,00
6	723,591	ENV	Combination	Min	-273	-6	-13	6-7	120,60
6	723,591	ENV	Combination	Min	-287	-1	-13	6-8	0,00
6	844,19	ENV	Combination	Min	-287	-5	-52	6-8	120,60
6	844,19	ENV	Combination	Min	-297	-2	-52	6-9	0,00
6	932,125	ENV	Combination	Min	-297	-4	-60	6-9	87,94
6	932,125	ENV	Combination	Min	-296	-2	-60	6-10	0,00
6	964,788	ENV	Combination	Min	-296	-5	-118	6-10	32,66
7	0	ENV	Combination	Max	161	1	0	7-1	0,00
7	120,599	ENV	Combination	Max	161	1	161	7-1	120,60
7	120,599	ENV	Combination	Max	91	2	161	7-2	0,00
7	241,197	ENV	Combination	Max	91	2	39	7-2	120,60
7	241,197	ENV	Combination	Max	61	0	39	7-3	0,00
7	361,796	ENV	Combination	Max	61	0	54	7-3	120,60
7	361,796	ENV	Combination	Max	114	1	54	7-4	0,00
7	482,394	ENV	Combination	Max	114	1	80	7-4	120,60
7	482,394	ENV	Combination	Max	175	0	80	7-5	0,00
7	602,993	ENV	Combination	Max	175	0	100	7-5	120,60
7	602,993	ENV	Combination	Max	215	1	100	7-6	0,00
7	723,591	ENV	Combination	Max	215	1	112	7-6	120,60
7	723,591	ENV	Combination	Max	251	0	112	7-7	0,00
7	844,19	ENV	Combination	Max	251	0	110	7-7	120,60

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 31 of 101	

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN-cm	Text	cm
7	844,19	ENV	Combination	Max	265	1	110	7-8	0,00
7	964,788	ENV	Combination	Max	265	1	130	7-8	120,60
7	0	ENV	Combination	Min	-198	-1	0	7-1	0,00
7	120,599	ENV	Combination	Min	-198	-1	-93	7-1	120,60
7	120,599	ENV	Combination	Min	-111	-1	-93	7-2	0,00
7	241,197	ENV	Combination	Min	-111	-1	-113	7-2	120,60
7	241,197	ENV	Combination	Min	-84	0	-113	7-3	0,00
7	361,796	ENV	Combination	Min	-84	0	-84	7-3	120,60
7	361,796	ENV	Combination	Min	-64	0	-84	7-4	0,00
7	482,394	ENV	Combination	Min	-64	0	-178	7-4	120,60
7	482,394	ENV	Combination	Min	-48	0	-178	7-5	0,00
7	602,993	ENV	Combination	Min	-48	0	-155	7-5	120,60
7	602,993	ENV	Combination	Min	-75	0	-155	7-6	0,00
7	723,591	ENV	Combination	Min	-75	0	-231	7-6	120,60
7	723,591	ENV	Combination	Min	-91	0	-231	7-7	0,00
7	844,19	ENV	Combination	Min	-91	-1	-177	7-7	120,60
7	844,19	ENV	Combination	Min	-98	0	-177	7-8	0,00
7	964,788	ENV	Combination	Min	-98	0	-309	7-8	120,60
8	0	ENV	Combination	Max	161	1	0	8-1	0,00
8	120,599	ENV	Combination	Max	161	1	161	8-1	120,60
8	120,599	ENV	Combination	Max	91	2	161	8-2	0,00
8	241,197	ENV	Combination	Max	91	2	39	8-2	120,60
8	241,197	ENV	Combination	Max	61	0	39	8-3	0,00
8	361,796	ENV	Combination	Max	61	0	54	8-3	120,60
8	361,796	ENV	Combination	Max	114	1	54	8-4	0,00
8	482,394	ENV	Combination	Max	114	1	80	8-4	120,60
8	482,394	ENV	Combination	Max	175	0	80	8-5	0,00
8	602,993	ENV	Combination	Max	175	0	100	8-5	120,60
8	602,993	ENV	Combination	Max	215	1	100	8-6	0,00
8	723,591	ENV	Combination	Max	215	1	112	8-6	120,60
8	723,591	ENV	Combination	Max	251	0	112	8-7	0,00
8	844,19	ENV	Combination	Max	251	0	110	8-7	120,60

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 32 of 101	

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN-cm	Text	cm
8	844,19	ENV	Combination	Max	265	1	110	8-8	0,00
8	964,788	ENV	Combination	Max	265	1	130	8-8	120,60
8	0	ENV	Combination	Min	-198	-1	0	8-1	0,00
8	120,599	ENV	Combination	Min	-198	-1	-93	8-1	120,60
8	120,599	ENV	Combination	Min	-111	-1	-93	8-2	0,00
8	241,197	ENV	Combination	Min	-111	-1	-113	8-2	120,60
8	241,197	ENV	Combination	Min	-84	0	-113	8-3	0,00
8	361,796	ENV	Combination	Min	-84	0	-84	8-3	120,60
8	361,796	ENV	Combination	Min	-64	0	-84	8-4	0,00
8	482,394	ENV	Combination	Min	-64	0	-178	8-4	120,60
8	482,394	ENV	Combination	Min	-48	0	-178	8-5	0,00
8	602,993	ENV	Combination	Min	-48	0	-155	8-5	120,60
8	602,993	ENV	Combination	Min	-75	0	-155	8-6	0,00
8	723,591	ENV	Combination	Min	-75	0	-231	8-6	120,60
8	723,591	ENV	Combination	Min	-91	0	-231	8-7	0,00
8	844,19	ENV	Combination	Min	-91	-1	-177	8-7	120,60
8	844,19	ENV	Combination	Min	-98	0	-177	8-8	0,00
8	964,788	ENV	Combination	Min	-98	0	-309	8-8	120,60
9	0	ENV	Combination	Max	126			9-1	0,00
9	80,722	ENV	Combination	Max	126			9-1	80,72
9	161,443	ENV	Combination	Max	126			9-1	161,44
9	0	ENV	Combination	Min	-93			9-1	0,00
9	80,722	ENV	Combination	Min	-93			9-1	80,72
9	161,443	ENV	Combination	Min	-93			9-1	161,44
10	0	ENV	Combination	Max	115			10-1	0,00
10	80,722	ENV	Combination	Max	115			10-1	80,72
10	161,443	ENV	Combination	Max	115			10-1	161,44
10	0	ENV	Combination	Min	-74			10-1	0,00
10	80,722	ENV	Combination	Min	-74			10-1	80,72
10	161,443	ENV	Combination	Min	-74			10-1	161,44
11	0	ENV	Combination	Max	88			11-1	0,00
11	80,722	ENV	Combination	Max	88			11-1	80,72

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 33 of 101	

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN- cm	Text	cm
11	161,443	ENV	Combination	Max	88			11-1	161,44
11	0	ENV	Combination	Min	-63			11-1	0,00
11	80,722	ENV	Combination	Min	-63			11-1	80,72
11	161,443	ENV	Combination	Min	-63			11-1	161,44
12	0	ENV	Combination	Max	83			12-1	0,00
12	80,722	ENV	Combination	Max	83			12-1	80,72
12	161,443	ENV	Combination	Max	83			12-1	161,44
12	0	ENV	Combination	Min	-49			12-1	0,00
12	80,722	ENV	Combination	Min	-49			12-1	80,72
12	161,443	ENV	Combination	Min	-49			12-1	161,44
13	0	ENV	Combination	Max	53			13-1	0,00
13	80,722	ENV	Combination	Max	53			13-1	80,72
13	161,443	ENV	Combination	Max	53			13-1	161,44
13	0	ENV	Combination	Min	-36			13-1	0,00
13	80,722	ENV	Combination	Min	-36			13-1	80,72
13	161,443	ENV	Combination	Min	-36			13-1	161,44
14	0	ENV	Combination	Max	48			14-1	0,00
14	80,722	ENV	Combination	Max	48			14-1	80,72
14	161,443	ENV	Combination	Max	48			14-1	161,44
14	0	ENV	Combination	Min	-22			14-1	0,00
14	80,722	ENV	Combination	Min	-22			14-1	80,72
14	161,443	ENV	Combination	Min	-22			14-1	161,44
15	0	ENV	Combination	Max	19			15-1	0,00
15	80,722	ENV	Combination	Max	19			15-1	80,72
15	161,443	ENV	Combination	Max	19			15-1	161,44
15	0	ENV	Combination	Min	-9			15-1	0,00
15	80,722	ENV	Combination	Min	-9			15-1	80,72
15	161,443	ENV	Combination	Min	-9			15-1	161,44
16	0	ENV	Combination	Max	13			16-1	0,00
16	80,722	ENV	Combination	Max	13			16-1	80,72
16	161,443	ENV	Combination	Max	13			16-1	161,44
16	0	ENV	Combination	Min	-9			16-1	0,00

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 34 of 101	

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN- cm	Text	cm
16	80,722	ENV	Combination	Min	-9			16-1	80,72
16	161,443	ENV	Combination	Min	-9			16-1	161,44
17	0	ENV	Combination	Max	13			17-1	0,00
17	80,722	ENV	Combination	Max	13			17-1	80,72
17	161,443	ENV	Combination	Max	13			17-1	161,44
17	0	ENV	Combination	Min	-9			17-1	0,00
17	80,722	ENV	Combination	Min	-9			17-1	80,72
17	161,443	ENV	Combination	Min	-9			17-1	161,44
18	0	ENV	Combination	Max	19			18-1	0,00
18	80,722	ENV	Combination	Max	19			18-1	80,72
18	161,443	ENV	Combination	Max	19			18-1	161,44
18	0	ENV	Combination	Min	-9			18-1	0,00
18	80,722	ENV	Combination	Min	-9			18-1	80,72
18	161,443	ENV	Combination	Min	-9			18-1	161,44
19	0	ENV	Combination	Max	48			19-1	0,00
19	80,722	ENV	Combination	Max	48			19-1	80,72
19	161,443	ENV	Combination	Max	48			19-1	161,44
19	0	ENV	Combination	Min	-22			19-1	0,00
19	80,722	ENV	Combination	Min	-22			19-1	80,72
19	161,443	ENV	Combination	Min	-22			19-1	161,44
20	0	ENV	Combination	Max	53			20-1	0,00
20	80,722	ENV	Combination	Max	53			20-1	80,72
20	161,443	ENV	Combination	Max	53			20-1	161,44
20	0	ENV	Combination	Min	-36			20-1	0,00
20	80,722	ENV	Combination	Min	-36			20-1	80,72
20	161,443	ENV	Combination	Min	-36			20-1	161,44
21	0	ENV	Combination	Max	83			21-1	0,00
21	80,722	ENV	Combination	Max	83			21-1	80,72
21	161,443	ENV	Combination	Max	83			21-1	161,44
21	0	ENV	Combination	Min	-49			21-1	0,00
21	80,722	ENV	Combination	Min	-49			21-1	80,72
21	161,443	ENV	Combination	Min	-49			21-1	161,44

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 35 of 101	

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN- cm	Text	cm
22	0	ENV	Combination	Max	88			22-1	0,00
22	80,722	ENV	Combination	Max	88			22-1	80,72
22	161,443	ENV	Combination	Max	88			22-1	161,44
22	0	ENV	Combination	Min	-63			22-1	0,00
22	80,722	ENV	Combination	Min	-63			22-1	80,72
22	161,443	ENV	Combination	Min	-63			22-1	161,44
23	0	ENV	Combination	Max	115			23-1	0,00
23	80,722	ENV	Combination	Max	115			23-1	80,72
23	161,443	ENV	Combination	Max	115			23-1	161,44
23	0	ENV	Combination	Min	-74			23-1	0,00
23	80,722	ENV	Combination	Min	-74			23-1	80,72
23	161,443	ENV	Combination	Min	-74			23-1	161,44
24	0	ENV	Combination	Max	126			24-1	0,00
24	80,722	ENV	Combination	Max	126			24-1	80,72
24	161,443	ENV	Combination	Max	126			24-1	161,44
24	0	ENV	Combination	Min	-93			24-1	0,00
24	80,722	ENV	Combination	Min	-93			24-1	80,72
24	161,443	ENV	Combination	Min	-93			24-1	161,44
25	0	ENV	Combination	Max	67			25-1	0,00
25	60	ENV	Combination	Max	67			25-1	60,00
25	120	ENV	Combination	Max	68			25-1	120,00
25	0	ENV	Combination	Min	-90			25-1	0,00
25	60	ENV	Combination	Min	-90			25-1	60,00
25	120	ENV	Combination	Min	-90			25-1	120,00
26	0	ENV	Combination	Max	56			26-1	0,00
26	60	ENV	Combination	Max	56			26-1	60,00
26	120	ENV	Combination	Max	56			26-1	120,00
26	0	ENV	Combination	Min	-88			26-1	0,00
26	60	ENV	Combination	Min	-88			26-1	60,00
26	120	ENV	Combination	Min	-88			26-1	120,00
27	0	ENV	Combination	Max	47			27-1	0,00
27	60	ENV	Combination	Max	47			27-1	60,00

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 36 of 101	

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN-cm	Text	cm
27	120	ENV	Combination	Max	47			27-1	120,00
27	0	ENV	Combination	Min	-64			27-1	0,00
27	60	ENV	Combination	Min	-64			27-1	60,00
27	120	ENV	Combination	Min	-64			27-1	120,00
28	0	ENV	Combination	Max	36			28-1	0,00
28	60	ENV	Combination	Max	36			28-1	60,00
28	120	ENV	Combination	Max	36			28-1	120,00
28	0	ENV	Combination	Min	-62			28-1	0,00
28	60	ENV	Combination	Min	-62			28-1	60,00
28	120	ENV	Combination	Min	-62			28-1	120,00
29	0	ENV	Combination	Max	27			29-1	0,00
29	60	ENV	Combination	Max	27			29-1	60,00
29	120	ENV	Combination	Max	27			29-1	120,00
29	0	ENV	Combination	Min	-38			29-1	0,00
29	60	ENV	Combination	Min	-38			29-1	60,00
29	120	ENV	Combination	Min	-38			29-1	120,00
30	0	ENV	Combination	Max	17			30-1	0,00
30	60	ENV	Combination	Max	17			30-1	60,00
30	120	ENV	Combination	Max	17			30-1	120,00
30	0	ENV	Combination	Min	-37			30-1	0,00
30	60	ENV	Combination	Min	-37			30-1	60,00
30	120	ENV	Combination	Min	-37			30-1	120,00
31	0	ENV	Combination	Max	7			31-1	0,00
31	60	ENV	Combination	Max	7			31-1	60,00
31	120	ENV	Combination	Max	7			31-1	120,00
31	0	ENV	Combination	Min	-13			31-1	0,00
31	60	ENV	Combination	Min	-13			31-1	60,00
31	120	ENV	Combination	Min	-13			31-1	120,00
32	0	ENV	Combination	Max	34			32-1	0,00
32	60	ENV	Combination	Max	34			32-1	60,00
32	120	ENV	Combination	Max	34			32-1	120,00
32	0	ENV	Combination	Min	-23			32-1	0,00

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 37 of 101	

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN- cm	Text	cm
32	60	ENV	Combination	Min	-23			32-1	60,00
32	120	ENV	Combination	Min	-23			32-1	120,00
33	0	ENV	Combination	Max	7			33-1	0,00
33	60	ENV	Combination	Max	7			33-1	60,00
33	120	ENV	Combination	Max	7			33-1	120,00
33	0	ENV	Combination	Min	-13			33-1	0,00
33	60	ENV	Combination	Min	-13			33-1	60,00
33	120	ENV	Combination	Min	-13			33-1	120,00
34	0	ENV	Combination	Max	17			34-1	0,00
34	60	ENV	Combination	Max	17			34-1	60,00
34	120	ENV	Combination	Max	17			34-1	120,00
34	0	ENV	Combination	Min	-37			34-1	0,00
34	60	ENV	Combination	Min	-37			34-1	60,00
34	120	ENV	Combination	Min	-37			34-1	120,00
35	0	ENV	Combination	Max	27			35-1	0,00
35	60	ENV	Combination	Max	27			35-1	60,00
35	120	ENV	Combination	Max	27			35-1	120,00
35	0	ENV	Combination	Min	-38			35-1	0,00
35	60	ENV	Combination	Min	-38			35-1	60,00
35	120	ENV	Combination	Min	-38			35-1	120,00
36	0	ENV	Combination	Max	36			36-1	0,00
36	60	ENV	Combination	Max	36			36-1	60,00
36	120	ENV	Combination	Max	36			36-1	120,00
36	0	ENV	Combination	Min	-62			36-1	0,00
36	60	ENV	Combination	Min	-62			36-1	60,00
36	120	ENV	Combination	Min	-62			36-1	120,00
37	0	ENV	Combination	Max	47			37-1	0,00
37	60	ENV	Combination	Max	47			37-1	60,00
37	120	ENV	Combination	Max	47			37-1	120,00
37	0	ENV	Combination	Min	-64			37-1	0,00
37	60	ENV	Combination	Min	-64			37-1	60,00
37	120	ENV	Combination	Min	-64			37-1	120,00

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 38 of 101	

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	P	V2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	cm	Text	Text	Text	KN	KN	KN-cm	Text	cm
38	0	ENV	Combination	Max	56			38-1	0,00
38	60	ENV	Combination	Max	56			38-1	60,00
38	120	ENV	Combination	Max	56			38-1	120,00
38	0	ENV	Combination	Min	-88			38-1	0,00
38	60	ENV	Combination	Min	-88			38-1	60,00
38	120	ENV	Combination	Min	-88			38-1	120,00
39	0	ENV	Combination	Max	67			39-1	0,00
39	60	ENV	Combination	Max	67			39-1	60,00
39	120	ENV	Combination	Max	68			39-1	120,00
39	0	ENV	Combination	Min	-90			39-1	0,00
39	60	ENV	Combination	Min	-90			39-1	60,00
39	120	ENV	Combination	Min	-90			39-1	120,00

Partindo das premissas de simetria da estrutura e todos os pórticos, independentemente de ser de fachada ou intermediários, bem como a utilização da mesma geometria perfis ao longo do seu comprimento e também sendo repetido em todos as diagonais e montantes, penalizando, quem sabe, o peso da estrutura, mas dinamizando o processo construtivo, das informações contidas no output acima listado, identificamos os máximos e mínimos e suas combinações críticas como segue:

Barras	Combinação	P		V2	M3	
		KN		KN	KN-cm	
		Máx	Mín	Máx_Abs	Máx_Abs	Mín
Pilares e Consoles						
1 e 2 - 12m	COMB11	-81,56	-135,31	158,16	188,75	-150,92
	COMB14	-5,75	-26,00	74,25	241,23	-79,66
	COMB26	-81,69	-153,42	155,52	185,58	-155,15
	COMB51	-69,42	-174,03	67,79	102,21	-70,16
3 - 0.70m	COMB31	-17,22	-17,22	105,65	73,78	-73,78
4 - 0.70m	COMB34	-17,22	-17,22	105,65	73,78	-73,78

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 39 of 101	

Barras	Combinação	P		V2	M3	
		KN		KN	KN-cm	
		Máx	Mín	Máx_Abs	Máx_Abs	Mín

Banzos Superior e Inferior

Superior 9.65m	5	169,24	-296,96	12,70	2,95	-1,27
	6	169,24	-296,96	12,70	2,95	-1,27
Inferior 9.65m	7	264,87	-198,50	2,08	1,61	-3,09
	8	264,87	-198,50	2,08	1,61	-3,09

Barras	Combinação	P		V2	P (Referencia Dimensionamento)	
		KN		KN	KN	
		Máx	Mín	Máx	Máx	Mín

Diagonais e Montantes

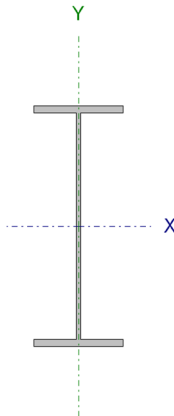
Diagonais 1.62m	9	125,67	-93,07		125,67	-93,07
	10	115,33	-73,92			
	11	87,97	-63,05			
	12	82,73	-48,65			
	13	53,34	-36,20			
	14	48,48	-22,14			
	15	19,49	-9,12			
	16	13,17	-9,35			
	17	13,17	-9,35			
	18	19,49	-9,12			
	19	48,48	-22,14			
	20	53,34	-36,20			
	21	82,73	-48,65			
	22	87,97	-63,05			
	23	115,33	-73,92			
	24	125,67	-93,07			
Montantes 1.20m	25	67,52	-90,07		67,52	-90,07
	26	56,13	-87,61			
	27	47,00	-64,02			
	28	36,42	-62,14			
	29	27,19	-38,49			

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 40 of 101	

Barras	Combinação	P		V2	P (Referencia Dimensionamento)	
		KN		KN	KN	
		Máx	Mín	Máx	Máx	Mín
	30	16,78	-36,80			
	31	6,82	-13,07			
	32	33,64	-23,18			
	33	6,82	-13,07			
	34	16,78	-36,80			
	35	27,19	-38,49			
	36	36,42	-62,14			
	37	47,00	-64,02			
	38	56,13	-87,61			
	39	67,52	-90,07			

Os Elementos de forma individual foram avaliados para os carregamentos críticos planilhados acima e dimensionados pela NBR8800, com o auxílio do software CYPE Metálicas 3D, aplicando seus coeficientes de segurança equalizando os carregamentos em relação as combinações da norma americana verificados pelas combinações ASD no SAP2000.

Segue abaixo os outputs analíticos do CYPE Metalicas 3D de cada um dos elementos verificados:

Perfil: W 610 x 125							
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)
	N5	N6	9.000	160.10	99184.00	3933.00	159.50
	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	2.00	1.00	1.00		
	L _k	9.000	18.000	9.000	9.000		
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_xM_y	T	NMVT	$\sigma \tau f$	
N5/N6	$\lambda \leq 200.0$ Passa	x: 9 m $\eta = 1.9$	x: 0 m $\eta = 35.6$	x: 0.009 m $\eta = 89.5$	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	x: 0 m $\eta = 11.3$	x: 0.009 m $\eta = 92.8$	N.P. ⁽³⁾	N.P. ⁽⁴⁾	N.P. ⁽⁵⁾	PASSA $\eta = 92.8$

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_xM_y: Resistência ao esforço axial e flexão combinados

T: Resistência à torção

NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante

$\sigma_{\tau f}$: 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 será executada, já que não existe momento fletor.
- (2) A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.
- (3) A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.
- (4) Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.
- (5) Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 42 of 101	

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

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

$$\lambda \leq 200 \qquad \lambda : 181.6 \quad \checkmark$$

Onde:

λ : Índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r} \qquad \lambda_x : 72.3$$

$$\lambda_y : 181.6$$

Sendo:

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

$$K_x \cdot L_x : 18.000 \text{ m}$$

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

$$K_y \cdot L_y : 9.000 \text{ m}$$

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

$$r_x : 24.89 \text{ cm}$$

$$r_y : 4.96 \text{ cm}$$

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

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1 \qquad \eta : 0.019 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N6, para a combinação de ações PP+1.5·COMB27(ASD).

$$N_{t,Sd}: \text{Força axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável.} \qquad N_{t,Sd} : 69.00 \text{ kN}$$

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

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \qquad N_{t,Rd} : 3638.64 \text{ kN}$$

Onde:

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : 160.10 \text{ cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : 1.10$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 43 of 101	

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : 0.356 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N5, para a combinação de ações PP+1.5·COMB51(ASD).

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

$$N_{c,Sd} : 272.10 \quad \text{kN}$$

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

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

$$N_{c,Rd} : 764.14 \quad \text{kN}$$

Onde:

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

$$\chi : 0.219$$

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : 0.959$$

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : 160.10 \quad \text{cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \quad \text{MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : 1.10$$

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

$$\lambda_0 > 1.5 \rightarrow \chi = \frac{0.877}{\lambda_0^2}$$

$$\chi : 0.219$$

Onde:

λ_0 : Índice de esbeltez reduzido.

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

$$\lambda_0 : 2.001$$

Sendo:

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : 0.959$$

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : 160.10 \quad \text{cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \quad \text{Mpa}$$

N_e : Força axial de flambagem elástica.

$$N_e : 958.45 \quad \text{kN}$$

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

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 44 of 101	

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

$$N_e : 958.45 \text{ kN}$$

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

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

$$N_{ex} : 6042.63 \text{ kN}$$

Onde:

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

$$K_x \cdot L_x : 18.000 \text{ m}$$

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

$$I_x : 99184.00 \text{ cm}^4$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

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

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

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

$$N_{ey} : 958.45 \text{ kN}$$

Onde:

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

$$K_y \cdot L_y : 9.000 \text{ m}$$

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

$$I_y : 3933.00 \text{ cm}^4$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

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

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

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

$$N_{ez} : 3209.06 \text{ kN}$$

Onde:

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

$$K_z \cdot L_z : 9.000 \text{ m}$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

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

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

$$C_w : 3441766.00 \text{ cm}^6$$

G : Módulo de elasticidade transversal do aço.

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

J : Constante de torção da seção transversal.

$$J : 159.50 \text{ cm}^4$$

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

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

$$r_0 : 25.38 \text{ cm}$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 45 of 101	

Onde:

r_x, r_y : Raios de giração em relação aos eixos principais X, Y, respectivamente.	r_x	: 24.89	cm
	r_y	: 4.96	cm
X_0, Y_0 : Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principais X, Y, respectivamente.	X_0	: 0.00	mm
	Y_0	: 0.00	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 limites dados na Tabela F.1, têm o fator de redução total Q dado por:

$$Q = Q_s \cdot Q_a \quad Q : 0.959$$

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.

$$Q_s : 1.000$$

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

$$(b/t) \leq 0.56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 5.84 \leq 15.84$$

$$Q_s = 1.000 \quad Q_s : 1.000$$

Sendo:

$$(b/t): \text{Relação entre largura e espessura.} \quad (b/t) : 5.84$$

Onde:

b : Largura.	b	: 114.50	mm
t : Espessura.	t	: 19.60	mm
E : Módulo de elasticidade do aço.	E	: 200000	MPa
f_y : Resistência ao escoamento do aço.	f_y	: 250.00	MPa

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

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad Q_a : 0.959$$

Sendo:

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.	A_g	: 160.10	cm ²
A_{ef} : Área efetiva da seção transversal da barra.	A_{ef}	: 153.48	cm ²

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

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

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 46 of 101	

$$(b/t) > 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 48.13 > 42.14$$

$$b_{ef} = 1.92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \cdot \left[1 - \frac{c_a}{b/t} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b \quad b_{ef} : 517.13 \text{ mm}$$

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura. (b/t) : 48.13

Onde:

b: Largura. b : 572.80 mm

t: Espessura. t : 11.90 mm

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

C_a: Coeficiente para elementos que não sejam mesas ou almas de seções tubulares retangulares. C_a : 0.34

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

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1 \quad \eta : 0.895 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N5, para a combinação de ações PP+1.5·COMB14(ASD).

M_{Sd}: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. M_{Sd} : 362.14 kN.m

Já que ' $\lambda \leq \lambda_r$ ', deve-se considerar viga de alma não-esbelta (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G). 48.13 ≤ 161.22

Onde:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad \lambda : 48.13$$

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distância entre as h faces internas das mesas. h : 572.80 mm

t_w: Espessura da alma. t_w : 11.90 mm

$$\lambda_r = 5.70 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_r : 161.22$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 47 of 101	

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:

$$M_{Rd} : 404.62 \text{ kN.m}$$

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

$$M_{Rd} = \frac{1.50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad M_{Rd} : 1104.99 \text{ kN.m}$$

Onde:

W_x : Módulo de resistência elástico mínimo da seção W_x : 3241.31 cm³
transversal em relação ao eixo de flexão.

f_y : Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material. γ_{a1} : 1.10

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

$$\lambda > \lambda_r \quad 181.58 > 153.76$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad M_{Rd} : 404.62 \text{ kN.m}$$

Onde:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad \lambda : 181.58$$

Sendo:

$L_{b,inf}$: Distância entre pontos travados à flambagem lateral. $L_{b,inf} : 9.000 \text{ m}$

r_y : Raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão. $r_y : 4.96 \text{ cm}$

$$\lambda_r = \frac{1.38 \cdot \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta_1} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2}{I_y}}} \quad \lambda_r : 153.76$$

Sendo:

I_y : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y. $I_y : 3933.00 \text{ cm}^4$

J : Constante de torção da seção transversal. $J : 159.50 \text{ cm}^4$

C_w : Constante de empenamento da seção transversal. $C_w : 3441766.00 \text{ cm}^6$

$$\beta_1 = \frac{M_r}{E \cdot J} \quad \beta_1 : 0.018 \text{ cm}^{-1}$$

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

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 48 of 101	

$$M_r : 567.23 \text{ kN.m}$$

Sendo:

$$W_x: \text{Módulo de resistência elástico } W_x : 3241.31 \text{ cm}^3$$

mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

$$f_y: \text{Resistência ao escoamento do aço. } f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r = 0.30 \cdot f_y \quad \sigma_r : 75.00 \text{ MPa}$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_b^2} \cdot \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \cdot \left(1 + 0.039 \cdot \frac{J \cdot L_b^2}{C_w}\right)} \quad M_{cr} : 445.08 \text{ kN.m}$$

Sendo:

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

$$C_b : 1.00$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y \quad M_{pl} : 924.33 \text{ kN.m}$$

Onde:

$$Z_x: \text{Módulo de resistência plástico. } Z_x : 3697.30 \text{ cm}^3$$

$$f_y: \text{Resistência ao escoamento do aço. } f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{a1}: \text{Coeficiente de segurança do material. } \gamma_{a1} : 1.10$$

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

$$\lambda \leq \lambda_p \quad 5.84 \leq 10.75$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad M_{Rd} : 840.30 \text{ kN.m}$$

Onde:

$$\lambda = \frac{b_f/2}{t_f} \quad \lambda : 5.84$$

Sendo:

$$b_f: \text{Largura da mesa comprimida. } b_f : 229.00 \text{ mm}$$

$$t_f: \text{Espessura da mesa comprimida. } t_f : 19.60 \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_p : 10.75$$

Sendo:

$$E: \text{Módulo de elasticidade do aço. } E : 200000 \text{ MPa}$$

$$f_y: \text{Resistência ao escoamento do aço. } f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 49 of 101	

$$M_{pl} = Z \cdot f_y \quad M_{pl} : 924.33 \text{ kN.m}$$

Onde:

$$Z_x: \text{Módulo de resistência plástico.} \quad Z_x : 3697.30 \text{ cm}^3$$

$$f_y: \text{Resistência ao escoamento do aço.} \quad f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{a1}: \text{Coeficiente de segurança do material.} \quad \gamma_{a1} : 1.10$$

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

$$\lambda \leq \lambda_p \quad 48.13 \leq 106.35$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad M_{Rd} : 840.30 \text{ kN.m}$$

Onde:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad \lambda : 48.13$$

Sendo:

$$h: \text{Altura da alma, tomada igual à distância } h \text{ entre as faces internas das mesas.} \quad h : 572.80 \text{ mm}$$

$$t_w: \text{Espessura da alma.} \quad t_w : 11.90 \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_p : 106.35$$

Sendo:

$$E: \text{Módulo de elasticidade do aço.} \quad E : 200000 \text{ MPa}$$

$$f_y: \text{Resistência ao escoamento do aço.} \quad f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y \quad M_{pl} : 924.33 \text{ kN.m}$$

Onde:

$$Z_x: \text{Módulo de resistência plástico.} \quad Z_x : 3697.30 \text{ cm}^3$$

$$f_y: \text{Resistência ao escoamento do aço.} \quad f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{a1}: \text{Coeficiente de segurança do material.} \quad \gamma_{a1} : 1.10$$

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

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

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

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 50 of 101	

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : 0.113 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N5, para a combinação de ações PP+1.5·COMB14(ASD).

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

$$V_{Sd} : 112.50 \text{ kN}$$

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

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$48.13 \leq 69.57$$

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

$$V_{Rd} : 993.11 \text{ kN}$$

Onde:

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

$$\lambda : 48.13$$

Sendo:

h : Altura da alma, tomada igual à distância entre as faces internas das mesas. $h : 572.80 \text{ mm}$

t_w : Espessura da alma. $t_w : 11.90 \text{ mm}$

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

$$\lambda_p : 69.57$$

Sendo:

k_v : Coeficiente de flambagem. $k_v : 5.00$

E : Módulo de elasticidade do aço. $E : 200000 \text{ MPa}$

f_y : Resistência ao escoamento do aço. $f_y : 250.00 \text{ MPa}$

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

$$V_{pl} : 1092.42 \text{ kN}$$

Sendo:

A_w : Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w = d \cdot t_w$$

$$A_w : 72.83 \text{ cm}^2$$

d : Altura total da seção transversal. $d : 612.00 \text{ mm}$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material. $\gamma_{a1} : 1.10$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 51 of 101	

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

Deve satisfazer:

$$\eta \leq 1$$

$$\eta : 0.928 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N5, para a combinação de ações PP+1.5·COMB14(ASD).

N_{c,Sd} : Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.	N_{c,Sd} : 50.09 kN
M_{x,Sd} : Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.	M_{x,Sd} : 362.14 kN.m
M_{y,Sd} : Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.	M_{y,Sd} : 0.000 kN.m

$$N_{Sd} / N_{Rd} < 0.2 \quad 0.066 < 0.200$$

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{2 \cdot N_{c,Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1 \quad \eta : 0.928$$

Onde:

N_{c,Rd} : Força axial resistente de cálculo de compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3).	N_{c,Rd} : 764.14 kN
M_{x,Rd}, M_{y,Rd} : Momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos X e Y da seção transversal (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2).	M_{x,Rd} : 404.62 kN.m
	M_{y,Rd} : 78.07 kN.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)

Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 53 of 101	

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

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

$$\lambda \leq 200 \qquad \lambda : \underline{181.6} \quad \checkmark$$

Onde:

λ : Índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r} \qquad \lambda_x : \underline{72.3}$$

$$\lambda_y : \underline{181.6}$$

Sendo:

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

$$K_x \cdot L_x : \underline{18.000} \text{ m}$$

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

$$K_y \cdot L_y : \underline{9.000} \text{ m}$$

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

$$r_x : \underline{24.89} \text{ cm}$$

$$r_y : \underline{4.96} \text{ cm}$$

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

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1 \qquad \eta : \underline{0.032} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N8, para a combinação de ações PP+1.5·COMB27(ASD).

$$N_{t,Sd}: \text{Força axial de tração solicitante de cálculo, desfavorável.} \qquad N_{t,Sd} : \underline{115.50} \text{ kN}$$

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

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \qquad N_{t,Rd} : \underline{3638.64} \text{ kN}$$

Onde:

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : \underline{160.10} \text{ cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{250.00} \text{ MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

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

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 54 of 101	

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : 0.221 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N7, para a combinação de ações PP+1.5·COMB26(ASD).

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

$$N_{c,Sd} : 168.70 \quad \text{kN}$$

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

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

$$N_{c,Rd} : 764.14 \quad \text{kN}$$

Onde:

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

$$\chi : 0.219$$

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : 0.959$$

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : 160.10 \quad \text{cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \quad \text{MPa}$$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : 1.10$$

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

$$\lambda_0 > 1.5 \rightarrow \chi = \frac{0.877}{\lambda_0^2}$$

$$\chi : 0.219$$

Onde:

λ_0 : Índice de esbeltez reduzido.

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

$$\lambda_0 : 2.001$$

Sendo:

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : 0.959$$

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : 160.10 \quad \text{cm}^2$$

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \quad \text{MPa}$$

N_e : Força axial de flambagem elástica.

$$N_e : 958.45 \quad \text{kN}$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 55 of 101	

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

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

$$N_e : 958.45 \text{ kN}$$

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

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

$$N_{ex} : 6042.63 \text{ kN}$$

Onde:

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

$$K_x \cdot L_x : 18.000 \text{ m}$$

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

$$I_x : 99184.00 \text{ cm}^4$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

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

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

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

$$N_{ey} : 958.45 \text{ kN}$$

Onde:

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

$$K_y \cdot L_y : 9.000 \text{ m}$$

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

$$I_y : 3933.00 \text{ cm}^4$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

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

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

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

$$N_{ez} : 13626.89 \text{ kN}$$

Onde:

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

$$K_z \cdot L_z : 3.000 \text{ m}$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

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

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

$$C_w : 3441766.00 \text{ cm}^6$$

G : Módulo de elasticidade transversal do aço.

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

J : Constante de torção da seção transversal.

$$J : 159.50 \text{ cm}^4$$

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

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

$$r_0 : 25.38 \text{ cm}$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 56 of 101	

Onde:

r_x, r_y : Raios de giração em relação aos eixos principais X, Y, respectivamente.	r_x	: 24.89	cm
	r_y	: 4.96	cm
X_0, Y_0 : Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principais X, Y, respectivamente.	X_0	: 0.00	mm
	Y_0	: 0.00	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 limites dados na Tabela F.1, têm o fator de redução total Q dado por:

$$Q = Q_s \cdot Q_a \quad Q : 0.959$$

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.

$$Q_s : 1.000$$

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

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

$$5.84 \leq 15.84$$

$$Q_s = 1.000$$

$$Q_s : 1.000$$

Sendo:

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

$$(b/t) : 5.84$$

Onde:

b : Largura.

$$b : 114.50 \text{ mm}$$

t : Espessura.

$$t : 19.60 \text{ mm}$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

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

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

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

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

$$Q_a : 0.959$$

Sendo:

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A_g : 160.10 \text{ cm}^2$$

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

$$A_{ef} : 153.48 \text{ cm}^2$$

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

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

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 57 of 101	

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

$$48.13 > 42.14$$

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

$$b_{ef} : 517.13 \text{ mm}$$

Sendo:

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

$$(b/t) : 48.13$$

Onde:

b: Largura.

$$b : 572.80 \text{ mm}$$

t: Espessura.

$$t : 11.90 \text{ mm}$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

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

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

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

$$C_a : 0.34$$

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : 0.351 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N7, para a combinação de ações PP+1.5·COMB11(ASD).

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

$$M_{Sd} : 283.26 \text{ kN.m}$$

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

$$48.13 \leq 161.22$$

Onde:

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

$$\lambda : 48.13$$

Sendo:

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

$$h : 572.80 \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : 11.90 \text{ mm}$$

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

$$\lambda_r : 161.22$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

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

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 58 of 101	

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:

$$M_{Rd} : 806.74 \text{ kN.m}$$

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

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

$$M_{Rd} : 1104.99 \text{ kN.m}$$

Onde:

W_x : Módulo de resistência elástico mínimo da seção W_x : 3241.31 cm³
transversal em relação ao eixo de flexão.

f_y : Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material. γ_{a1} : 1.10

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

$$\lambda > \lambda_p \quad 60.53 > 49.78$$

$$\lambda \leq \lambda_r \quad 60.53 \leq 153.76$$

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

$$M_{Rd} : 806.74 \text{ kN.m}$$

Onde:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad \lambda : 60.53$$

Sendo:

$L_{b,inf}$: Distância entre pontos travados à flambagem lateral. $L_{b,inf} : 3.000 \text{ m}$

r_y : Raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão. $r_y : 4.96 \text{ cm}$

$$\lambda_p = 1.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_p : 49.78$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço. $E : 200000 \text{ MPa}$

f_y : Resistência ao escoamento do aço. $f_y : 250.00 \text{ MPa}$

$$\lambda_r = \frac{1.38 \cdot \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta_1} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2}{I_y}}} \quad \lambda_r : 153.76$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 59 of 101	

Sendo:

I_y : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo Y. I_y : 3933.00 cm⁴

J : Constante de torção da seção transversal. J : 159.50 cm⁴

C_w : Constante de empenamento da seção transversal. C_w : 3441766.00 cm⁶

$\beta_1 = \frac{M_r}{E \cdot J}$ β_1 : 0.018 cm⁻¹

$M_{pl} = Z \cdot f_y$ M_{pl} : 924.33 kN.m

Onde:

Z_x : Módulo de resistência plástico. Z_x : 3697.30 cm³

f_y : Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

$M_r = W \cdot (f_y - \sigma_r)$ M_r : 567.23 kN.m

Sendo:

W_x : Módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão. W_x : 3241.31 cm³

f_y : Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

$\sigma_r = 0.30 \cdot f_y$ σ_r : 764.53 MPa

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

C_b : 1.00

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

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

$\lambda \leq \lambda_p$ 5.84 ≤ 10.75

$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$ M_{Rd} : 840.30 kN.m

Onde:

$\lambda = \frac{b_f/2}{t_f}$ λ : 5.84

Sendo:

b_f : Largura da mesa comprimida. b_f : 229.00 mm

t_f : Espessura da mesa comprimida. t_f : 19.60 mm

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 60 of 101	

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

$$\lambda_p : 10.75$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

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

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

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

$$M_{pl} : 924.33 \text{ kN.m}$$

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : 3697.30 \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : 1.10$$

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

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$48.13 \leq 106.35$$

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

$$M_{Rd} : 840.30 \text{ kN.m}$$

Onde:

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

$$\lambda : 48.13$$

Sendo:

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

$$h : 572.80 \text{ mm}$$

t_w: Espessura da alma.

$$t_w : 11.90 \text{ mm}$$

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

$$\lambda_p : 106.35$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

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

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

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

$$M_{pl} : 924.33 \text{ kN.m}$$

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : 3697.30 \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : 1.10$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 61 of 101	

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

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

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

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

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

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1 \quad \eta : 0.239 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N7, para a combinação de ações PP+1.5·COMB11(ASD).

$$V_{Sd}: \text{Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável.} \quad V_{Sd} : 237.00 \text{ kN}$$

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

$$\lambda \leq \lambda_p \quad 48.13 \leq 69.57$$

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad V_{Rd} : 993.11 \text{ kN}$$

Onde:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad \lambda : 48.13$$

Sendo:

$$h: \text{Altura da alma, tomada igual à distância entre as } h : 572.80 \text{ mm}$$

faces internas das mesas.

$$t_w: \text{Espessura da alma.} \quad t_w : 11.90 \text{ mm}$$

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} \quad \lambda_p : 69.57$$

Sendo:

$$k_v: \text{Coeficiente de flambagem.} \quad k_v : 5.00$$

$$E: \text{Módulo de elasticidade do aço.} \quad E : 200000 \text{ MPa}$$

$$f_y: \text{Resistência ao escoamento do aço.} \quad f_y : 250.00 \text{ MPa}$$

$$V_{pl} = 0.60 \cdot A_w \cdot f_y \quad V_{pl} : 1092.42 \text{ kN}$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 62 of 101	

Sendo:

A_w : Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w = d \cdot t_w \quad A_w : 72.83 \text{ cm}^2$$

$$d: \text{Altura total da seção transversal.} \quad d : 612.00 \text{ mm}$$

$$\gamma_{a1}: \text{Coeficiente de segurança do material.} \quad \gamma_{a1} : 1.10$$

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

Deve satisfazer:

$$\eta \leq 1 \quad \eta : 0.527 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N7, para a combinação de ações PP+1.5·COMB26(ASD).

$N_{c,Sd}$: Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.	$N_{c,Sd} : 168.59 \text{ kN}$
$M_{x,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.	$M_{x,Sd} : 278.02 \text{ kN.m}$
$M_{y,Sd}$: Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.	$M_{y,Sd} : 0.000 \text{ kN.m}$

$$N_{Sd} / N_{Rd} \geq 0.2 \quad 0.221 \geq 0.200$$

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1 \quad \eta : 0.527$$

Onde:

$N_{c,Rd}$: Força axial resistente de cálculo de compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3).	$N_{c,Rd} : 764.14 \text{ kN}$
$M_{x,Rd}, M_{y,Rd}$: Momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos X e Y da seção transversal (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2).	$M_{x,Rd} : 806.74 \text{ kN.m}$ $M_{y,Rd} : 78.07 \text{ kN.m}$

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)

Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

Perfil: W 200 x 52.0							
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)
	N11	N12	0.700	66.90	5298.00	1784.00	33.34
	Notas:						
	(1) Inércia em relação ao eixo indicado						
	(2) Momento de inércia à torção uniforme						
		Flambagem		Flambagem lateral			
		Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.		
	β	2.00	2.00	2.00	2.00		
	L _K	1.400	1.400	1.400	1.400		
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_xM_y	T	NMVT	$\sigma \tau f$	
N11/N12	$\lambda \leq 200.0$ Passa	N.P. ⁽¹⁾	$\eta = 1.8$	x: 0.009 m $\eta = 86.2$	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽³⁾	x: 0 m $\eta = 71.5$	x: 0.009 m $\eta = 87.1$	N.P. ⁽⁴⁾	N.P. ⁽⁵⁾	N.P. ⁽⁶⁾	PASSA $\eta = 87.1$

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_xM_y: Resistência ao esforço axial e flexão combinados

T: Resistência à torção

NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante

$\sigma_{\tau f}$: 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 será executada, já que não existe esforço axial de tração.

(2) A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

⁽³⁾ A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

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

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

(6) Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 64 of 101	

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

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

$$\lambda \leq 200$$

$$\lambda : 27.1 \quad \checkmark$$

Onde:

λ : Índice de esbeltez.

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

$$\lambda_x : 15.7$$

$$\lambda_y : 27.1$$

Sendo:

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

$$K_x \cdot L_x : 1.400 \text{ m}$$

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

$$K_y \cdot L_y : 1.400 \text{ m}$$

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

$$r_x : 8.90 \text{ cm}$$

$$r_y : 5.16 \text{ cm}$$

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

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

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : 0.018 \quad \checkmark$$

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

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

$$N_{c,Sd} : 25.83 \text{ kN}$$

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

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

$$N_{c,Rd} : 1462.35 \text{ kN}$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 65 of 101	

Onde:

χ : Fator de redução total associado à resistência à compressão.	χ	:	0.962	
Q : Fator de redução total associado à flambagem local.	Q	:	1.000	
A_g : Área bruta da seção transversal da barra.	A_g	:	66.90	cm ²
f_y : Resistência ao escoamento do aço.	f_y	:	250.00	MPa
γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.	γ_{a1}	:	1.10	

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

$$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2} \quad \chi : 0.962$$

Onde:

λ_0 : Índice de esbeltez reduzido.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} \quad \lambda_0 : 0.305$$

Sendo:

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.	Q	:	1.000	
A_g : Área bruta da seção transversal da barra.	A_g	:	66.90	cm ²
f_y : Resistência ao escoamento do aço.	f_y	:	250.00	MPa
N_e : Força axial de flambagem elástica.	N_e	:	17966.71	kN

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

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

$$N_e : 17966.71 \text{ kN}$$

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

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} \quad N_{ex} : 53356.29 \text{ kN}$$

Onde:

$$K_x \cdot L_x: \text{Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X.} \quad K_x \cdot L_x : 1.400 \text{ m}$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 66 of 101	

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

I_x : 5298.00 cm⁴

E : Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

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

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

N_{ey} : 17966.71 kN

Onde:

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

$K_y \cdot L_y$: 1.400 m

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

I_y : 1784.00 cm⁴

E : Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

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

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

N_{ez} : 18285.17 kN

Onde:

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

$K_z \cdot L_z$: 1.400 m

E : Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

C_w : 166710.00 cm⁶

G : Módulo de elasticidade transversal do aço.

G : 77000 MPa

J : Constante de torção da seção transversal.

J : 33.34 cm⁴

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

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

r_0 : 10.29 cm

Onde:

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

r_x : 8.90 cm

r_y : 5.16 cm

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

X_0 : 0.00 mm

Y_0 : 0.00 mm

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 67 of 101	

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.

$$(b/t) \leq (b/t)_{lim} \quad 8.10 \leq 15.84$$

Sendo:

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

$$(b/t) : 8.10$$

Onde:

b: Largura.

$$b : 102.00 \quad \text{mm}$$

t: Espessura.

$$t : 12.60 \quad \text{mm}$$

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

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

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

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço.

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

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \quad \text{MPa}$$

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

$$(b/t) \leq (b/t)_{lim} \quad 22.89 \leq 42.14$$

Sendo:

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

$$(b/t) : 22.89$$

Onde:

b: Largura.

$$b : 180.80 \quad \text{mm}$$

t: Espessura.

$$t : 7.90 \quad \text{mm}$$

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

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

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

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço.

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

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : 250.00 \quad \text{MPa}$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 68 of 101	

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

Deve satisfazer:

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

η : 0.862 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N11, para a combinação de ações PP+1.5·ASD.

M_{Sd}^+ : Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável. M_{Sd}^+ : 112.22 kN.m

Já que ' $\lambda \leq \lambda_r$ ', deve-se considerar viga de alma não-esbelta (ABNT NBR 8800:2008, Anexo G) $22.89 \leq 161.22$

Onde:

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

λ : 22.89

Sendo:

h : Altura da alma, tomada igual à distância entre as faces h internas das mesas. h : 180.80 mm

t_w : Espessura da alma. t_w : 7.90 mm

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

λ_r : 161.22

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y : Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

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

M_{Rd} : 130.11 kN.m

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

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

M_{Rd} : 175.35 kN.m

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 69 of 101	

Onde:

W_x : Módulo de resistência elástico mínimo da seção W_x : 514.37 cm³
transversal em relação ao eixo de flexão.

f_y : Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material. γ_{a1} : 1.10

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

$$\lambda \leq \lambda_p \quad 27.11 \leq 49.78$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad M_{Rd} : 130.11 \text{ kN.m}$$

Onde:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad \lambda : 27.11$$

Sendo:

$L_{b,sup}$: Distância entre pontos travados à flambagem lateral. $L_{b,sup} : 1.400 \text{ m}$

r_y : Raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão. $r_y : 5.16 \text{ cm}$

$$\lambda_p = 1.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_p : 49.78$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço. $E : 200000 \text{ MPa}$

f_y : Resistência ao escoamento do aço. $f_y : 250.00 \text{ MPa}$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y \quad M_{pl} : 143.13 \text{ kN.m}$$

Onde:

Z_x : Módulo de resistência plástico. $Z_x : 572.50 \text{ cm}^3$

f_y : Resistência ao escoamento do aço. $f_y : 250.00 \text{ MPa}$

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material. $\gamma_{a1} : 1.10$

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

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 70 of 101	

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$8.10 \leq 10.75$$

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

$$M_{Rd} : \underline{130.11} \text{ kN.m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{8.10}$$

Sendo:

b_f: Largura da mesa comprimida.

$$b_f : \underline{204.00} \text{ mm}$$

t_f: Espessura da mesa comprimida.

$$t_f : \underline{12.60} \text{ mm}$$

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

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

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço.

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

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{250.00} \text{ MPa}$$

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

$$M_{pl} : \underline{143.13} \text{ kN.m}$$

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico.

$$Z_x : \underline{572.50} \text{ cm}^3$$

f_y: Resistência ao escoamento do aço.

$$f_y : \underline{250.00} \text{ MPa}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

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

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

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$22.89 \leq 106.35$$

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

$$M_{Rd} : \underline{130.11} \text{ kN.m}$$

Onde:

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

$$\lambda : \underline{22.89}$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 71 of 101	

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distância entre h : 180.80 mm
as faces internas das mesas.

t_w: Espessura da alma. **t_w** : 7.90 mm

$$\lambda_p = 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_p : 106.35$$

Sendo:

E: Módulo de elasticidade do aço. **E** : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. **f_y** : 250.00 MPa

$$M_{pl} = Z \cdot f_y \quad M_{pl} : 143.13 \text{ kN.m}$$

Onde:

Z_x: Módulo de resistência plástico. **Z_x** : 572.50 cm³

f_y: Resistência ao escoamento do aço. **f_y** : 250.00 MPa

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material. **γ_{a1}** : 1.10

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

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

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

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

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

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1 \quad \eta : 0.715 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N11, para a combinação de ações PP+1.5·ASD.

V_{Sd}: Esforço cortante solicitante de cálculo, desfavorável. **V_{Sd}** : 158.61 kN

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

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 72 of 101	

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$22.89 \leq 69.57$$

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

$$V_{Rd} : 221.92 \text{ kN}$$

Onde:

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

$$\lambda : 22.89$$

Sendo:

h: Altura da alma, tomada igual à distância entre as h faces internas das mesas. $h : 180.80 \text{ mm}$

t_w: Espessura da alma. $t_w : 7.90 \text{ mm}$

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

$$\lambda_p : 69.57$$

Sendo:

k_v: Coeficiente de flambagem. $k_v : 5.00$

E: Módulo de elasticidade do aço. $E : 200000 \text{ MPa}$

f_y: Resistência ao escoamento do aço. $f_y : 250.00 \text{ MPa}$

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

$$V_{pl} : 244.11 \text{ kN}$$

Sendo:

A_w: Área efetiva ao cisalhamento.

$$A_w = d \cdot t_w$$

$$A_w : 16.27 \text{ cm}^2$$

d: Altura total da seção transversal.

$$d : 206.00 \text{ mm}$$

γ_{a1}: Coeficiente de segurança do material.

$$\gamma_{a1} : 1.10$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 73 of 101	

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

Deve satisfazer:

$$\eta \leq 1$$

$$\eta : 0.871 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N11, para a combinação de ações PP+1.5·ASD.

N_{c,Sd} : Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.	N _{c,Sd} : 25.83 kN
M_{x,Sd} : Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.	M _{x,Sd} ⁺ : 112.22 kN.m
M_{y,Sd} : Momento fletor solicitante de cálculo, desfavorável.	M _{y,Sd} ⁻ : 0.000 kN.m

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

$$0.018 \leq 0.200$$

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

$$\eta : 0.871$$

Onde:

N_{c,Rd} : Força axial resistente de cálculo de compressão (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.3).	N _{c,Rd} : 1462.35 kN
M_{x,Rd}, M_{y,Rd} : Momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos X e Y da seção transversal (ABNT NBR 8800:2008, Artigo 5.4.2).	M _{x,Rd} : 130.11 kN.m
	M _{y,Rd} : 59.63 kN.m

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

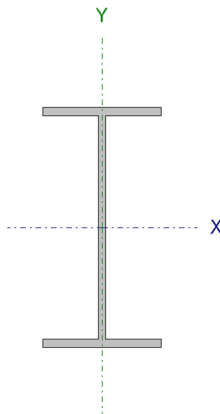
A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

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)

Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

Perfil: W 200 x 22.5							
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)
	N15	N16	9.650	29.00	2029.00	142.00	6.18
	Notas:						
	(1) Inércia em relação ao eixo indicado						
	(2) Momento de inércia à torção uniforme						
		Flambagem		Flambagem lateral			
		Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.		
	β	0.25	0.13	0.00	0.00		
	L_K	2.420	1.210	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_xM_y	T	$NMVT$	$\sigma \tau f$	
N15/N16	$\lambda \leq 200.0$ Passa	$N.P.^{(1)}$	$x: 0 \text{ m}$ $\eta = 85.8$	$N.P.^{(2)}$	$N.P.^{(2)}$	$N.P.^{(3)}$	$N.P.^{(3)}$	$N.P.^{(4)}$	$N.P.^{(5)}$	$N.P.^{(6)}$	$N.P.^{(7)}$	PASSA $\eta = 85.8$

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_xM_y: Resistência ao esforço axial e flexão combinados

T: Resistência à torção

NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante

$\sigma_{\tau f}$: 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 será executada, já que não existe esforço axial de tração.
- (2) A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.
- (3) A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.
- (4) Não existe interação entre o esforço axial e o momento fletor nem entre momentos fletores em ambas as direções para nenhuma combinação. Portanto, a verificação não é necessária.
- (5) A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.
- (6) Não há interação entre o esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.
- (7) Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 75 of 101	

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

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

$$\lambda \leq 200 \qquad \lambda : \underline{109.4} \quad \checkmark$$

Onde:

λ : Índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r} \qquad \begin{array}{ll} \lambda_x & : \underline{14.5} \\ \lambda_y & : \underline{109.4} \end{array}$$

Sendo:

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

$$K_x \cdot L_x : \underline{1.210 \text{ m}}$$

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

$$K_y \cdot L_y : \underline{2.420 \text{ m}}$$

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

$$\begin{array}{ll} r_x & : \underline{8.36 \text{ cm}} \\ r_y & : \underline{2.21 \text{ cm}} \end{array}$$

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

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

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

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1 \qquad \eta : \underline{0.858} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N15, para a combinação de ações PP+1.5·ASD.

$$N_{c,Sd}: \text{Força axial de compressão solicitante de cálculo, desfavorável.} \quad N_{c,Sd} : \underline{299.91 \text{ kN}}$$

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

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \qquad N_{c,Rd} : \underline{349.62 \text{ kN}}$$

Onde:

χ : Fator de redução total associado à resistência à compressão. $\chi : \underline{0.530}$

Q : Fator de redução total associado à flambagem local. $Q : \underline{1.000}$

A_g : Área bruta da seção transversal da barra. $A_g : \underline{29.00 \text{ cm}^2}$

f_y : Resistência ao escoamento do aço. $f_y : \underline{250.00 \text{ MPa}}$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 76 of 101	

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material. $\gamma_{a1} : 1.10$

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

$\lambda_0 \leq 1.5 \rightarrow \chi = 0.658^{\lambda_0^2}$ $\chi : 0.530$

Onde:

λ_0 : Índice de esbeltez reduzido.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} \quad \lambda_0 : 1.231$$

Sendo:

Q: Fator de redução total associado à flambagem local.	Q : 1.000
A_g: Área bruta da seção transversal da barra.	A_g : 29.00 cm ²
f_y: Resistência ao escoamento do aço.	f_y : 250.00 MPa
N_e: Força axial de flambagem elástica.	N_e : 478.62 kN

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

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

N_e : 478.62 kN

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

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} \quad N_{ex} : 27355.27 \text{ kN}$$

Onde:

K_x·L_x: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo X.	K_x·L_x : 1.210 m
I_x: Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo X.	I_x : 2029.00 cm ⁴
E: Módulo de elasticidade do aço.	E : 200000 MPa

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

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} \quad N_{ey} : 478.62 \text{ kN}$$

Onde:

K_y·L_y: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo Y.	K_y·L_y : 2.420 m
---	--

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 77 of 101	

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

$$I_y : 142.00 \text{ cm}^4$$

E : Módulo de elasticidade do aço.

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

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

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

$$N_{ez} : \infty$$

Onde:

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

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

E : Módulo de elasticidade do aço.

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

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

$$C_w : 13868.00 \text{ cm}^6$$

G : Módulo de elasticidade transversal do aço.

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

J : Constante de torção da seção transversal.

$$J : 6.18 \text{ cm}^4$$

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

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

$$r_0 : 8.65 \text{ cm}$$

Onde:

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

$$r_x : 8.36 \text{ cm}$$

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

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

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

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

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.

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

$$6.38 \leq 15.84$$

Sendo:

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

$$(b/t) : 6.38$$

Onde:

b : Largura.

$$b : 51.00 \text{ mm}$$

t : Espessura.

$$t : 8.00 \text{ mm}$$

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

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

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

Onde:

E : Módulo de elasticidade do aço.

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

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 78 of 101	

f_y : Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa
Alma: Elemento do Grupo 2 da Tabela F.1.
 $(b/t) \leq (b/t)_{lim}$ $30.65 \leq 42.14$

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura. **(b/t)** : 30.65

Onde:

b: Largura. **b** : 190.00 mm

t: Espessura. **t** : 6.20 mm

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

$$(b/t)_{lim} = 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (b/t)_{lim} : 42.14$$

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço. **E** : 200000 MPa

f_y : Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

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

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

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

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

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

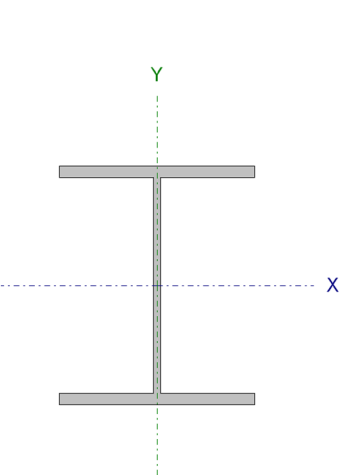
A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

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

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

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

Não existe interação entre o esforço axial e o momento fletor nem entre momentos fletores em ambas as direções para nenhuma combinação. Portanto, a verificação não é necessária.

Perfil: W 200 x 35.9							
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	N14	9.650	45.70	3437.00	764.00	14.51
	Notas:						
	(1) Inércia em relação ao eixo indicado						
	(2) Momento de inércia à torção uniforme						
		Flambagem		Flambagem lateral			
		Plano ZX	Plano ZY	Aba sup.	Aba inf.		
	β	0.50	0.13	0.00	0.00		
	L_K	4.830	1.210	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_xM_y	T	$NMVT$	$\sigma \tau f$	
N13/N14	$\lambda \leq 200.0$ Passa	$N.P.^{(1)}$	$x: 0 \text{ m}$ $\eta = 90.6$	$N.P.^{(2)}$	$N.P.^{(2)}$	$N.P.^{(3)}$	$N.P.^{(3)}$	$N.P.^{(4)}$	$N.P.^{(5)}$	$N.P.^{(6)}$	$N.P.^{(7)}$	PASSA $\eta = 90.6$

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_xM_y: Resistência ao esforço axial e flexão combinados

T: Resistência à torção

NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante

$\sigma_{\tau f}$: 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 será executada, já que não existe esforço axial de tração.
- (2) A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.
- (3) A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.
- (4) Não existe interação entre o esforço axial e o momento fletor nem entre momentos fletores em ambas as direções para nenhuma combinação. Portanto, a verificação não é necessária.
- (5) A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.
- (6) Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.
- (7) Não há interação entre os dois esforços cortantes nem entre o momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 80 of 101	

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

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

$$\lambda \leq 200$$

$$\lambda : \underline{118.1} \quad \checkmark$$

Onde:

λ : Índice de esbeltez.

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

$$\begin{aligned} \lambda_x & : \underline{14.0} \\ \lambda_y & : \underline{118.1} \end{aligned}$$

Sendo:

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

$$K_x \cdot L_x : \underline{1.210 \text{ m}}$$

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

$$K_y \cdot L_y : \underline{4.830 \text{ m}}$$

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

$$\begin{aligned} r_x & : \underline{8.67 \text{ cm}} \\ r_y & : \underline{4.09 \text{ cm}} \end{aligned}$$

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

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

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

Deve satisfazer:

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

$$\eta : \underline{0.906} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N13, para a combinação de ações PP+1.5·ASD.

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

$$N_{c,Sd} : \underline{448.90 \text{ kN}}$$

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

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

$$N_{c,Rd} : \underline{495.68 \text{ kN}}$$

Onde:

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

$$\chi : \underline{0.477}$$

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : \underline{1.000}$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 81 of 101	

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

A_g : 45.70 cm²

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 250.00 MPa

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

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

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

χ : 0.477

Onde:

λ_0 : Índice de esbeltez reduzido.

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

λ_0 : 1.329

Sendo:

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.

Q : 1.000

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

A_g : 45.70 cm²

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 250.00 MPa

N_e : Força axial de flambagem elástica.

N_e : 646.44 kN

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

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

N_e : 646.44 kN

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

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

N_{ex} : 46338.13 kN

Onde:

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

$K_x \cdot L_x$: 1.210 m

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

I_x : 3437.00 cm⁴

E : Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

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

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

N_{ey} : 646.44 kN

Onde:

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

$K_y \cdot L_y$: 4.830 m

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 82 of 101	

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

I_y : 764.00 cm⁴

E : Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

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

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

N_{ez} : ∞

Onde:

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

$K_z \cdot L_z$: 0.000 m

E : Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

C_w : 69502.00 cm⁶

G : Módulo de elasticidade transversal do aço.

G : 77000 MPa

J : Constante de torção da seção transversal.

J : 14.51 cm⁴

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

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

r_0 : 9.59 cm

Onde:

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

r_x : 8.67 cm

r_y : 4.09 cm

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

X_0 : 0.00 mm

Y_0 : 0.00 mm

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

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

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

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

8.09 $\leq$ 15.84

Sendo:

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

(b/t) : 8.09

Onde:

b: Largura.

b : 82.50 mm

t: Espessura.

t : 10.20 mm

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

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

(b/t)_{lim} : 15.84

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 83 of 101	

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

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

$$(b/t) \leq (b/t)_{lim} \quad 29.13 \leq 42.14$$

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura. (b/t) : 29.13

Onde:

b: Largura. b : 180.60 mm

t: Espessura. t : 6.20 mm

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

$$(b/t)_{lim} = 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (b/t)_{lim} : 42.14$$

Onde:

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

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

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

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

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

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

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

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

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

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

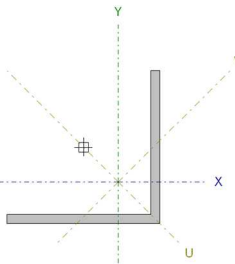
Não existe interação entre o esforço axial e o momento fletor nem entre momentos fletores em ambas as direções para nenhuma combinação. Portanto, a verificação não é necessária.

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 84 of 101	

6.7 BARRAS 9 A 24 – DIAGONAIS (ELU – NBR8800)

Perfil: L 4 x 1/4"

Material: Aço (A-36 250Mpa)

Nós			Características mecânicas							
Inicial	Final	Comprimento (m)	Área (cm ²)	I _x ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _{xy} ⁽⁴⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)	x _g ⁽³⁾ (mm)	y _g ⁽³⁾ (mm)	α ⁽⁵⁾ (graus)
N3	N4	1.620	12.51	125.00	125.00	74.02	1.68	23.04	-23.04	-45.0
Notas: (1) Inércia em relação ao eixo indicado (2) Momento de inércia à torção uniforme (3) Coordenadas do centro de gravidade (4) Produto de inércia (5) 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	1.620	1.620		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 _u	M _v	V _u	V _v	NM _u M _v	T	NMVT	σ τ f	
N3/N4	λ ≤ 200.0 Passa	N.P. ⁽¹⁾	x: 0 m η = 73.6	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽³⁾	N.P. ⁽³⁾	N.P. ⁽⁴⁾	N.P. ⁽⁵⁾	N.P. ⁽⁶⁾	N.P. ⁽⁷⁾	PASSA η = 73.6

Notação:

λ: Limitação do índice de esbeltez

N_t: Resistência à tração

N_c: Resistência à compressão

M_u: Resistência à flexão eixo U

M_v: Resistência à flexão eixo V

V_u: Resistência ao esforço cortante U

V_v: Resistência ao esforço cortante V

NM_uM_v: 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 será executada, já que não existe esforço axial de tração.

(2) A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

(3) A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

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

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

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

(7) Não há interação entre os dois esforços cortantes, nem entre os dois momentos fletores, nem entre esforço axial e flexão nem entre momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 85 of 101	

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

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

$$\lambda \leq 200 \qquad \lambda : 80.2 \quad \checkmark$$

Onde:

λ : Índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r} \qquad \lambda_u : 40.6$$

$$\lambda_v : 80.2$$

Sendo:

$K_u \cdot L_u$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo U.

$$K_u \cdot L_u : 1.620 \text{ m}$$

$K_v \cdot L_v$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo V.

$$K_v \cdot L_v : 1.620 \text{ m}$$

r_u, r_v : Raios de giração em relação aos eixos principais U, V, respectivamente.

$$r_u : 3.99 \text{ cm}$$

$$r_v : 2.02 \text{ cm}$$

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

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

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

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1 \qquad \eta : 0.736 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N3, para a combinação de ações PP+1.5·ASD.

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

$$N_{c,Sd} : 139.66 \text{ kN}$$

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

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \qquad N_{c,Rd} : 189.65 \text{ kN}$$

Onde:

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

$$\chi : 0.733$$

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : 0.910$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 86 of 101	

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

A_g : 12.51 cm²

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 250.00 MPa

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

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

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

χ : 0.733

Onde:

λ_0 : Índice de esbeltez reduzido.

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

λ_0 : 0.862

Sendo:

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.

Q : 0.910

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

A_g : 12.51 cm²

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 250.00 MPa

N_e : Força axial de flambagem elástica.

N_e : 383.44 kN

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

A força axial de flambagem elástica, N_e , de uma barra com seção transversal monossimétrica, cujo eixo principal U é o eixo de simetria, é dada pelo menor valor entre os obtidos por (a) e (b):

N_e : 383.44 kN

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

$$N_{ev} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_v}{(K_v \cdot L_v)^2}$$

N_{ev} : 383.44 kN

Onde:

$K_v \cdot L_v$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo V.

$K_v \cdot L_v$: 1.620 m

I_v : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo V.

I_v : 50.98 cm⁴

E : Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

(b) Para flambagem por flexotorção:

$$N_{euz} = \frac{N_{eu} + N_{ez}}{2 \cdot \left[1 - \left(u_0/r_0 \right)^2 \right]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{eu} \cdot N_{ez} \cdot \left[1 - \left(u_0/r_0 \right)^2 \right]}{\left(N_{eu} + N_{ez} \right)^2}} \right]$$

N_{euz} : 1496.91 kN

Onde:

$$N_{eu} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_u}{(K_u \cdot L_u)^2}$$

N_{eu} : 1496.96 kN

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 87 of 101	

Sendo:

$K_u \cdot L_u$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo U.

$$K_u \cdot L_u : 1.620 \text{ m}$$

I_u : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo U.

$$I_u : 199.02 \text{ cm}^4$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

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

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

$$N_{ez} : \infty$$

Sendo:

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

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

E: Módulo de elasticidade do aço.

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

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

$$C_w : 13.56 \text{ cm}^6$$

G: Módulo de elasticidade transversal do aço.

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

J: Constante de torção da seção transversal.

$$J : 1.68 \text{ cm}^4$$

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

$$r_0 = \sqrt{(r_u^2 + r_v^2 + u_0^2 + v_0^2)}$$

$$r_0 : 5.66 \text{ cm}$$

Onde:

r_u, r_v : Raios de giração em relação aos eixos principais U, V, respectivamente.

$$r_u : 3.99 \text{ cm}$$

$$r_v : 2.02 \text{ cm}$$

U_0, V_0 : Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principais U, V, respectivamente.

$$U_0 : 34.76 \text{ mm}$$

$$V_0 : 0.00 \text{ mm}$$

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 limites dados na Tabela F.1, têm o fator de redução total Q dado por:

$$Q = Q_s$$

$$Q : 0.910$$

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.

$$Q_s : 0.910$$

Mesa: Elemento do Grupo 3 da Tabela F.1.

$$0.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} < (b/t)$$

$$12.73 < 16.00$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 88 of 101	

$$(b/t) \leq 0.91 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 16.00 \leq 25.74$$

$$Q_s = 1.340 - 0.76 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad Q_s : \underline{0.910}$$

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura. (b/t) : 16.00

Onde:

b: Largura. b : 101.60 mm

t: Espessura. t : 6.35 mm

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

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

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

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

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

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

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

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

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

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

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

Perfil: L 4 x 1/4"
Material: Aco (A-36 250Mpa)

Barra	VERIFICAÇÕES (ABNT NBR 8800:2008)											Estado
	λ	N_t	N_c	M_u	M_v	V_u	V_v	NM_uM_v	T	$NMVT$	$\sigma \tau f$	
N1/N2	$\lambda \leq 200.0$ Passa	N.P. ⁽¹⁾	$x: 0 \text{ m}$ $\eta = 61.9$	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽³⁾	N.P. ⁽³⁾	N.P. ⁽⁴⁾	N.P. ⁽⁵⁾	N.P. ⁽⁶⁾	N.P. ⁽⁷⁾	PASSA $\eta = 61.9$

Notação:

λ : Limitação do índice de esbeltez

N_t : Resistência à tração

N_c : Resistência à compressão

M_y : Resistência à flexão eixo U

M_V : Resistência à flexão eixo V

V_u : Resistência ao esforço cortante U

V_v : Resistência ao esforço cortante V

NM_uM_v: Resistência ao esforço axial e flexão combinados

T: Resistência à torção

NMVT: Resistência ao momento de torção, força axial, momento fletor e cortante

$\sigma_{\tau f}$: 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 será executada, já que não existe esforço axial de tração.
- (2) A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.
- (3) A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.
- (4) Este caso não está contemplado pela norma e, portanto, não é possível realizar a verificação.
- (5) A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.
- (6) Não há interação entre a esforço axial, momento fletor, esforço cortante e momento torsor. Portanto, a verificação não é necessária.
- (7) Não há interação entre os dois esforços cortantes, nem entre os dois momentos fletores, nem entre esforço axial e flexão nem entre momento torsor, esforço axial, momentos fletores e esforços cortantes. Portanto, a verificação não é necessária.

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 90 of 101	

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

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

$$\lambda \leq 200 \qquad \lambda : 59.4 \quad \checkmark$$

Onde:

λ : Índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r} \qquad \lambda_u : 30.1$$

$$\lambda_v : 59.4$$

Sendo:

$K_u \cdot L_u$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo U.

$$K_u \cdot L_u : 1.200 \text{ m}$$

$K_v \cdot L_v$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo V.

$$K_v \cdot L_v : 1.200 \text{ m}$$

r_u, r_v : Raios de giração em relação aos eixos principais U, V, respectivamente.

$$r_u : 3.99 \text{ cm}$$

$$r_v : 2.02 \text{ cm}$$

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

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

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

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1 \qquad \eta : 0.619 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N1, para a combinação de ações PP+1.5·ASD.

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

$$N_{c,Sd} : 135.12 \text{ kN}$$

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

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \qquad N_{c,Rd} : 218.20 \text{ kN}$$

Onde:

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

$$\chi : 0.843$$

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.

$$Q : 0.910$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 91 of 101	

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

A_g : 12.51 cm²

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 250.00 MPa

γ_{a1} : Coeficiente de segurança do material.

γ_{a1} : 1.10

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

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

χ : 0.843

Onde:

λ_0 : Índice de esbeltez reduzido.

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

λ_0 : 0.638

Sendo:

Q : Fator de redução total associado à flambagem local.

Q : 0.910

A_g : Área bruta da seção transversal da barra.

A_g : 12.51 cm²

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

f_y : 250.00 MPa

N_e : Força axial de flambagem elástica.

N_e : 698.83 kN

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

A força axial de flambagem elástica, N_e , de uma barra com seção transversal monossimétrica, cujo eixo principal U é o eixo de simetria, é dada pelo menor valor entre os obtidos por (a) e (b):

N_e : 698.83 kN

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

$$N_{ev} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_v}{(K_v \cdot L_v)^2}$$

N_{ev} : 698.83 kN

Onde:

$K_v \cdot L_v$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo V.

$K_v \cdot L_v$: 1.200 m

I_v : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo V.

I_v : 50.98 cm⁴

E : Módulo de elasticidade do aço.

E : 200000 MPa

(b) Para flambagem por flexotorção:

$$N_{euz} = \frac{N_{eu} + N_{ez}}{2 \cdot \left[1 - \left(u_0/r_0 \right)^2 \right]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{eu} \cdot N_{ez} \cdot \left[1 - \left(u_0/r_0 \right)^2 \right]}{\left(N_{eu} + N_{ez} \right)^2}} \right]$$

N_{euz} : 2728.12 kN

Onde:

$$N_{eu} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_u}{(K_u \cdot L_u)^2}$$

N_{eu} : 2728.12 kN

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 92 of 101	

Sendo:

$K_u \cdot L_u$: Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo U.

$$K_u \cdot L_u : 1.200 \text{ m}$$

I_u : Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo U.

$$I_u : 199.02 \text{ cm}^4$$

E: Módulo de elasticidade do aço.

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

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

$$N_{ez} : \infty$$

Sendo:

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

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

E: Módulo de elasticidade do aço.

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

C_w : Constante de empenamento da seção transversal.

$$C_w : 13.56 \text{ cm}^6$$

G: Módulo de elasticidade transversal do aço.

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

J: Constante de torção da seção transversal.

$$J : 1.68 \text{ cm}^4$$

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

$$r_0 = \sqrt{(r_u^2 + r_v^2 + u_0^2 + v_0^2)}$$

$$r_0 : 5.66 \text{ cm}$$

Onde:

r_u, r_v : Raios de giração em relação aos eixos principais U, V, respectivamente.

$$r_u : 3.99 \text{ cm}$$

$$r_v : 2.02 \text{ cm}$$

U_0, V_0 : Coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos principais U, V, respectivamente.

$$U_0 : 34.76 \text{ mm}$$

$$V_0 : 0.00 \text{ mm}$$

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 limites dados na Tabela F.1, têm o fator de redução total Q dado por:

$$Q = Q_s$$

$$Q : 0.910$$

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.

$$Q_s : 0.910$$

Mesa: Elemento do Grupo 3 da Tabela F.1.

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 93 of 101	

$$0.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} < (b/t) \quad 12.73 < 16.00$$

$$(b/t) \leq 0.91 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 16.00 \leq 25.74$$

$$Q_s = 1.340 - 0.76 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad Q_s : \underline{0.910}$$

Sendo:

(b/t): Relação entre largura e espessura. (b/t) : 16.00

Onde:

b: Largura. b : 101.60 mm

t: Espessura. t : 6.35 mm

E: Módulo de elasticidade do aço. E : 200000 MPa

f_y: Resistência ao escoamento do aço. f_y : 250.00 MPa

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

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

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

A verificação não será executada, já que não existe momento fletor.

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

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

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

A verificação não será executada, já que não existe esforço cortante.

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

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

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 94 of 101	

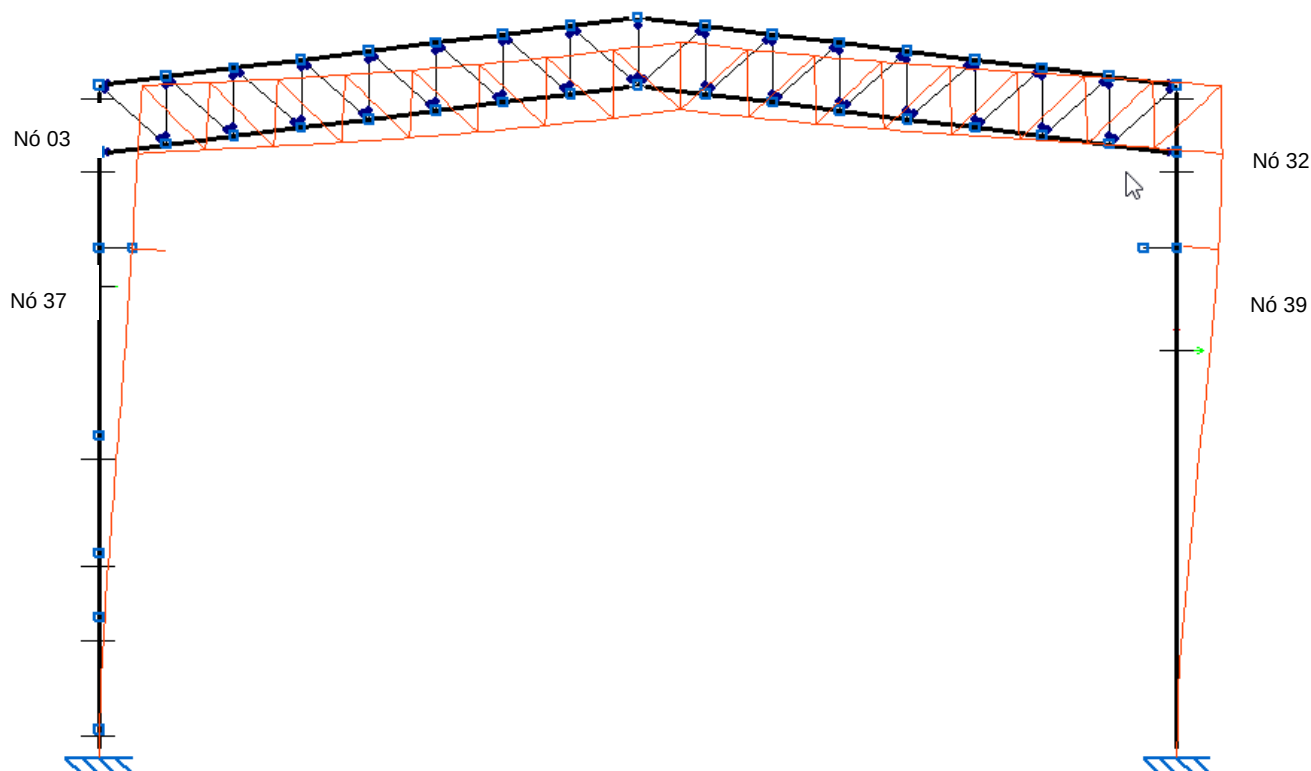
6.9 DESLOCAMENTO NO PÓRTICO (ELS)

Aplicado o carregamento de projeto de acordo com as combinações previstas anteriormente nesta memória, observou-se uma grande tendência de deslocamento lateral no plano do pórtico adotado inicialmente. Ou seja, conforme fica evidente no item anterior desta memória, o que dimensionou esses elementos estruturais foi o deslocamento e não a sua resistência (ELU), dado a baixa taxa de aproveitamento verificada nos pilares.

Tendo em vista que a avaliação estrutural proposta para o cálculo da referida estrutura fora o manual Guide for the Design and Construction of Mill Buildings AISE Technical Report No. 13 / 2003, e que este não apresenta referência para a análise de deslocamentos no Estado Limite de Serviços, foram adotadas as referências indicadas em literatura consagrada no mercado, Edifícios Industriais em Aço – Projeto e Cálculo – Ildony H. Bellei – 6ª Edição – Pini, como segue:

- Deslocamento para o nível do topo do trilho $\Delta = H_{TT}/400$, $\Delta = 2,25\text{cm}$;
- Deslocamento para o nível de cobertura $\Delta = H_{TC}/300$, $\Delta = 4,00\text{cm}$;
- Diferencial entre as colunas no pórtico inferior a 15mm, que é traduzida em folga da roda da ponte rolante;

Abaixo segue a representação gráfica da geometria deformada do pórtico lateralmente em seu plano:



	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 95 of 101	

Os deslocamentos da estrutura foram avaliados com o auxílio da ferramenta computacional SAP 2000 que dado o carregamento indicado anteriormente apresentou as seguintes saídas de valores, de forma tabelada no software Excel:

TABLE: Joint Displacements									
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	Text	cm	cm	cm	Radians	Radians	Radians
3	ENV	Combination	Max	0	1,992465	0,293639	0,002477	0	0
3	ENV	Combination	Min	0	-1,993609	-0,575954	-0,004705	0	0
32	ENV	Combination	Max	0	2,039027	0,023409	0,002837	0	0
32	ENV	Combination	Min	0	-2,061815	-0,0555	-0,001042	0	0
37	ENV	Combination	Max	0	1,690503	0,016895	0,001914	0	0
37	ENV	Combination	Min	0	-1,792639	-0,048371	-0,002052	0	0
39	ENV	Combination	Max	0	1,792639	0,016895	0,002052	0	0
39	ENV	Combination	Min	0	-1,690503	-0,048371	-0,001914	0	0

Observa-se tanto no nível do trilho quanto no topo do pilar ao nível de cobertura que os deslocamentos atendem aos limites especificados.

O pórtico estudado apresenta uma massa conforme tabela resumo de matérias que segue:

Resumo dos Materiais				
Item	Descrição	Perfil	Qtde	Unid
1	Pilares	W 610x125	3000.00	kg
2	Consoles	W 200x52,0	72.80	kg
3	Banzo Superior	W 200x35,9	692.87	kg
4	Banzo Inferior	W 200x22,5	434.25	kg
5	Diagonais	L 4" 1/4	176.40	kg
6	Montantes	L 4" 1/4	250.88	kg
PESO TOTAL			4627.20	kg

6.10 SISTEMA DE CONTRAVENTAMENTO, TERÇAS DE COBERTURA E FECHAMENTO

Não é escopo deste trabalho o dimensionamento do sistema de contraventamento, do sistema de terças de cobertura e de terças de fechamento

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 96 of 101	

6.11 VIGA DE ROLAMENTO (ELU/ELS)

A viga de rolamento foi dimensionada desenvolvendo o conceito do material didático da disciplina, com o auxílio das publicações disponíveis, alinhado com os preceitos da norma americana pelo ASD, e com a ferramenta computacional Mathcad como segue:

MEMÓRIA DE CÁLCULO -VIGA DE ROLAMENTO

1 - Propriedades Mecânicas do Aço

ASTM A36

$$f_y = 250 \text{ MPa}$$

$$f_u = 400 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$\rho_s = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

2 - Flechas Admissíveis

Vertical, devido ao trem-tipo (carga móvel), sem impacto:

$$\text{Vigas para pontes rolantes com capacidade } \leq 200 \text{ kN} \quad f \leq \frac{L}{600}$$

$$\text{Vigas para pontes rolantes com capacidade } > 200 \text{ kN} \quad f \leq \frac{L}{800}$$

$$\text{Vigas para pontes rolantes siderúrgicas} \quad f \leq \frac{L}{1000}$$

Lateral, devido ao trem-tipo:

$$\text{Vigas para qualquer ponte rolante} \quad f \leq \frac{L}{600}$$

3 - Relações para pré-dimensionamento

$$L = 9 \text{ m} \quad f \leq \frac{L}{600} \quad d_1 = \frac{L}{10} = 900 \text{ mm} \quad d_2 = \frac{L}{14} = 642.86 \text{ mm} \quad d = 700 \text{ mm}$$

$$f \leq \frac{L}{800} \quad d_1 = \frac{L}{8} = 1125 \text{ mm} \quad d_2 = \frac{L}{12} = 750 \text{ mm}$$

$$f \leq \frac{L}{1000} \quad d_1 = \frac{L}{5} = 1800 \text{ mm} \quad d_2 = \frac{L}{10} = 900 \text{ mm}$$

$$b_{p1} = \frac{L}{20} = 450 \text{ mm} \quad b_{p2} = \frac{L}{40} = 225 \text{ mm} \quad b_{ps} = 400 \text{ mm}$$

$$t_p \geq 12.5 \text{ mm} \quad t_{ps} = 12.5 \text{ mm} \quad t_f = t_{ps} \quad h = d - 2 t_p \quad h = 675 \text{ mm}$$

1 - Relação altura/espessura:

$$t_w = 8 \text{ mm} \quad \frac{h}{t_w} = 84.38 \quad 0 \leq 0 \quad 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_y}} = 106.35$$

4 - Propriedades Geométricas - Perfil Soldado Monossimétrico de Mesas Diferentes

$$d = 700 \text{ mm}$$

$$b_{fs} = 400 \text{ mm}$$

$$b_{fi} = 200 \text{ mm}$$

$$t_w = 8.0 \text{ mm}$$

$$t_{fs} = 12.5 \text{ mm}$$

$$t_{fi} = 12.5 \text{ mm}$$

$$h = d - t_{fs} - t_{fi}$$

$$h = 675 \text{ mm}$$

$$A = b_{fs} \cdot t_{fs} + b_{fi} \cdot t_{fi} + h \cdot t_w$$

$$A = 129 \text{ cm}^2$$

$$Peso = A \cdot \rho_a$$

$$Peso = 101.27 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$W_{CG} = \frac{b_{fs} \cdot t_{fs} \cdot \left(d - \frac{t_{fs}}{2} \right) + b_{fi} \cdot t_{fi} \cdot \left(\frac{t_{fi}}{2} \right) + h \cdot t_w \cdot \left(t_{fi} + \frac{h}{2} \right)}{b_{fs} \cdot t_{fs} + b_{fi} \cdot t_{fi} + h \cdot t_w}$$

$$W_{CG} = 416.62 \text{ mm}$$

$$d_u = d - W_{CG}$$

$$d_u = 283.38 \text{ mm}$$

$$d_i = W_{CG}$$

$$d_i = 416.62 \text{ mm}$$

$$I_x = \frac{(b_{fs} \cdot t_{fs}^3) + (b_{fi} \cdot t_{fi}^3) + (t_w \cdot h^3)}{12} + b_{fs} \cdot t_{fs} \cdot \left(d_u - \frac{t_{fs}}{2} \right)^2 + b_{fi} \cdot t_{fi} \cdot \left(d_i - \frac{t_{fi}}{2} \right)^2 + t_w \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} + t_{fs} - d_u \right)^2$$

$$I_x = 103410.93 \text{ cm}^4$$

$$M_x = b_{fs} \cdot t_{fs} \cdot \left(d_u - \frac{t_{fs}}{2} \right)$$

$$M_x = 1385.66 \text{ cm}^3$$

5 - Esforços causados pela viga de rolamento

Dados:

$$PP_{\text{Ponte}} = 38.5 \text{ kN}$$

$$a = 2500 \text{ mm}$$

$$N_R = 2$$

$$PP_{\text{Talha}} = 3.57 \text{ kN}$$

$$Cd = PP_{\text{Ponte}} + PP_{\text{Talha}} \quad Cd = 42.07 \text{ kN}$$

$$Cap = 50 \text{ kN}$$

$$R_{Max} = 35 \text{ kN}$$

$$R_{Min} = \frac{Cd + Cap - N_R \cdot R_{Max}}{N_R} \quad R_{Min} = 11.04 \text{ kN}$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 98 of 101	

$$C_{bs} = 21 \text{ kN}$$

$$C_i = 0.25 \cdot R_{Mdx}$$

$$C_i = 8.75 \text{ kN}$$

$$C_{ss} = \frac{0.40 \cdot C_{ap}}{N_R}$$

$$C_{ss} = 10 \text{ kN}$$

$$C_{ls} = 0.20 \cdot R_{Mdx}$$

$$C_{ls} = 7 \text{ kN}$$

$$C_{us_1} = R_{Mdx}$$

$$C_{us_1} = 35 \text{ kN}$$

$$C_{us_2} = R_{Mdx}$$

$$C_{us_2} = 11.04 \text{ kN}$$

$$F_{Influência} = \frac{(L-a)}{L}$$

$$F_{Influência} = 0.72$$

- Esforços na Viga de Rolamento

$$PP_{VR} = 0.90 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$PP_{VR} = 0.40 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$PP = PP_{VR} + PP_{VR}$$

$$PP = 1.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Cálculo do cortante vertical máximo:

$$P_{Mdx} = R_{Mdx}$$

$$Q_{VR} = P_{Mdx} \cdot \left(2 - \frac{a}{L}\right) \cdot 1.25$$

$$Q_{VR} = 75.35 \text{ kN}$$

$$Q_{CP} = PP \cdot \frac{L}{2}$$

$$Q_{CP} = 5.85 \text{ kN}$$

$$Q_{VRV} = Q_{VR} + Q_{CP}$$

$$Q_{VRV} = 81.2 \text{ kN}$$

Cálculo de momento vertical máximo:

$$M_{VR} = \begin{cases} \text{if } a \leq 0.586 \cdot L \\ \left| \frac{P_{Mdx} \cdot \left(L - \frac{a}{2}\right)^2}{2 \cdot L} \right| \\ \text{if } a > 0.586 \cdot L \\ \left| \frac{P_{Mdx} \cdot L}{4} \right| \end{cases} \cdot 1.25$$

$$M_{VR} = 145.99 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{PP} = \frac{PP \cdot L^2}{8}$$

$$M_{PP} = 13,16 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{VR,Y} = M_{PR} + M_{PP}$$

$$M_{VR,Y} = 159,15 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Cálculo do cortante horizontal máximo:

$$H_T = C_{ss}$$

$$V_{VR,H} = H_T \cdot \left(2 - \frac{a}{L}\right)$$

$$V_{VR,H} = 17,22 \text{ kN}$$

Cálculo do momento horizontal máximo:

$$M_{VR,H} = \begin{cases} \text{if } a < 0,586 \cdot L \\ \left| \frac{H_T}{2} \cdot \left(L - \frac{a}{2}\right) \right| \\ \text{if } a > 0,586 \cdot L \\ \left| \frac{H_T \cdot L}{4} \right| \end{cases}$$

$$M_{VR,H} = 33,37 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\Delta_x = \frac{\epsilon \frac{M_{PR} \cdot L^2}{1,25}}{48 E_s \cdot I_z}$$

$$\Delta_x = 4,76 \text{ mm}$$

$$\Delta_{adm} = \frac{L}{600} = 15 \text{ mm}$$

7 - Enrijecedores verticais de apoio

$$t \geq t_w$$

$$b = 85 \text{ mm}$$

$$t = 8 \text{ mm}$$

$$\frac{b}{t} = 10,63$$

$$\leq$$

$$0,56 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_y}} = 15,84$$

$$A = 2 \cdot b \cdot t + 12 \cdot t_w^3$$

$$A = 21,28 \text{ cm}^2$$

$$I_{g,env} = \frac{t \cdot (2 \cdot b + t_w)^3}{12}$$

$$I_{g,env} = 375,98 \text{ cm}^4$$

$$r_g = \sqrt{\frac{I_{g,env}}{A}}$$

$$r_g = 4,2 \text{ cm}$$

$$K = 0,75$$

$$L_y = h$$

$$\lambda_y = \frac{K \cdot L_y}{r_g}$$

$$\lambda_y = 12,04$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 100 of 101	

$$P = \frac{f_y \cdot \lambda_y^2}{\pi^2 \cdot E_a} \quad F_a = 0.6 \cdot f_y \cdot 0.658^P \quad F_a = 14.89 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$N_R = F_a \cdot A \quad N_R = 316.75 \text{ kN} \quad \geq \quad Q_{VR,V} = 81.2 \text{ kN}$$

8 - Enrijecedores Intermediários

$$\frac{h}{t_w} = 84.38 \quad \leq \quad 260$$

$$k_w = 5.0 \quad \text{Sem enrijecedor}$$

$$156 \cdot \sqrt{\frac{k_w}{f_y}} = 69.77 \quad \leq \quad \frac{h}{t_w} = 84.38 \quad \leq \quad 194 \cdot \sqrt{\frac{k_w}{f_y}} = 86.76$$

$$C_w = \frac{156 \cdot \sqrt{\frac{k_w}{f_y}}}{\frac{h}{t_w}} \quad C_w = 0.83$$

$$A_w = h \cdot t_w \quad A_w = 54 \text{ cm}^2$$

$$V_R = 0.4 \cdot f_y \cdot C_w \cdot A_w \quad V_R = 446.5 \text{ kN} \quad \geq \quad Q_{VR,V} = 81.2 \text{ kN} \quad h = 0.68 \text{ m}$$

Não há necessidade de enrijecedores intermediários, mas para combater qualquer excentricidade do trilho, vamos colocá-los a uma distância em torno de 3 vezes "h" ($3 \times 675 = 2025 \text{ mm}$). Será adotado 1800 mm de espaçamento entre os enrijecedores.

9 - Soldas

Trilho adotado: TR-37

$$Q = Q_{VR,V}$$

$$h_T = 122.24 \text{ mm} \quad \alpha = 45^\circ$$

$$Impacto = 1.25$$

$$N = \frac{2 \cdot (h_T + t_{fs})}{\tan(\alpha)} \quad N = 269.48 \text{ mm}$$

$$q_x = \frac{M_x \cdot Q}{2 \cdot I_x} \quad q_x = 0.54 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

$$q_y = \frac{P_{Max} \cdot Impacto}{2 \cdot N} \quad q_y = 0.81 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

	ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS TURMA 2016-2018 Memorial de Cálculo	PROJETO FINAL DE CURSO	
		Rev.: 01	Data: 10/03/2017
		Página 101 of 101	

$$q = \sqrt{q_x^2 + q_y^2}$$

$$q = 0.98 \frac{kN}{cm}$$

$$ec = q \cdot \frac{10 \frac{mm}{cm}}{10.4 \frac{kN}{cm}}$$

$$ec = 0.94 \text{ mm}$$

$$w_{Adotado} = 5 \text{ mm}$$

$$w \geq 6 \text{ mm}$$

Seria adotado $w = 5 \text{ mm}$, conforme a determinação de solda mínima para metal base entre espessuras de 6.35 mm e 12.5 mm, porém recomenda-se usar no mínimo $w = 6 \text{ mm}$ em vigas de rolamento.

10 - Tensões locais em vigas de rolamento (AISE n°13/03) - Esmagamento da Alma

$$F_{bu} = \frac{P_{Mdz} \cdot \alpha}{N \cdot t_w}$$

$$\leq 3$$

$$f_{bu} = 0.9 \cdot f_y$$

$$F_{bu} = 1.28 \frac{kN}{cm^2}$$

$$f_{bu} = 22.5 \frac{kN}{cm^2}$$

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema estrutural adotado se mostrou uma solução eficiente para atender as solicitações de cálculo inerentes utilização da edificação especificado nessa memória. Todos os elementos analisados apresentam resistência de cálculo superior às solicitações de projeto.

Observa-se que para o pórtico objeto desse estudo o fator crítico para a definição dos pilares foi o critério de deslocamento, Estado Limite de Serviços (ELS).

8 ANEXOS

- Memória de cálculo viga de rolamento (Mathcad);
- Catálogo comercial sistema de ventilação, venezianas industriais IVI;
- Pórtico Saipem.DWG (Desenho Básico Pórtico).