



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia



Especialização em Estruturas

TRABALHO FINAL

**DIMENSIONAMENTO DE UM GALPÃO EM
ESTRUTURA DE AÇO SEGUNDO**

A NBR 8800:2008

Pedro Paulo Beleigoli

Professor: Ricardo Hallal Fakury

Belo Horizonte
Novembro de 2011

SUMÁRIO

1) INTRODUÇÃO	3
2) PREMISSAS PARA O DIMENSIONAMENTO	5
3) CARREGAMENTO DA ESTRUTURA.....	7
4) PRÉ - DIMENSIONAMENTO	20
5) COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTOS.....	21
6) ANÁLISE ESTRUTURAL	27
7) VERIFICAÇÃO DAS BARRAS TRACIONADAS	36
8) VERIFICAÇÃO DAS BARRAS COMPRIMIDAS	37
9) VERIFICAÇÃO DA VIGA DOS PÓRTICOS INTERNOS.....	43
10) VERIFICAÇÃO DAS VIGAS V1 e V2	47
11) VERIFICAÇÃO DAS COLUNAS DOS PÓRTICOS INTERNOS	53
12) CONCLUSÃO	61
13) NORMAS / REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

1) INTRODUÇÃO

Os galpões têm ampla variedade de aplicações em diversos setores da economia, sendo especialmente empregados na área industrial e área logística. Existem diversas configurações possíveis para a concepção de um galpão, dependendo da aplicação e necessidade arquitetônica.

O presente trabalho consiste no dimensionamento do galpão apresentado na apostila Ações nas Estruturas – Trabalho prático da disciplina de Projeto de estruturas de Aço 1 do curso de Especialização em Estruturas.

A seguir são apresentadas as vistas e dimensões básicas da estrutura.

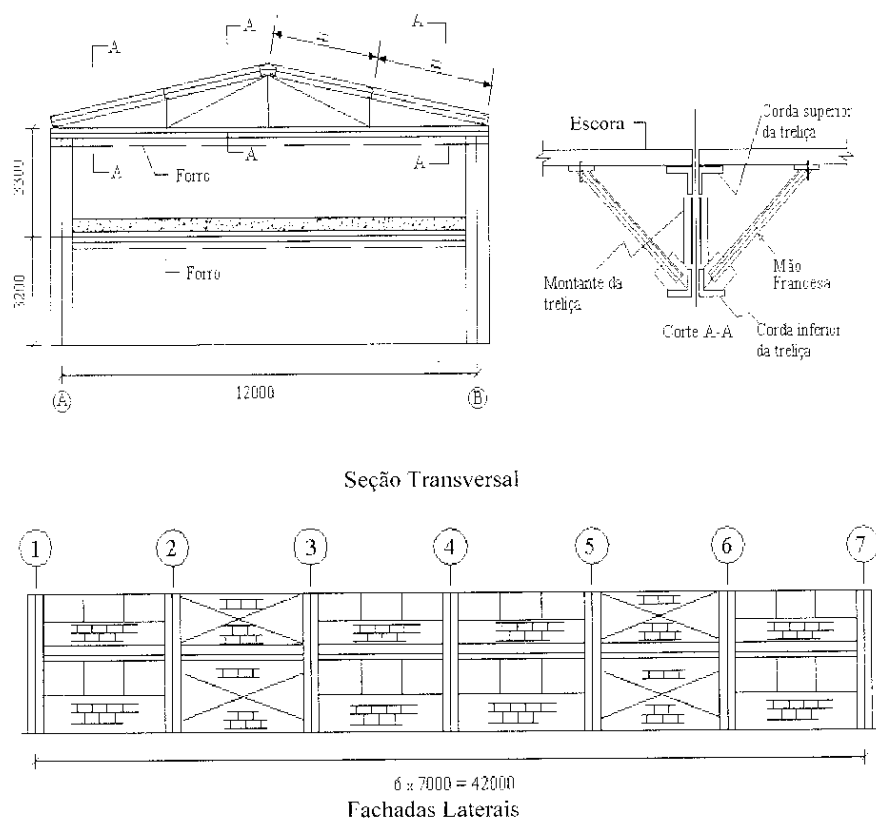


Figura 1.1 - Vista e Dimensões da Estrutura

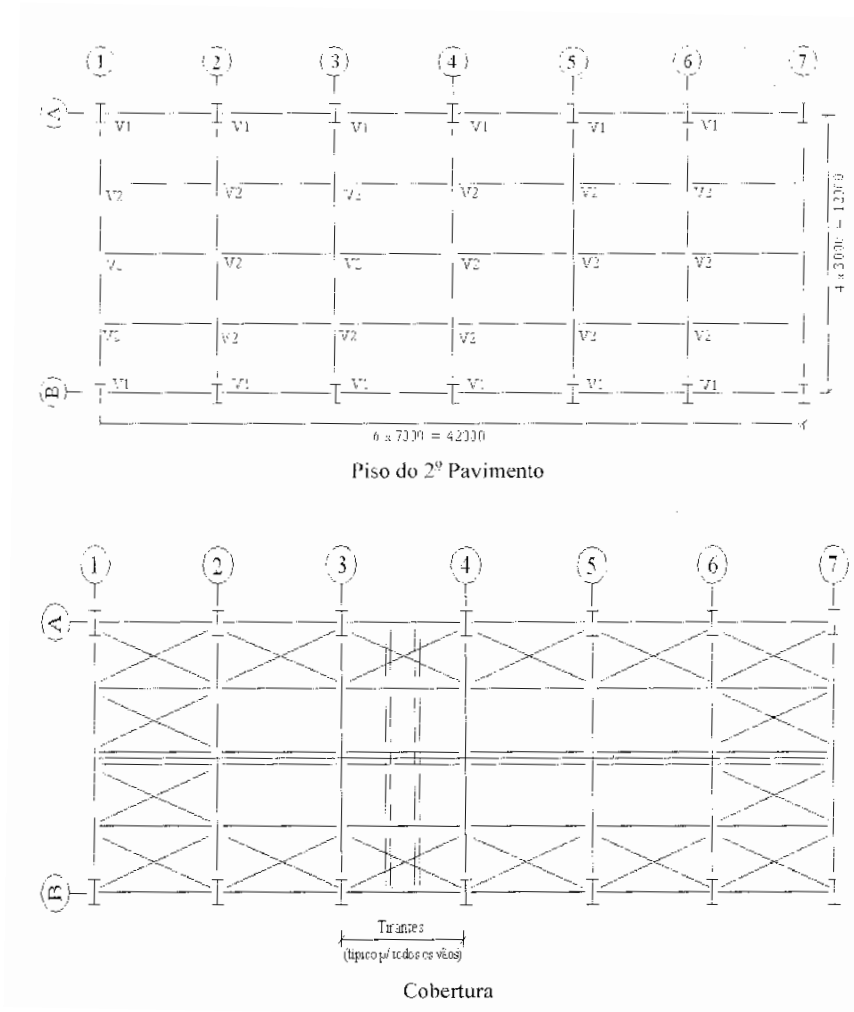


Figura 1.2 - Vista e Dimensões da Estrutura

2) PREMISSAS PARA O DIMENSIONAMENTO

- existe alvenaria com peso total (incluindo acabamento) de 2kN/m^2 , em toda a altura das fachadas laterais entre os eixos 2 e 3 e eixos 5 e 6. e apenas na semi-altura inferior entre os demais eixos, onde existem janelas na semi-altura superior que pesam 0.2kN/m^2 ;
- nas fachadas transversais (eixos 1 e 7). existem vidros estanques ao vento que pesam 0.4kN/m^2 ;
- a laje de concreto, no piso do segundo pavimento, tem 10cm de espessura, é maciça e armada apenas na direção do menor lado de cada painel (a relação entre os lados dos painéis supera a 2);
- os forros falsos nos tetos do primeiro e do segundo pavimento pesam 0.2kN/m^2 e possuem aberturas que permitem a passagem de vento;
- o revestimento do piso do segundo pavimento pesa $0,5\text{kN/m}^2$;
- as telhas são trapezoidais de aço galvanizado e pintadas, e pesam 0.07kN/m^2 ;
- o peso estimado da estrutura metálica (exceto pilares) é de $0,17\text{kN/m}^2$ na cobertura e de $0,37\text{kN/m}^2$ no piso do segundo pavimento;
- o peso estimado dos perfis dos pilares é de $1,15\text{kN/m}$;

Com relação à sobrecarga, sabe-se que:

- de acordo com a ABNT NBR 6120. é de 2kN/m^2 no piso do segundo pavimento, e de acordo com a ABNT NBR 8800, de $0,25\text{kN/m}^2$ no telhado;
- deve ser considerada uma sobrecarga adicional no piso do segundo pavimento de 1 kN/m^2 , devido à colocação de paredes divisórias móveis.

Para determinação das forças devidas ao vento, sabe-se que;

- o edifício situa-se em um subúrbio densamente construído de uma grande cidade brasileira, onde a velocidade básica do vento é de 35 m/s ;
- o edifício não se encontra sujeito a vento de alta turbulência, uma vez que sua altura supera a duas vezes a altura média das construções situadas num raio de 500m ;
- podem ser desconsideradas excentricidades das forças de vento, uma vez que o edifício não possui forma paralelepípedica (o telhado inclinado tem dimensões de tamanho significativo á altura das paredes).

As forças transversais que atuam no edifício, devidas ao vento, juntamente com a carga permanente e a sobrecarga, são resistidas pelos pórticos transversais situados nos eixos 1 a 7, que possuem os pilares engastados na base na sua direção e a viga do piso do segundo pavimento ligada rigidamente a esses pilares. Os pórticos são todos iguais. As forças longitudinais são suportadas pelos contraventamentos em X da cobertura, situados entre os eixos 1 e 2 e entre os eixos 6 e 7 e pelos contraventamentos verticais em X situados entre os eixos 2 e 3 e entre os eixos 5 e 6 nas filas A e B (os pilares são rotulados na base na direção longitudinal). A laje de concreto do piso do 1- pavimento e a cobertura, pelo fato de possuir contraventamentos também no sentido longitudinal do edifício, comportam-se como diafragmas.

3) CARREGAMENTO DA ESTRUTURA

Este item verifica se as ações atuantes na estrutura dos pórticos internos do Galpão estão corretas. Para tal, os cálculos referentes à determinação dos carregamentos serão refeitos e comparados com os valores contidos na apostila do Trabalho Prático.

A figura 2.1 ilustra a numeração dos nós e barras dos pórticos internos:

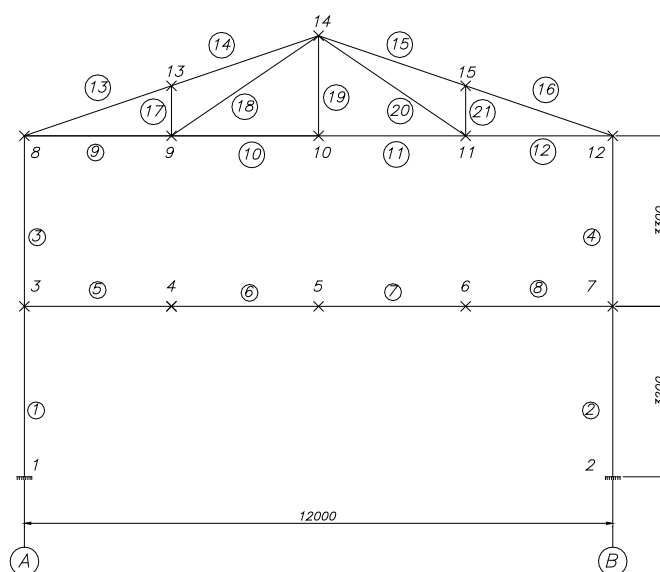


Figura 2.1 – Numeração dos nós

- **Cargas Permanentes:**

- **Cobertura:**

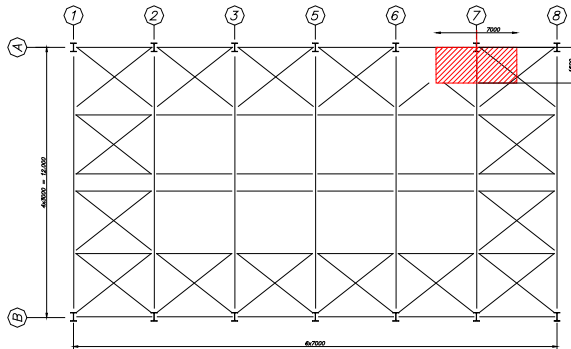
Peso próprio das telhas	0,07 kN/m ²
Estrutura da cobertura	0,17 kN/m ²
Forro	0,20 kN/m ²

Cargas nos nós 8 e 12:

Cargas atuantes:

Peso próprio das telhas + Estrutura da cobertura + Forro + peso próprio do pilar

Área de influência: $7,0 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} = 10,5 \text{ m}^2$



Área de influência dos nós 8 e 9

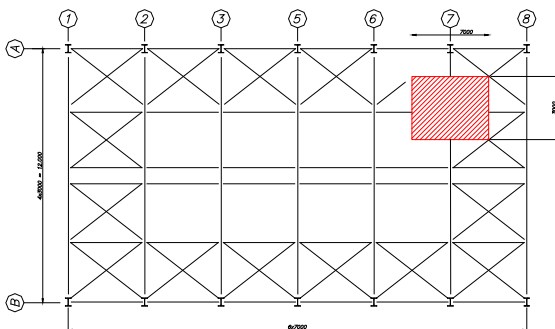
Carga nos nós 8 e 12 = $0,44 \text{ kN/m}^2 \times 10,5 \text{ m}^2 + 1,15 \text{ kN/m} \times 3,3 \text{ m} = 8,42 \text{ kN}$

Cargas nos nós 9, 10 e 11:

Cargas atuantes:

Forro: $0,2 \text{ kN/m}^2$

Área de influência: $7,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m} = 21 \text{ m}^2$



Área de influência dos nós 9,10 e 11

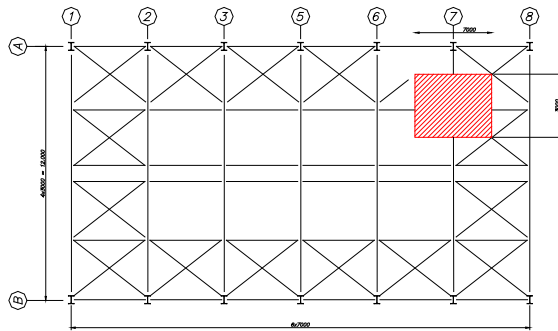
Carga nos nós 9, 10 e 11 = $0,2 \text{ kN/m}^2 \times 21 \text{ m}^2 = 4,2 \text{ kN}$

Cargas nos nós 13, 14 e 15:

Cargas atuantes:

Peso próprio das telhas + Estrutura da cobertura = $0,07 \text{ kN/m}^2 + 0,17 \text{ kN/m}^2 = 0,24 \text{ kN/m}^2$

Área de influência: $7,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m} = 21 \text{ m}^2$



Área de influência dos nós 13,14 e 15

Carga nos nós 13, 14 e 15 = $0,24 \text{ kN/m}^2 \times 21 \text{ m}^2 = 5,04 \text{ kN}$

- Piso do segundo Pavimento:

Vigamento metálico $0,37 \text{ kN/m}^2$

Revestimento $0,5 \text{ kN/m}^2$

Forro $0,2 \text{ kN/m}^2$

Laje: espessura = 10 cm ; Densidade: $2,5 \text{ kN/m}^3$

$0,1 \text{ m} \times 2,5 \text{ kN/m}^3$ = $2,5 \text{ kN/m}^2$

$\Sigma = 0,37 \text{ kN/m}^2 + 0,5 \text{ kN/m}^2 + 0,2 \text{ kN/m}^2 + 2,5 \text{ kN/m}^2 = 3,57 \text{ kN/m}^2$

Peso próprio dos pilares $1,15 \text{ kN/m}$

Paredes $2,0 \text{ kN/m}^2$

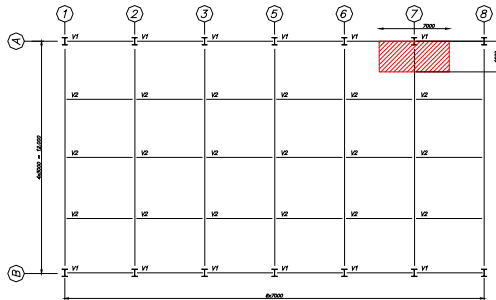
Janelas $0,2 \text{ kN/m}^2$

Cargas nos nós 3 e 7:

Cargas atuantes nos eixos 3 e 7:

Vigamento metálico + Revestimento + Forro + Laje = 3,57 kN/m²

Área de influência: 7,0 m x 1,5 m = 10,5 m²



Área de influência dos nós 3 e 7

Carga devido aos esforços citados acima: 3,57 kN/m² x 10,5 m² = 37,49 kN

Paredes: 2,0 kN/m² x 7,0 x (1,65 + 3,3) / 2 = 34,65 kN

Vidros: 0,2 kN/m² x 7,0 x 1,65 / 2 = 1,12 kN

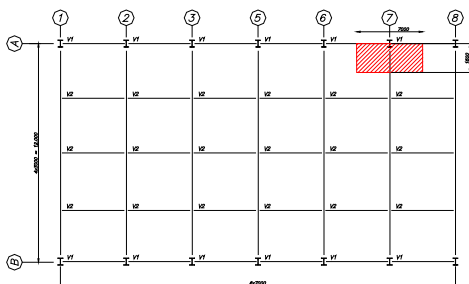
Peso próprio dos pilares: 1,15 x 3,3 m (Altura do pilar entre 2º pavimento e cobertura) = 3,8 kN

$\Sigma = 37,49 \text{ kN} + 34,65 \text{ kN} + 1,12 \text{ kN} + 3,8 \text{ kN} = 77,06 \text{ kN}$

Cargas atuantes no eixo 4:

Vigamento metálico + Revestimento + Forro + Laje = 3,57 kN/m²

Área de influência: 7,0 m x 1,5 m = 10,5 m²



Área de influência dos nós 3 e 7

Carga devido aos esforços citados acima: $3,57 \text{ kN/m}^2 \times 10,5 \text{ m}^2 = 37,49 \text{ kN}$

Paredes: $2,0 \text{ kN/m}^2 \times 7,0 \times 1,65 = 23,1 \text{ kN}$

Vidros: $0,2 \text{ kN/m}^2 \times 7,0 \times 1,65 = 2,31 \text{ kN}$

Peso próprio dos pilares: $1,15 \times 3,3 \text{ m}$ (Altura do pilar entre 2º pavimento e cobertura) = $3,80 \text{ kN}$

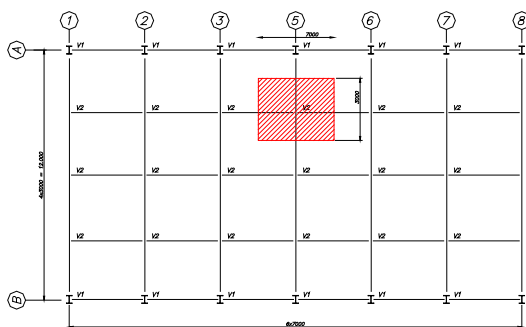
$\Sigma = 37,49 \text{ kN} + 23,1 \text{ kN} + 2,31 \text{ kN} + 3,80 \text{ kN} = 66,7 \text{ kN}$

Cargas nos nós 4,5 e 6:

Cargas atuantes:

Vigamento metálico + Revestimento + Forro + Laje = $3,57 \text{ kN/m}^2$

Área de influência: $7,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m} = 21 \text{ m}^2$



Área de influência dos nós 4, 5 e 6

Carga nos nós , 4, 5 e 6 = $3,57 \text{ kN/m}^2 \times 21 \text{ m}^2 = 74,97 \text{ kN}$

▪ **Resumo das cargas permanentes:**

A figura 2.2 resume as cargas permanentes atuantes nos nós.

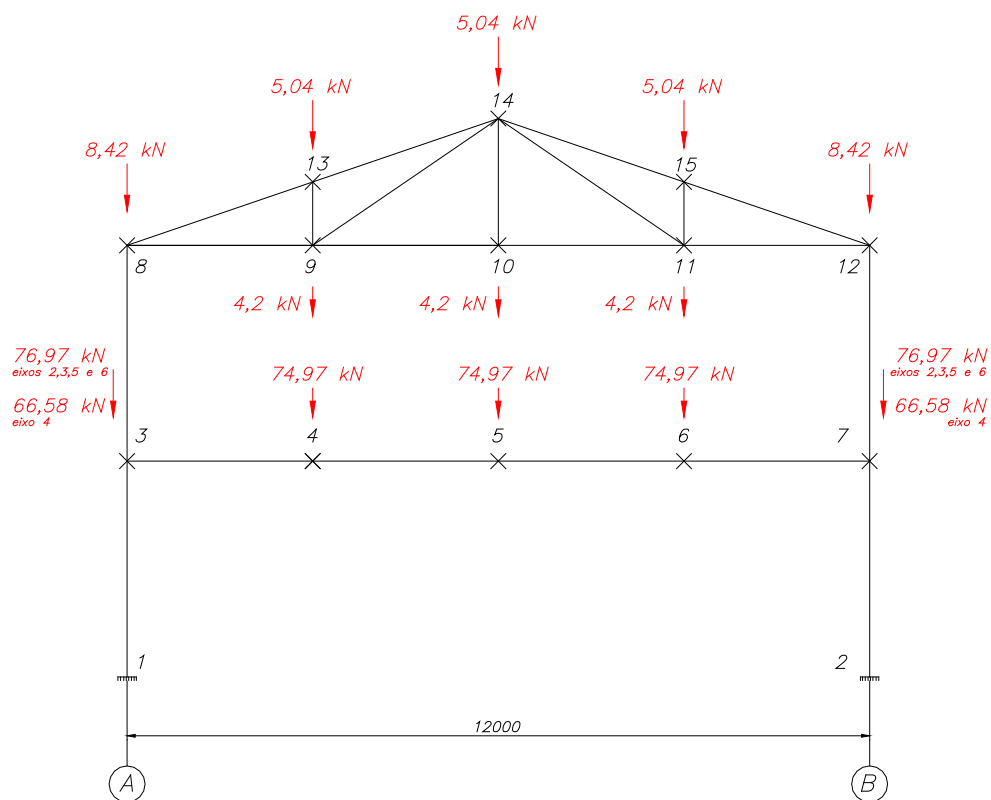


Figura 2.2 – Resumos das cargas permanentes

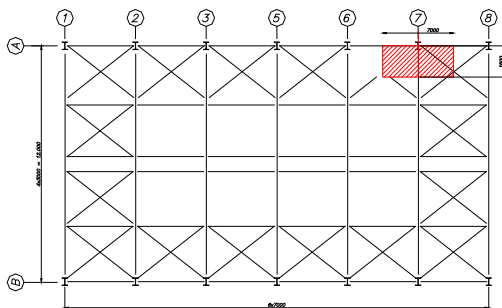
▪ **Sobrecargas:**

- **Cobertura:**

Sobrecarga na cobertura 0,25 kN/m²

Cargas nos nós 8 e 12:

Área de influência: 7,0 m x 1,5 m = 10,5 m²

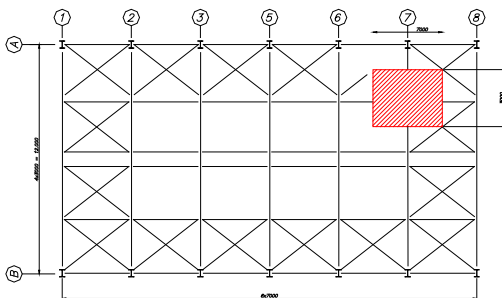


Área de influência dos nós 8 e 9

Carga nos nós 8 e 12 = 0,25 kN/m² x 10,5 m² = 2,63 kN

Cargas nos nós 13, 14 e 15:

Área de influência: 7,0 m x 3,0 m = 21 m²



Área de influência dos nós 13,14 e 15

Carga nos nós 13, 14 e 15 = 0,25 kN/m² x 21 m² = 5,25 kN

- Segundo pavimento:

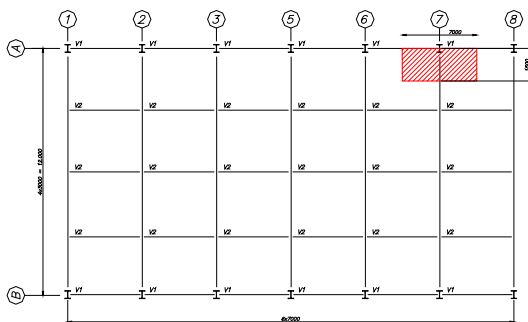
Sobrecarga 2,0 kN/m²

Divisórias móveis 1,0 kN/m²

$$\Sigma = 2,0 \text{ kN/m}^2 + 1,0 \text{ kN/m}^2 = 3,0 \text{ kN/m}^2$$

Cargas nos nós 3 e 7:

Área de influência: 7,0 m x 1,5 m = 10,5 m²

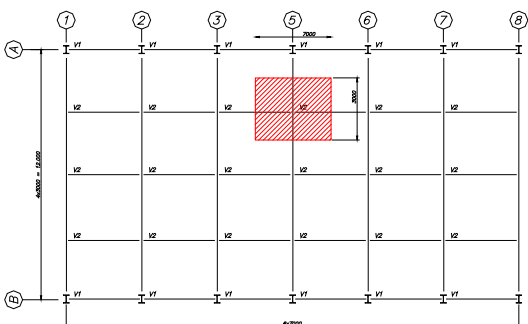


Área de influência dos nós 3 e 7

Carga devido aos esforços citados acima: 3,0 kN/m² x 10,5 m² = 31,5 kN

Cargas nos nós 4,5 e 6:

Área de influência: 7,0 m x 3,0 m = 21 m²



Área de influência dos nós 4, 5 e 6

Carga nos nós , 4, 5 e 6 = 3,0 kN/m² x 21 m² = 63,0 kN

▪ **Resumo do carregamento - Sobrecarga:**

A figura 2.3 resume as cargas permanentes atuantes nos nós.

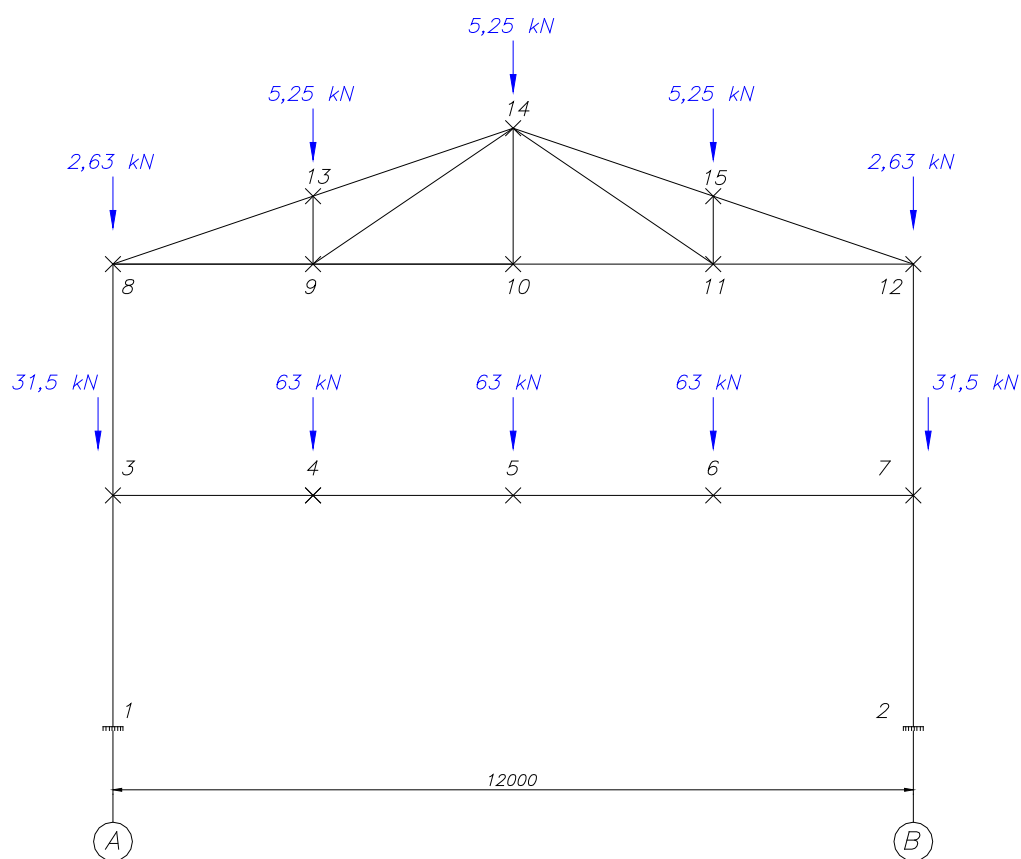


Figura 2.3 – Resumos das Sobrecargas

▪ **Vento:**

Velocidade básica do vento: 35 m/s

$S_1 = 1,0$ (Terreno Plano)

$S_2 = 0,76$ (Altura até 5,0 m) ; $0,83$ (Altura até 5,0 m à 10,0 m) – Categoria IV – Classe B

$S_3 = 1,0$ (Grupo 2)

Velocidade característica = $V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$

$V_{k- < 5,0 m} = 35 \text{ m/s} \times 1,0 \times 0,76 \times 1,0 = 26,2 \text{ m/s}$

$V_{k- 5,0 m < h < 10,0 m} = 35 \text{ m/s} \times 1,0 \times 0,83 \times 1,0 = 29,05 \text{ m/s}$

Pressões dinâmicas:

$$q_{<5,0 m} = 26,6^2 \times 0,613 / 10^3 = 0,43 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{5,0 m < h < 10,0 m} = 29,05^2 \times 0,613 / 10^3 = 0,52 \text{ kN/m}^2$$

Pressões dinâmicas distribuídas na altura:

$$q_{<5,0 m} = 26,6^2 \times 0,613 / 10^3 = 0,43 \text{ kN/m}^2 \times 42,0 \text{ m} / 7,0 \text{ m} = 2,58 \text{ kN/m}$$

$$q_{5,0 m < h < 10,0 m} = 29,05^2 \times 0,613 / 10^3 = 0,52 \text{ kN/m}^2 \times 42,0 \text{ m} / 7,0 \text{ m} = 3,12 \text{ kN/m}$$

Coefficientes de forma externos (C_e):

- Paredes:

$$\frac{1}{2} < h/b = 6,5 / 12 = 0,54 < 3/2$$

$$2 < a/b = 42 / 12 = 3,5 < 4$$

Para $\alpha = 90^\circ$:

Parede a barlavento: $C_e = + 0,7$

Parede à Sotavento: $C_e = - 0,6$

Telhado:

$$\frac{1}{2} < h/b = 6,5 / 12 = 0,54 < 3/2$$

Para $\alpha = 90^\circ$; $\theta = 20^\circ$:

Parte a barlavento: $C_e = -0,7$

Parte à Sotavento: $C_e = -0,5$

Coeficientes de forma internos (C_i):

$C_{pi} = +0,2$ – Facha longitudinal igualmente permeável e fachadas transversais impermeáveis.

A figura 2.4 resume os Coeficientes de pressão $C = C_e - C_i$

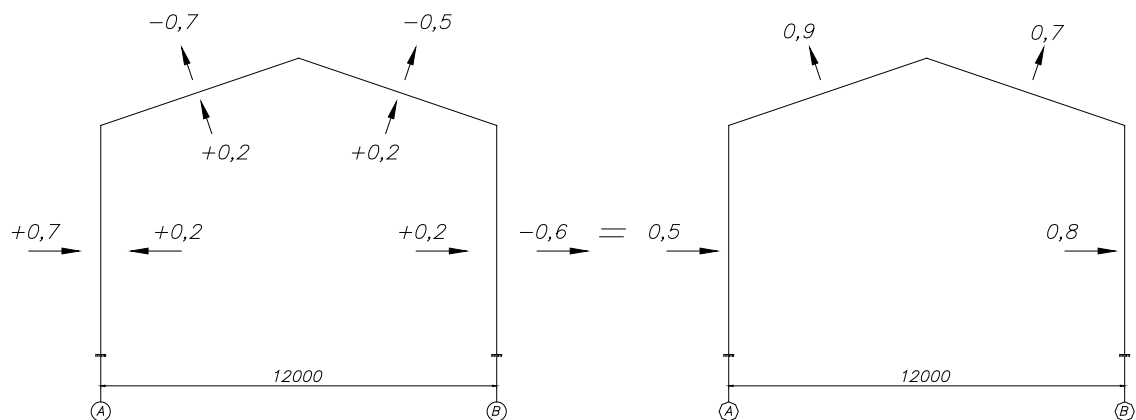


Figura 2.4 – Coeficientes de pressão

O carregamento final devido ao vento é obtido pelo produto *Coefficientes de pressão x Pressão dinâmica distribuída na altura* e mostrado na figura 2.5.

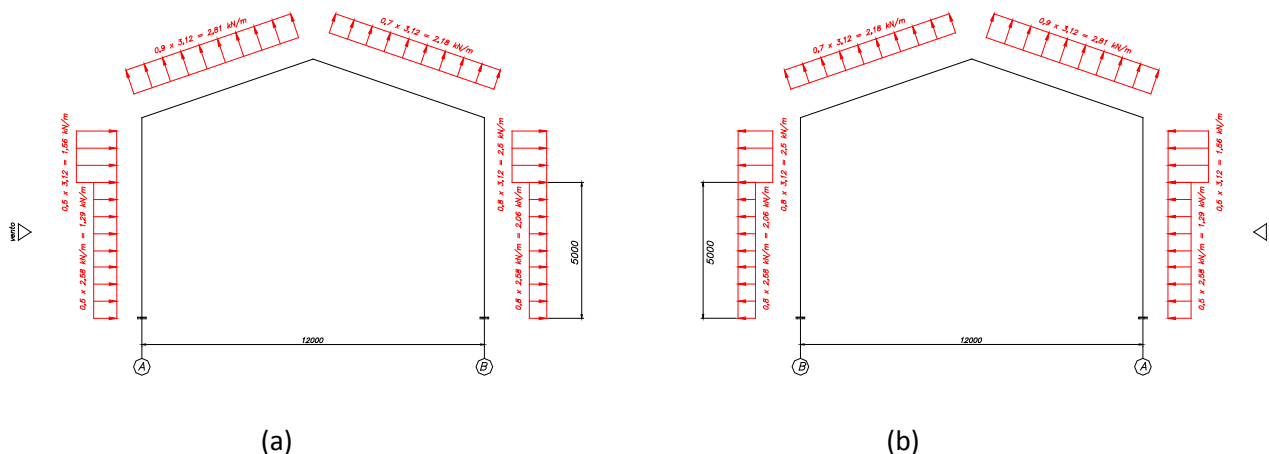


Figura 2.5 – Carregamento final devido ao vento – (a) Vento da direita para a esquerda – (b) Vento da direita para a esquerda

A Figura 2.6 ilustra a decomposição dos esforços devidos ao vento na cobertura nos nós da treliça.

Carga no nó 8:

Vertical: $2,81 \text{ kN/m} \times 1,6 \text{ m} \times \cos 20^\circ = 4,22 \text{ kN}$

Horizontal: $2,81 \text{ kN/m} \times 1,6 \text{ m} \times \sin 20^\circ = 1,53 \text{ kN}$

Carga no nó 13:

Vertical: $2,81 \text{ kN/m} \times 3,2 \text{ m} \times \cos 20^\circ = 8,44 \text{ kN}$

Horizontal: $2,81 \text{ kN/m} \times 3,2 \text{ m} \times \sin 20^\circ = 3,06 \text{ kN}$

Carga no nó 14:

Vertical: $(2,81 \text{ kN/m} + 2,18) \times 1,6 \text{ m} \times \cos 20^\circ = 7,49 \text{ kN}$

Vertical: $(2,81 \text{ kN/m} - 2,18) \times 1,6 \text{ m} \times \sin 20^\circ = 0,34 \text{ kN}$

Carga no nó 15:

Vertical: $2,18 \text{ kN/m} \times 3,2 \text{ m} \times \cos 20^\circ = 6,54 \text{ kN}$

Horizontal: $2,18 \text{ kN/m} \times 3,2 \text{ m} \times \sin 20^\circ = 2,38 \text{ kN}$

Carga no nó 12:

Vertical: $2,18 \text{ kN/m} \times 1,6 \text{ m} \times \cos 20^\circ = 3,27 \text{ kN}$

Horizontal: $2,18 \text{ kN/m} \times 1,6 \text{ m} \times \sin 20^\circ = 1,19 \text{ kN}$

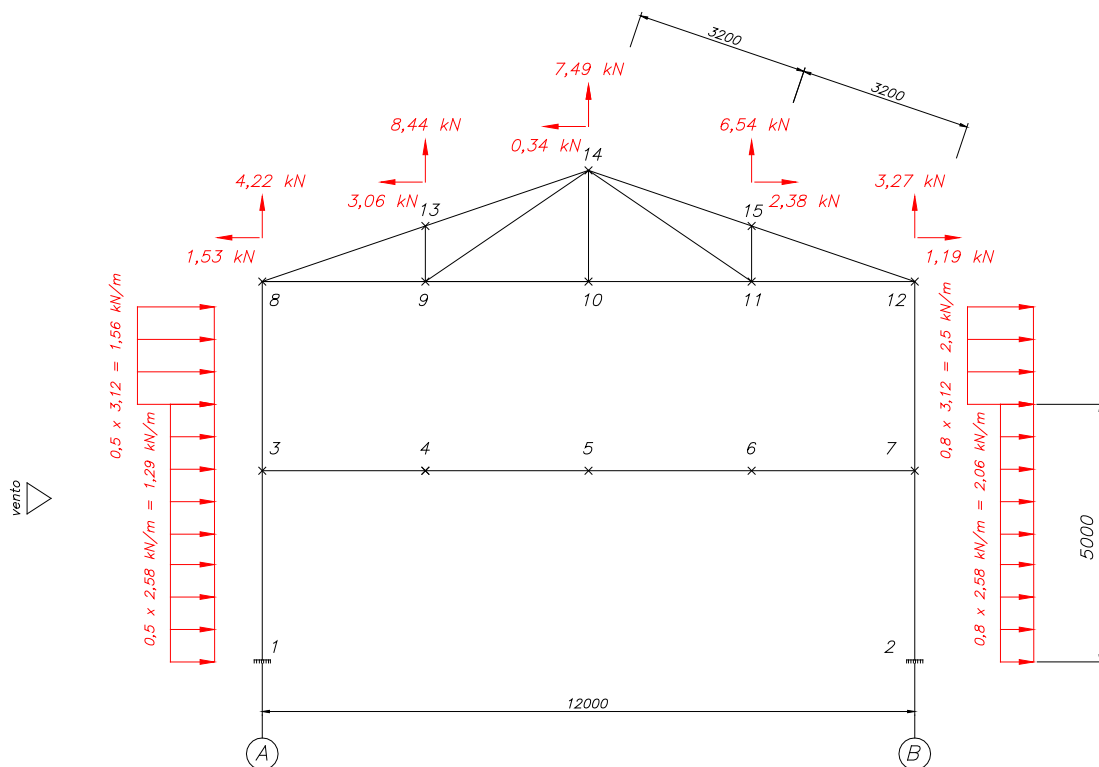


Figura 2.6 – Forças decompostas nos nós da treliça

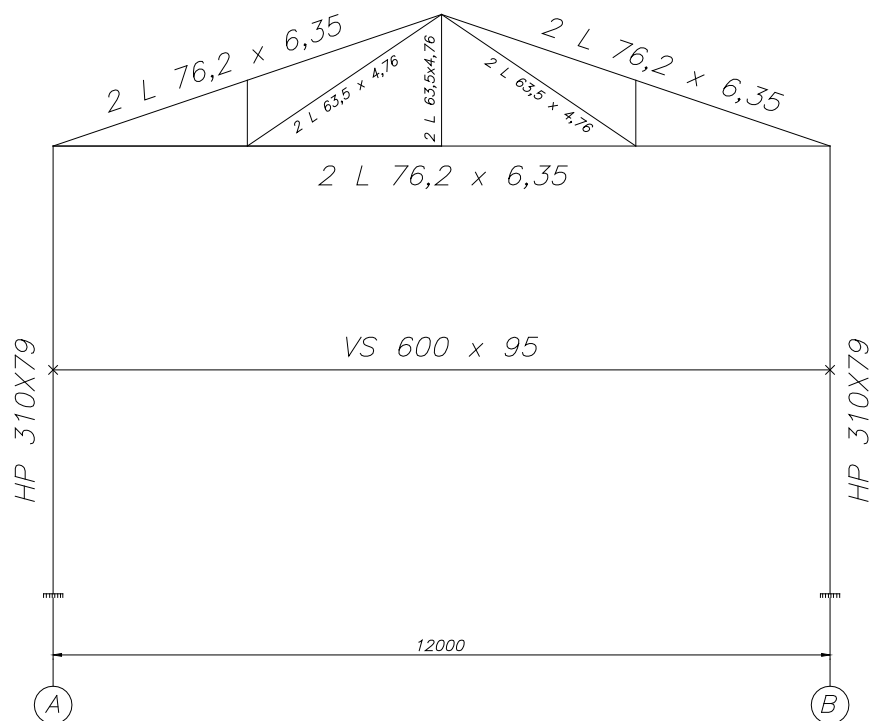
Foi verificada divergências em relação à apostila do trabalho prático:

- Cargas permanentes dos nós 3 e 7. A altura considerada para cálculo do peso próprio dos pilares foi de 3,2 m, no entanto, esta altura é de 3,3 m. Esta divergência não causa diferenças significativas na análise da estrutura.

4) PRÉ - DIMENSIONAMENTO

Pré – dimensionamento dos pórticos internos. Este item consiste em escolher previamente os perfis dos pórticos internos para posterior análise estrutural:

A figura 3.1 ilustra os perfis escolhidos:



*2 L 63,5x4,76 – Típico para diagonais e montantes

Figura 3.1 – Pré – Dimensionamento do Galpão

5) COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTOS

Neste ítem obteremos as combinações últimas de ações, adotando as ações agrupadas e levando-se em conta os fatores de combinações. Estas combinações visam

Como a sobrecarga é menor do que 5,0 kN/m² será igual a 1,4 para as cargas permanentes e para a sobrecarga.

Combinação 1:

1,4 x (Cargas Permanentes) + Imperfeições geométricas e de material.

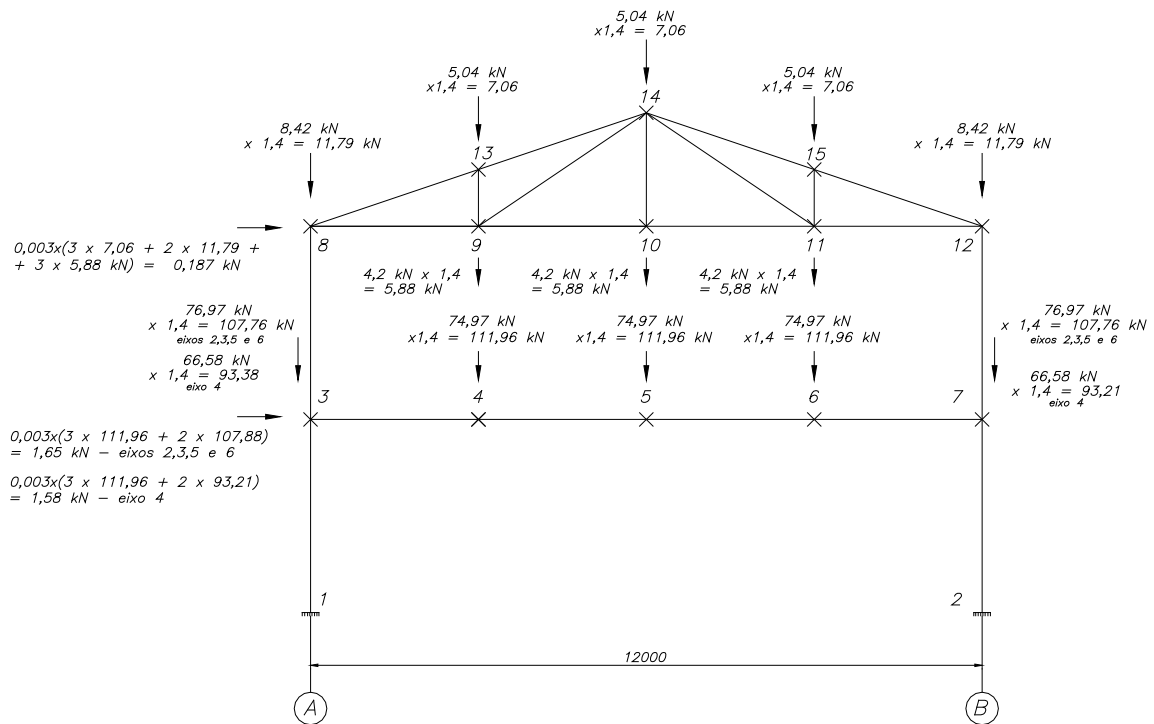


Figura 4.1 – Combinação 1

Combinação 2:

1,4 x (Cargas Permanentes) + 1,4 x (Sobrecargas) + Imperfeições geométricas e de material.

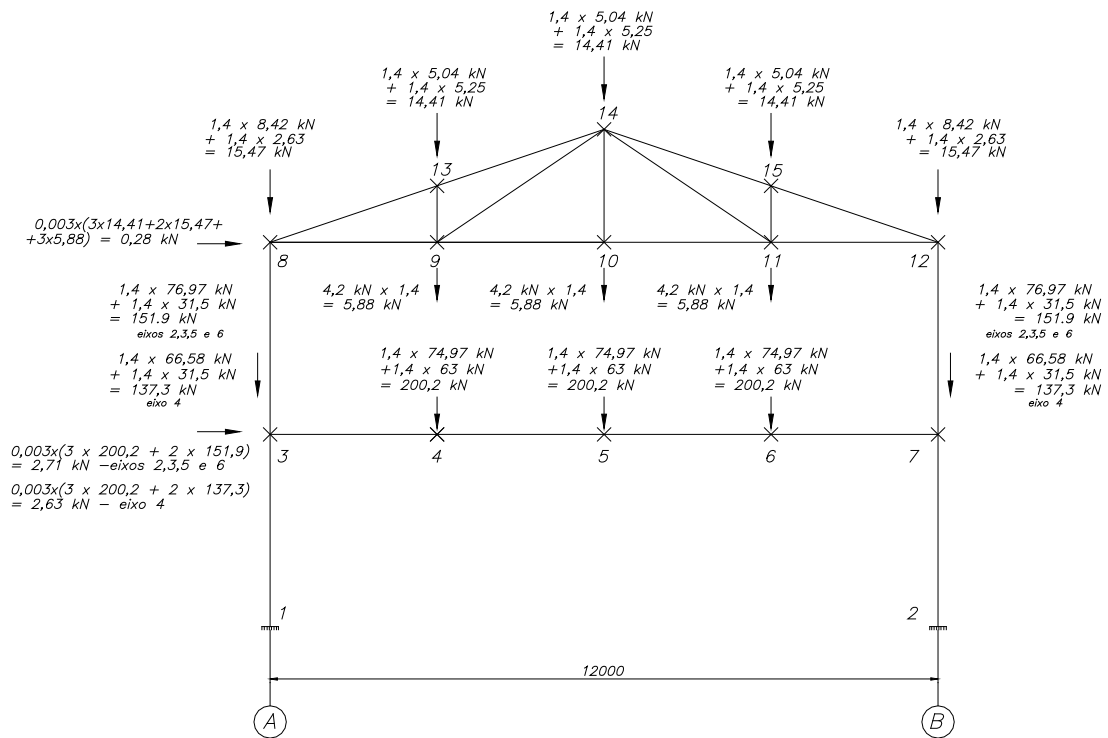


Figura 4.2 – Combinação 2

Combinação 3:

1,4 x (Cargas Permanentes) + 1,4 x (Vento) + Imperfeições de material.

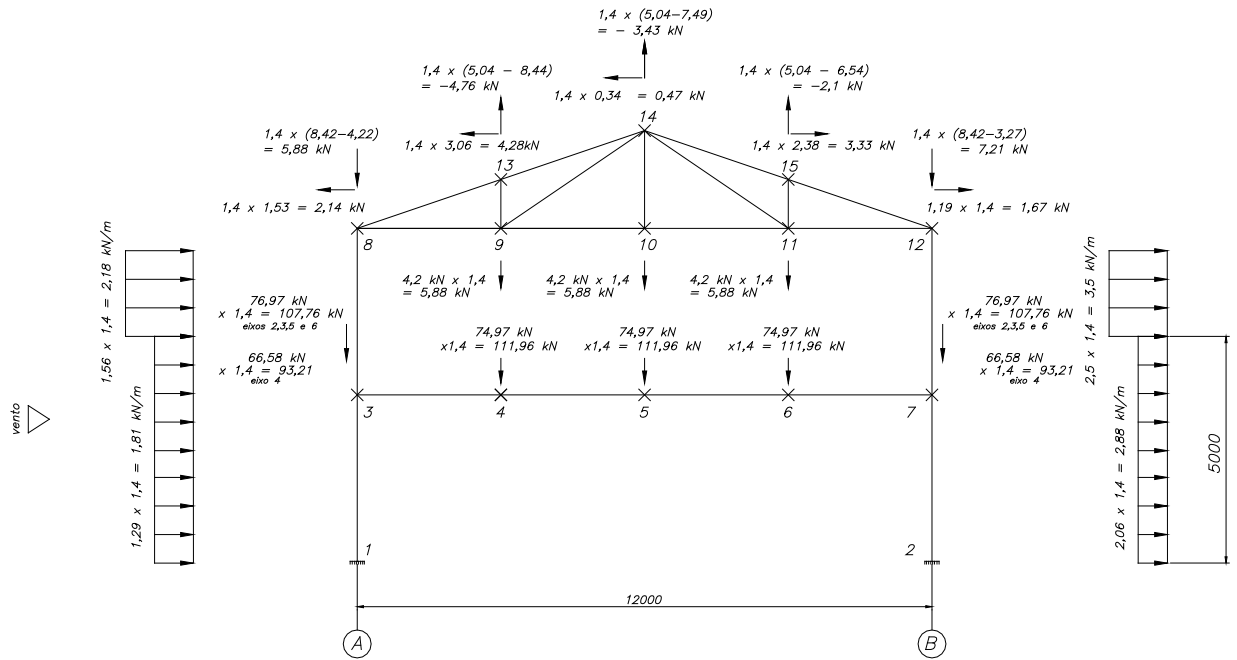


Figura 4.3 – Combinação 3

Combinação 4:

1,4 x (Cargas Permanentes) + 1,4 x (Sobrecargas) + 1,4 x 0,6 x (Vento) + imperfeições do material.

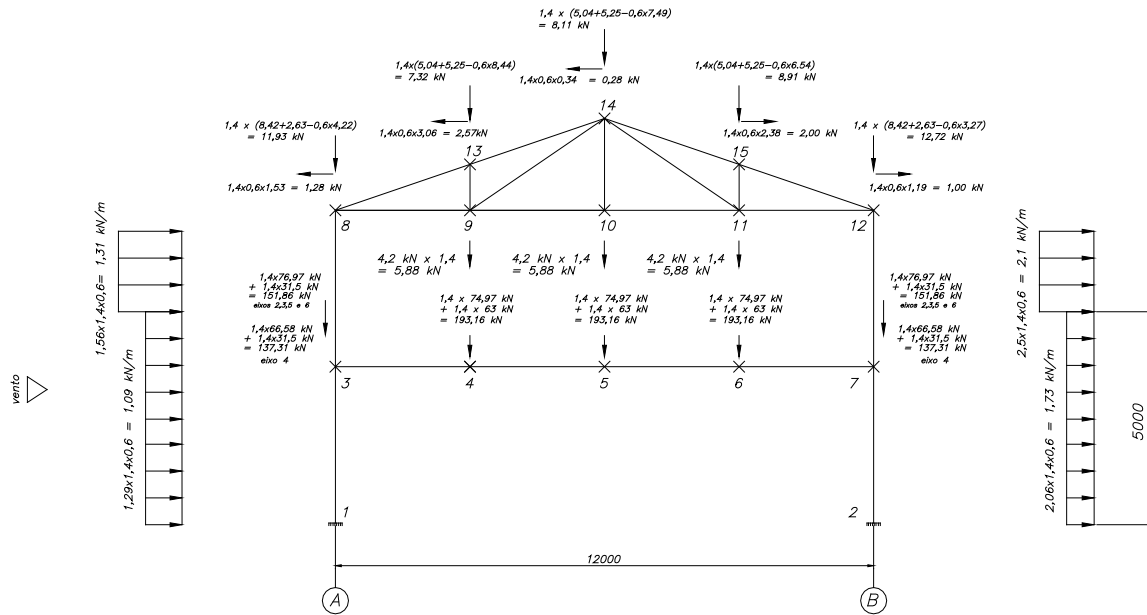


Figura 4.4 – Combinação 4

Combinação 5:

1,4 x (Cargas Permanentes) + 1,4 x (Vento) + 1,4 x 0,8 x (Sobrecarga na cobertura) + 1,4 x 0,7 x (Sobrecarga no 2º pavimento) + imperfeições do material.

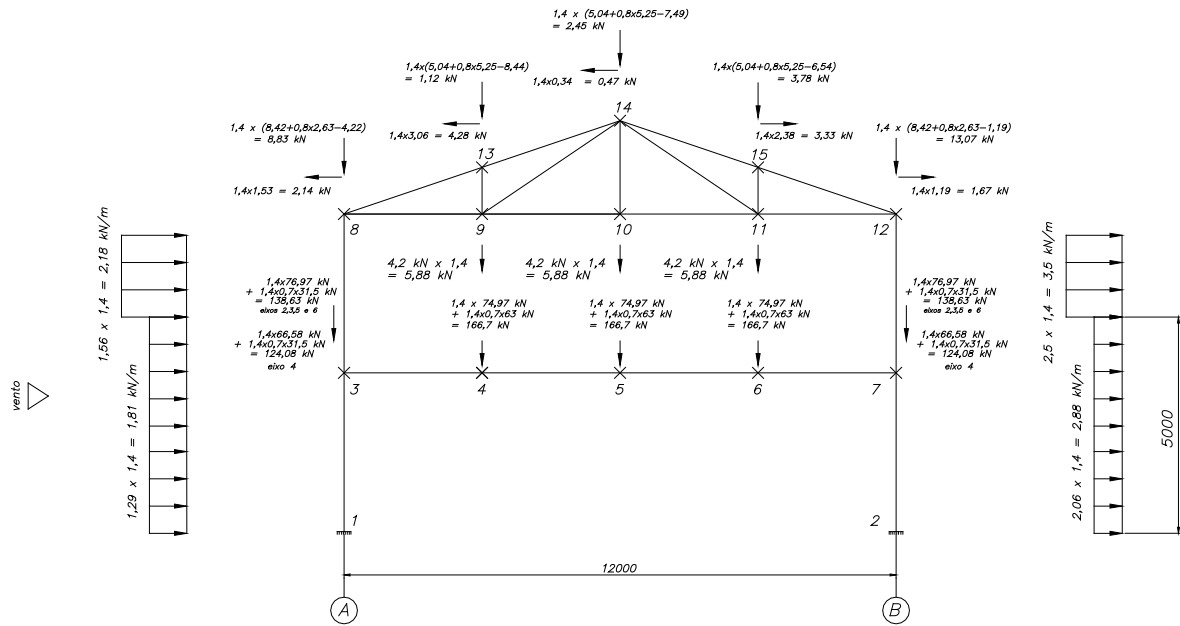


Figura 4.5 – Combinação 5

Combinação 6:

1,0 x (Cargas Permanentes) + 1,4 x (Vento) + Imperfeições do material.

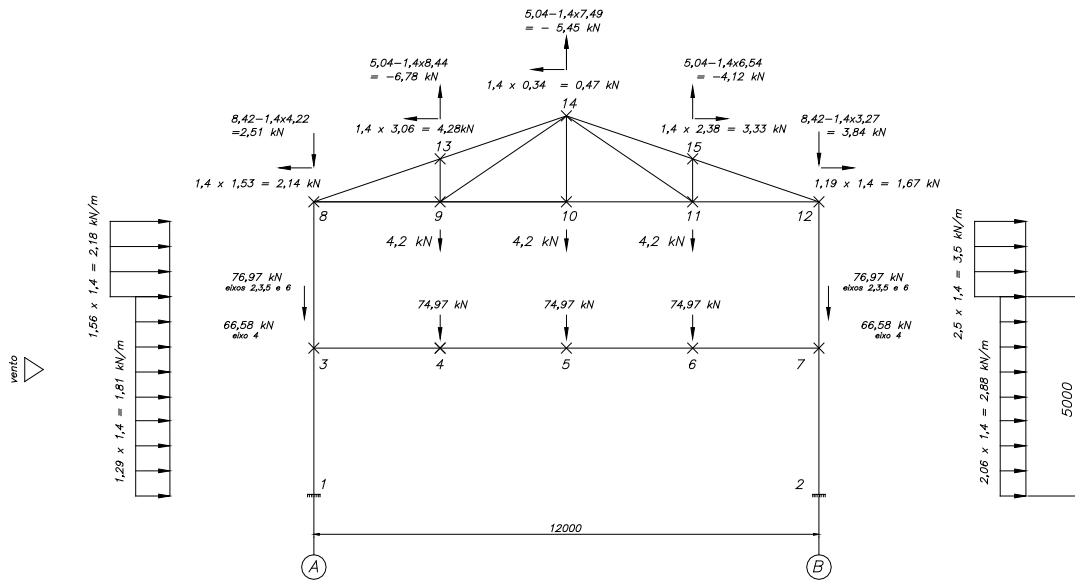


Figura 4.6 – Combinação 6

6) ANÁLISE ESTRUTURAL

Neste item é realizada a análise estrutural através do Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES), objetivando-se obter os esforços máximos atuantes na estrutura. Será considerada a combinação 5 (Ver item 4) e o pórtico interno mais solicitado. A análise considera também o módulo de elasticidade = 160.000 Mpa.

A análise será realizada com o uso do Software SAP 2000 V.12.0.

▪ Análise da estrutura:

- Estrutura nt:

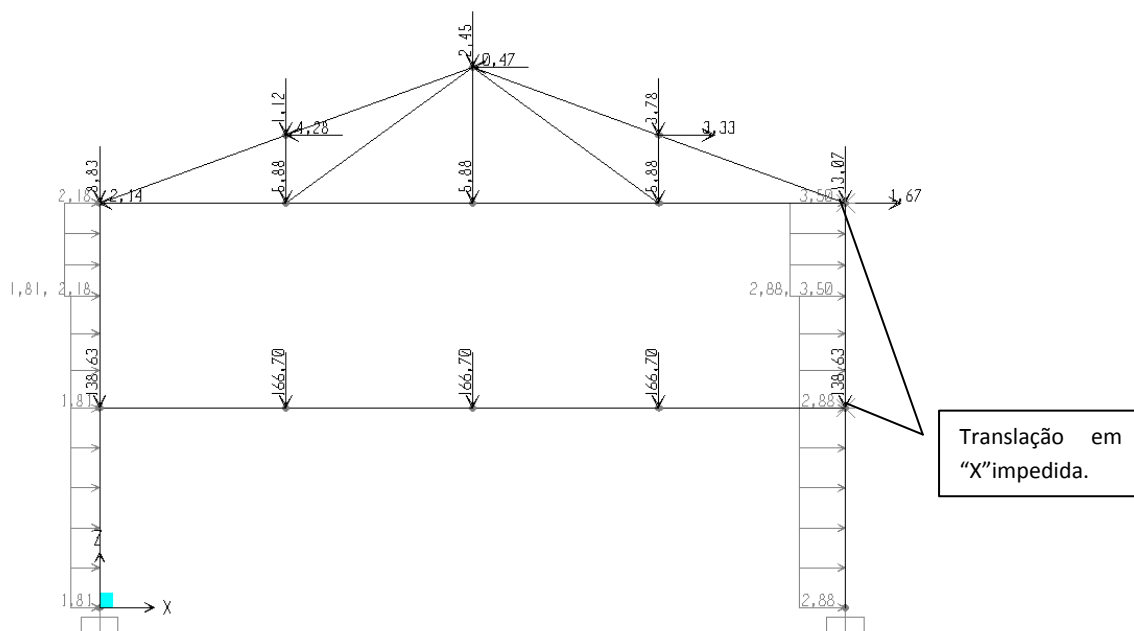


Figura 5.1 – Carregamentos e restrições

As reações horizontais que serão utilizadas na etapa lt da análise estrutural são obtidas através de uma análise linear elástica:

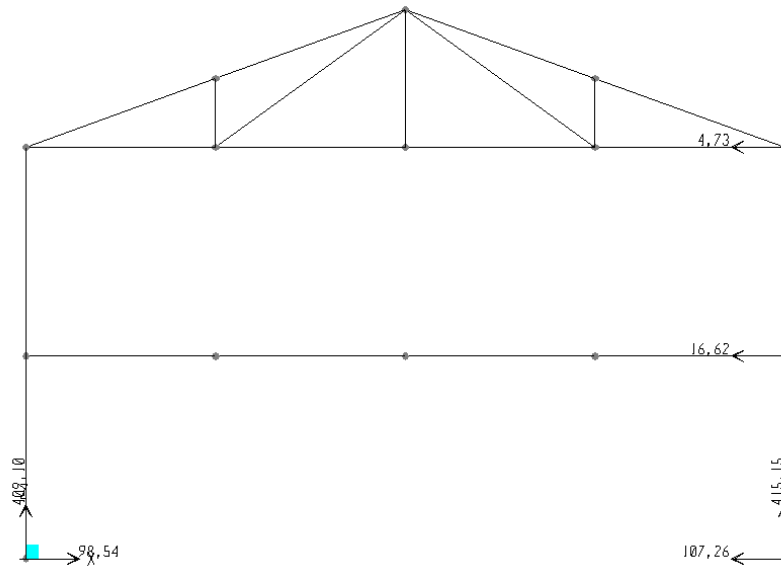
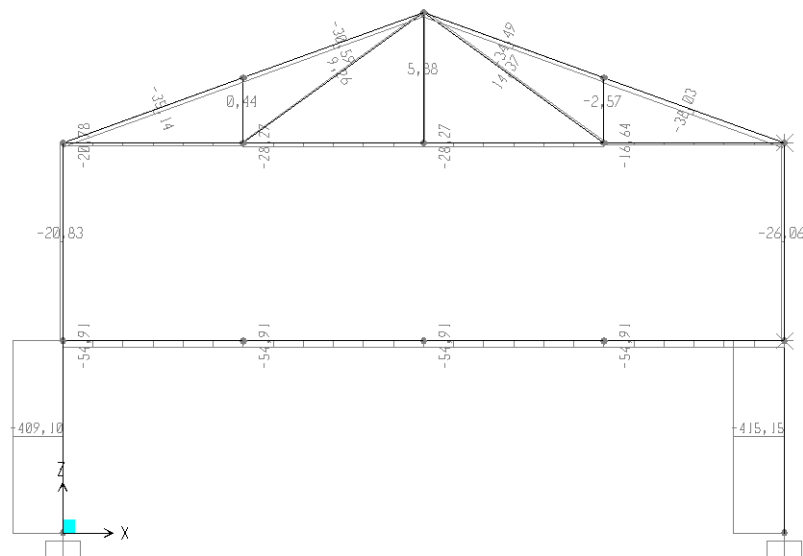


Figura 5.2 – Reações da etapa nt – (kN)

A seguir são mostrados os diagramas de esforços solicitantes para a etapa nt :



“+” = tração “-” = Compressão

Figura 5.3 – Diagrama de força axial (kN)

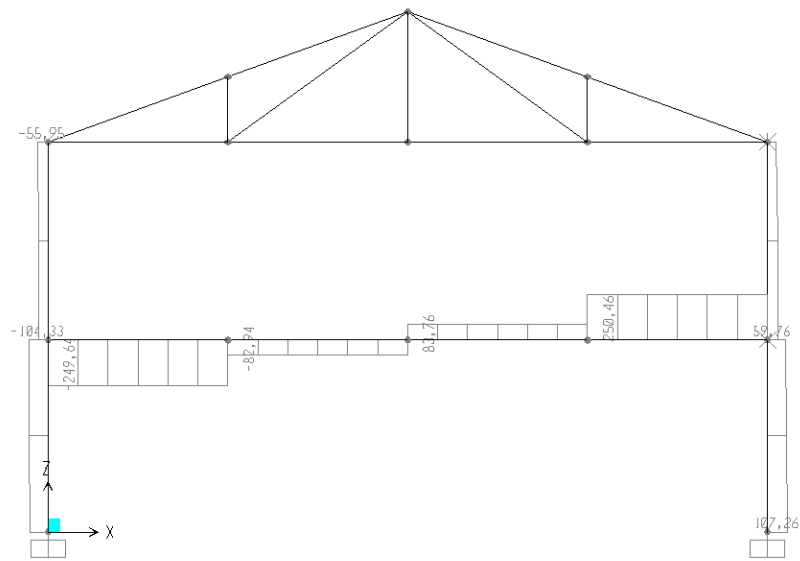


Figura 5.4 – Diagrama de força cortante (kN)

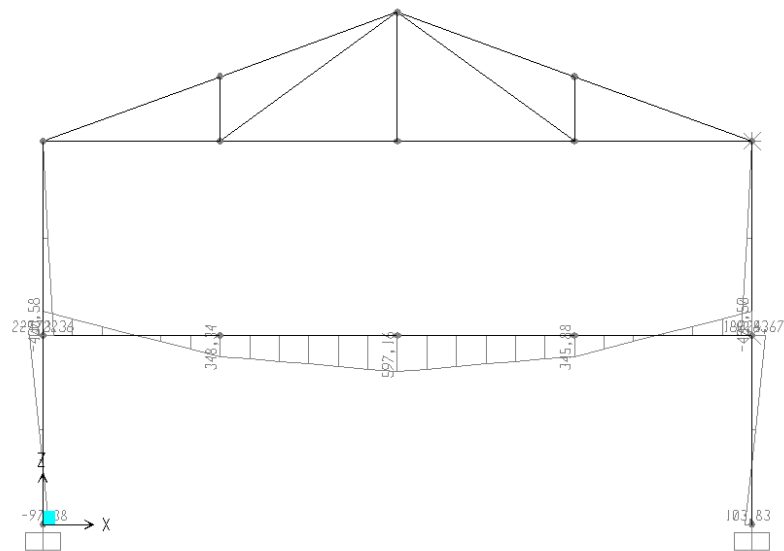


Figura 5.5 – Diagrama de momento fletor – (kN.m)

- Estrutura lt:

Nesta etapa, as reações horizontais obtidas na etapa *nt* são aplicadas ao pórtico. A figura 5.6 ilustra a aplicação do carregamento.

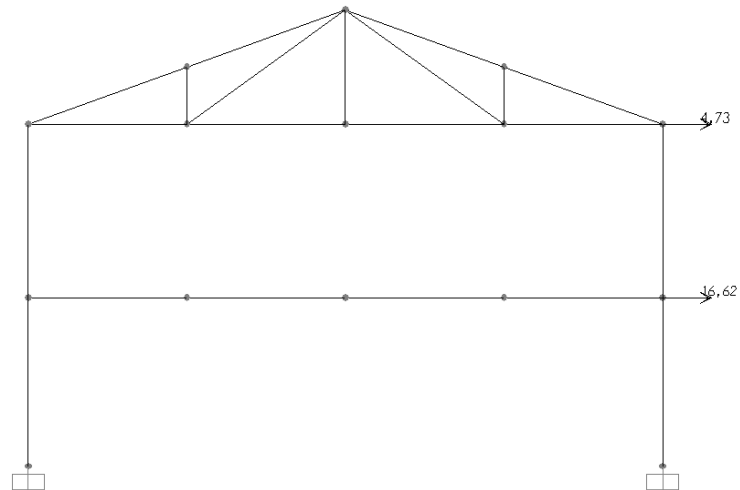


Figura 5.6 – Carregamento etapa *lt* – (kN)

A seguir são mostrados os diagramas de esforços solicitantes para a etapa *lt*:

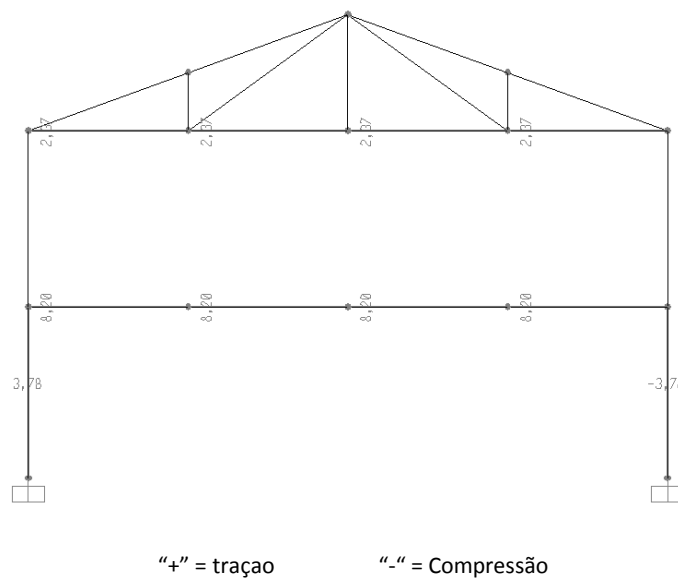


Figura 5.7 – Diagrama de força axial (kN)

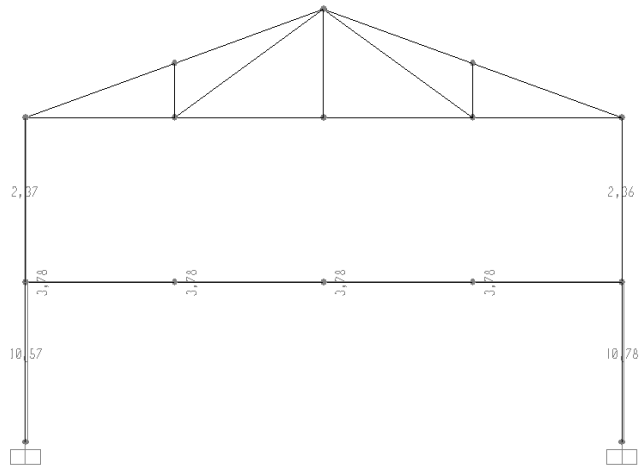


Figura 5.8 – Diagrama de Esforço cortante (kN)

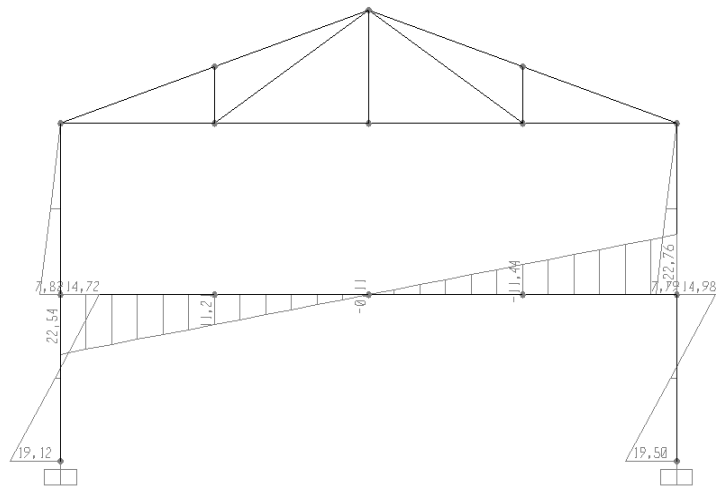


Figura 5.9 – Diagrama Momento Fletor (kN.m)

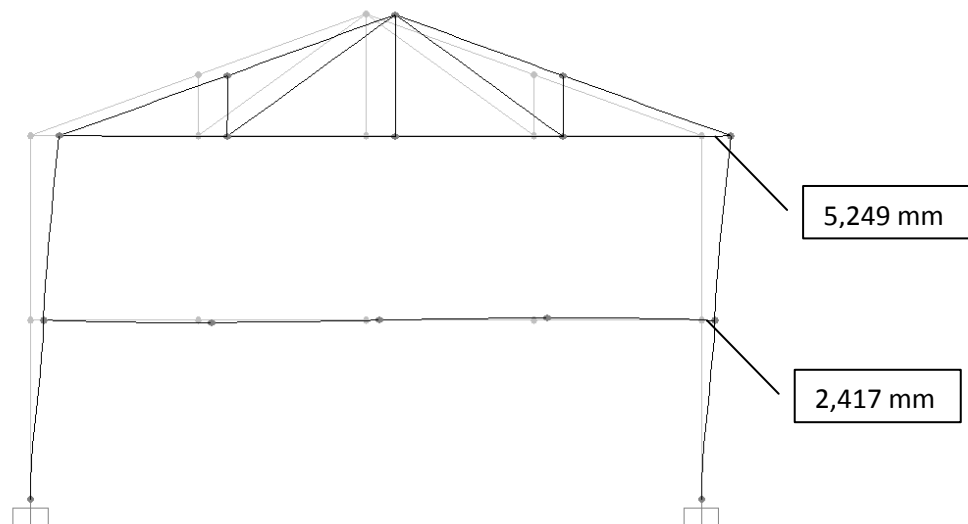


Figura 5.10 – Deslocamentos laterais (mm)

- Determinação dos coeficientes B_2 :

Tabela 5.1 – Determinação dos Coeficientes B_2

Andar i	Δ_i (cm)	$\Delta_h = \Delta_i - \Delta_{i-1}$ (cm)	H (cm)	ΣN_{sd} (kN)	ΣH_{sd} (kN)	$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_s} \cdot \frac{\Delta_h}{h} \cdot \frac{\Sigma N_{sd}}{\Sigma H_{sd}}}$
1	0,2417	$0,2417 - 0 = 0,2417$	320	777,36	4,73	1,171
2	0,5249	$0,5249 - 0,2417 = 0,2832$	330	46,89	21,35	1,002

Como o maior coeficiente B_2 é inferior a 1,55, a estrutura é de média deslocabilidade e o procedimento utilizado para a análise estrutural é válido.

- Determinação dos coeficientes B_1 :

Tabela 5.2 – Determinação dos Coeficientes B_1

Barra	C_m	$N_{sd1} = N_{nt} + N_{it}$ (kN)	$N_e = \frac{\pi^2 x EI}{L^2}$ (kN)	$B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{N_{sd1}}{N_e}}$
1	1,0	-409,10 + 3,78 = -405,32	$N_e = \frac{\pi^2 x 16000 x 1.733}{320^2} = 18.094$	$B_1 = \frac{1,0}{1 - \frac{405,32}{18.094}} = 1,022$
2	1,0	-415,15 - 3,78 = - 411,37	$N_e = \frac{\pi^2 x 16000 x 1.733}{320^2} = 18.094$	$B_1 = \frac{1,0}{1 - \frac{411,37}{18.094}} = 1,023$
3	1,0	-20,83	$N_e = \frac{\pi^2 x 16000 x 1.733}{320^2} = 18.094$	$B_1 = \frac{1,0}{1 - \frac{20,83}{18.094}} = 1,001$
4	1,0	-26,06	$N_e = \frac{\pi^2 x 16000 x 1.733}{320^2} = 18.094$	$B_1 = \frac{1,0}{1 - \frac{26,06}{18.094}} = 1,001$
Viga do 2º pavimento	1,0	-54,91 + 8,2 = -46,71	$N_e = \frac{\pi^2 x 16000 x 77.400,5}{1200^2} = 8.487,95$	$B_1 = \frac{1,0}{1 - \frac{46,71}{8.487,95}} = 1,006$
9		0,6	$N_e = \frac{\pi^2 x 16000 x 123,34}{300^2} = 216,41$	$B_1 = \frac{0,6}{1 - \frac{18,41}{216,41}} = 0,66 \rightarrow 1,0$
10		0,6	$N_e = \frac{\pi^2 x 16000 x 123,34}{300^2} = 216,41$	$B_1 = \frac{0,6}{1 - \frac{25,9}{216,41}} = 0,68 \rightarrow 1,0$
11		0,6	$N_e = \frac{\pi^2 x 16000 x 123,34}{300^2} = 216,41$	$B_1 = \frac{0,6}{1 - \frac{25,9}{216,41}} = 0,68 \rightarrow 1,0$

Tabela 5.2 – Determinação dos Coeficientes B_1 - Continuação

12		0,6	$N_e = \frac{\pi^2 \times 16000 \times 123,34}{300^2} = 216,41$	$B_1 = \frac{0,6}{1 - \frac{14,27}{216,41}} = 0,64 \rightarrow 1,0$
13		0,6	$N_e = \frac{\pi^2 \times 16000 \times 123,34}{300^2} = 216,41$	$B_1 = \frac{0,6}{1 - \frac{35,14}{216,41}} = 0,72 \rightarrow 1,0$
14		0,6	$N_e = \frac{\pi^2 \times 16000 \times 123,34}{300^2} = 216,41$	$B_1 = \frac{0,6}{1 - \frac{30,59}{216,41}} = 0,70 \rightarrow 1,0$
15		0,6	$N_e = \frac{\pi^2 \times 16000 \times 123,34}{300^2} = 216,41$	$B_1 = \frac{0,6}{1 - \frac{34,49}{216,41}} = 0,71 \rightarrow 1,0$
16		0,6	$N_e = \frac{\pi^2 \times 16000 \times 123,34}{300^2} = 216,41$	$B_1 = \frac{0,6}{1 - \frac{38,03}{216,41}} = 0,73 \rightarrow 1,0$
17		1,0	Barra tracionada	1,0
18		1,0	Barra tracionada	1,0
19		1,0	Barra tracionada	1,0
20		1,0	Barra tracionada	1,0
21		0,6	$N_e = \frac{\pi^2 \times 16000 \times 32,28}{109^2} = 429,04$	$B_1 = \frac{0,6}{1 - \frac{2,57}{429,04}} = 0,60 \rightarrow 1,0$

A seguir calculam-se os esforços solicitantes de cálculo, utilizando-se os coeficientes B_1 e B_2 obtidos anteriormente.

Tabela 5.3 – Esforços solicitantes de cálculo

Barra	$N_{sd} = N_{nt} + B_2 \times N_{lt}$ (kN)	$V_{sd} = V_{nt} + V_{lt}$ (kN)	$M_{sd} = B_1 \times M_{nt} + B_2 \times M_{lt}$ (kN.m)
1	$-409,10 + 1,171 \times 3,78 = -404,67$	$-104,33 + 10,57 = -93,76$	$1,022 \times 227,22 + 1,171 \times -14,72 = 214,98$
2	$-415,15 - 1,171 \times 3,78 = -419,58$	$-107,26 + 10,78 = -96,48$	$1,023 \times 224,67 + 1,171 \times -14,98 = 212,30$
3	-20,83	$-55,95 + 2,37 = -53,58$	$1,001 \times -53,86 + 1,002 \times -6,8 = -60,73$
4	-26,06	$-59,76 + 2,36 = -57,4$	$1,001 \times 180,83 + 1,002 \times 7,78 = 188,81$
5	$-54,91 + 1,171 \times 8,2 = -45,31$	$-249,64 + 3,78 = -245,86$	$1,006 \times -400,58 + 1,171 \times 22,54 = -376,59$
6	$-54,91 + 1,171 \times 8,2 = -45,31$	$-82,94 + 3,78 = -79,16$	$1,006 \times 597,16 + 1,171 \times -0,11 = 600,61$
7	$-54,91 + 1,171 \times 8,2 = -45,31$	$83,76 + 3,78 = 87,54$	$1,006 \times 597,16 + 1,171 \times -0,11 = 600,61$
8	$-54,91 + 1,171 \times 8,2 = -45,31$	$250,46 + 3,78 = 254,24$	$1,006 \times -405,50 + 1,171 \times -22,76 = -434,58$
9	$-20,78 + 2,37 = -18,41$	0	0
10	$-28,27 + 2,37 = -25,9$	0	0
11	$-28,27 + 2,37 = -25,9$	0	0
12	$-16,64 + 2,37 = -14,27$	0	0
13	-35,14	0	0
14	-30,59	0	0
15	-34,49	0	0
16	-38,03	0	0
17	0,44	0	0
18	9,26	0	0
19	5,88	0	0
20	14,37	0	0
21	-2,57	0	0

7) VERIFICAÇÃO DAS BARRAS TRACIONADAS

Neste item é realizada a verificação das barras tracionadas. Será verificada a barra de número 20, pois, esta é a barra tracionada que possui a maior solicitação e o maior comprimento.

- **Aço Estrutural:**

ASTM A36 ($f_y = 250 \text{ Mpa}$; $f_u = 400 \text{ Mpa}$)

- **Força solicitante de cálculo:**

$$N_{t,Sd} = 14,37 \text{ kN}$$

- **Escoamento da seção bruta:**

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{1,1} = \frac{11,6 \cdot \text{cm}^2 \cdot 250 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,1} = 263,63 \cdot \text{kN} \geq N_{t,Sd}$$

- **Ruptura da seção líquida:**

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{l_c} = 1 - \frac{1,75, \text{cm}}{17,5} = 0,9$$

$$A_e = A_g \cdot C_t = 11,6 \cdot \text{cm}^2 \cdot 0,9 = 10,44 \cdot \text{cm}^2$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e \cdot f_u}{1,35} = \frac{10,44 \cdot \text{cm}^2 \cdot 400 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,35} = 309,33 \cdot \text{kN} \geq N_{t,Sd}$$

- **Eslbeltez:**

$$\lambda_{\max} = \frac{L}{r_{\min}} = \frac{370,8 \cdot \text{cm}}{1,98 \cdot \text{cm}} = 187 \leq 300 \dots \dots \dots \text{OK!}$$

- **Chapas espaçadoras:**

$$\lambda_{\max} = \frac{L}{r_{\min-\text{cantoneira}}} \leq 300 \rightarrow L \leq 300 \cdot 1,24 \cdot \text{cm} = 372 \cdot \text{cm} \leq 370 \cdot \text{cm}$$

Não há necessidade de chapas espaçadoras. Utilizar uma no centro do vão.

8) VERIFICAÇÃO DAS BARRAS COMPRIMIDAS

Neste item é realizada a verificação das barras comprimidas. Serão verificadas as barras de número 16 e 21, pois, estas representam respectivamente, os banzos e diagonais mais solicitados.

- **Verificação da barra 16:**

- **Aço Estrutural:**

ASTM A36 ($f_y = 250 \text{ Mpa}$; $f_u = 400 \text{ Mpa}$)

- **Propriedades geométricas do perfil 2L 76,2 x 6,35:**

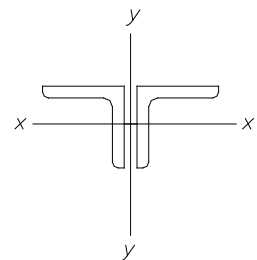
Área bruta: $2 \times 9,29 \text{ cm}^2 = 18,58 \text{ cm}^2$

$I_x = 2 \times 50 \text{ cm}^4 = 100 \text{ cm}^4$

$I_y = 2x[50 \cdot \text{cm}^4 + 9,29 \cdot \text{cm}^2 \cdot (2,13 \cdot \text{cm} + \frac{0,63 \cdot \text{cm}}{2})] = 145,43 \cdot \text{cm}^4$

Raio de giração (r_x) = 2,36 cm

Raio de giração (r_y) = $\sqrt{\frac{145,43 \cdot \text{cm}^4}{18,58 \cdot \text{cm}^2}} = 2,80 \cdot \text{cm}$



- **Força solicitante de cálculo:**

$$N_{c,sd} = -38,03 \text{ kN}$$

- **Flambagem local:**

$$\frac{b}{t} = \frac{76,2 \text{ cm}}{6,35 \text{ cm}} = 12$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = 0,45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,45 \cdot \sqrt{\frac{20000 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}} = 12,73$$

$$\frac{b}{t} < \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} \rightarrow Q_s = Q = 1,0$$

- **Flambagem global:**

- Força de flambagem por flexão e esbeltez em relação ao eixo "X":

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k \cdot L)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 100 \text{ cm}^4}{(319,19)^2} = 193,75 \text{ kN}$$

$$\lambda_x = \frac{K \cdot L_x}{r_x} = \frac{319,19 \text{ cm}}{2,36 \text{ cm}} = 135,25 < 200 \dots \dots \dots \text{OK!}$$

- Força de flambagem por flexão-torção em relação ao eixo "y" e esbeltez correspondente.

$$N_{eyz} = \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2 \cdot \left[1 - \left(\frac{y_0}{r_0}\right)^2\right]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ey} \cdot N_{ez} \cdot \left[1 - \left(\frac{y_0}{r_0}\right)^2\right]}{(N_{ey} + N_{ez})^2}}\right]$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k \cdot L)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 145,43 \text{ cm}^4}{(319,19)^2} = 281,77 \text{ kN}$$

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

$$C_w = 0$$

$$J = 1/3 \times 2 \times (7,62 \text{ cm} \times (0,635 \text{ cm})^3 + (7,62 \text{ cm} - 0,635 \text{ cm}) \times (0,635 \text{ cm})^3) = 2,49 \text{ cm}^4$$

$$r_0 = (2,36^2 + 2,8^2 + 0 + 2,043^2)^{1/2} = 4,19 \text{ cm}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{4,19^2} \cdot [0 + 7700 \frac{kN}{cm^2} \cdot 2,49 \text{ cm}^4] = 1092 \text{ kN}$$

$$N_{eyz} = \frac{281,77 + 1092}{2 \cdot [1 - (\frac{2,043}{4,19})^2]} \cdot [1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 281,77 \cdot 1092 \cdot [1 - (\frac{2,043}{4,19})^2]}{(281,77 + 1092)^2}}] = 262 \text{ kN}$$

$$\lambda_{yz} = \pi \sqrt{\frac{E \cdot A_g}{N_{eyz}}} = \pi \sqrt{\frac{20000 \cdot 18,58}{259}} = 37,87 < 200 \dots \dots \dots \text{OK!}$$

- Valores de N_e , λ_0 , e χ :

$$N_e = N_{ex} = 193,75 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{1,0 \cdot 18,58 \cdot 25}{193,75}} = 1,5 \rightarrow \chi = 0,365$$

▪ **Força axial de compressão resistente de cálculo:**

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,365 \cdot 1,0 \cdot 18,58 \cdot 25}{1,1} = 154,12 \text{ kN} > N_{c,Sd} \dots \dots \dots \text{OK!}$$

▪ **Chapas espaçadoras:**

$$\lambda_{\max} = \frac{l}{r_{\min-\text{cantoneira}}} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{r} \rightarrow l \leq \frac{1}{2} \cdot 135,25 \cdot 1,5 = 101,44 \text{ cm}$$

Usar 3 chapas espaçadoras com distância de 80 cm entre si.

- **Verificação da barra 21**

- **Aço Estrutural:**

ASTM A36 ($f_y = 250 \text{ Mpa}$; $f_u = 400 \text{ Mpa}$)

- **Propriedades geométricas do perfil 2L 63,5 x 4,76:**

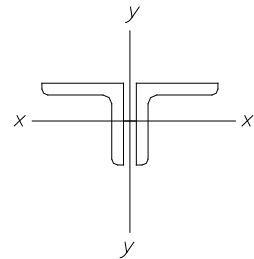
Área bruta: $2 \times 5,80 \text{ cm}^2 = 11,60 \text{ cm}^2$

$I_x = 2 \times 23 \text{ cm}^4 = 46 \text{ cm}^4$

$$I_y = 2x[23.\text{cm}^4 + 5,8.\text{cm}^2.(1,75.\text{cm} + \frac{0,63.\text{cm}}{2})] = 69,95.\text{cm}^4$$

Raio de giração (r_x) = 1,98 cm

$$\text{Raio de giração } (r_y) = \sqrt{\frac{69,95.\text{cm}^4}{11,60.\text{cm}^2}} = 2,46.\text{cm}$$



- **Força solicitante de cálculo:**

$$N_{c,Sd} = -2,57 \text{ kN}$$

- **Flambagem local:**

$$\frac{b}{t} = \frac{63,5.\text{cm}}{4,76.\text{cm}} = 13,34$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = 0,45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,45 \cdot \sqrt{\frac{20000 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}} = 12,73$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{sup.}} = 0,91 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,91 \cdot \sqrt{\frac{20000 \cdot \frac{kN}{cm^2}}{25 \cdot \frac{kN}{cm^2}}} = 25,74$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} < \frac{b}{t} \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{sup}}$$

$$Q_s = Q = 1,340 - 0,76 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = 1,340 - 0,76 \cdot 13,34 \cdot \sqrt{\frac{25 \cdot \frac{kN}{cm^2}}{20000 \cdot \frac{kN}{cm^2}}} = 0,98$$

▪ **Flambagem global:**

- Força de flambagem por flexão e esbeltez em relação ao eixo "X":

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k \cdot L)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 46 \cdot cm^4}{(109)^2} = 764,25 \cdot kN$$

$$\lambda_x = \frac{K \cdot L_x}{r_x} = \frac{109 \cdot cm}{1,98 \cdot cm} = 55 < 200 \dots \dots \dots \text{OK!}$$

- Força de flambagem por flexão-torção em relação ao eixo "y" e esbeltez correspondente.

$$N_{eyz} = \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2 \cdot [1 - (\frac{y_0}{r_0})^2]} \cdot [1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ey} \cdot N_{ez} \cdot [1 - (\frac{y_0}{r_0})^2]}{(N_{ey} + N_{ez})^2}}]$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k \cdot L)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 69,95 \cdot cm^4}{(109)^2} = 1162 \cdot kN$$

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

$$C_w = 0$$

$$J = 1/3 \times 2 \times (6,35 \text{ cm} \times (0,476 \text{ cm})^3 + (6,35 \text{ cm} - 0,476 \text{ cm}) \times (0,476 \text{ cm})^3) = 2,32 \text{ cm}^4$$

$$r_0 = (1,98^2 + 2,46^2 + 0 + 1,512^2)^{1/2} = 3,5 \text{ cm}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{3,5^2} \cdot [0 + 7700 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 2,32 \cdot \text{cm}^4] = 1458 \cdot \text{kN}$$

$$N_{eyz} = \frac{1162 + 1458}{2 \cdot [1 - (\frac{1,512}{3,5})^2]} \cdot [1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 1162 \cdot 1458 \cdot [1 - (\frac{1,512}{3,5})^2]}{(1162 + 1458)^2}}] = 3903 \text{ kN}$$

$$\lambda_{yz} = \pi \sqrt{\frac{E \cdot A_g}{N_{eyz}}} = \pi \sqrt{\frac{20000 \cdot 11,6}{3903}} = 7,7 < 200 \dots \dots \dots \text{OK!}$$

- Valores de N_e , λ_0 , e χ :

$$N_e = N_{ex} = 764,25 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{0,98 \cdot 11,6 \cdot 25}{764,25}} = 0,6 \rightarrow \chi = 0,86$$

▪ **Força axial de compressão resistente de cálculo:**

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,86 \cdot 0,98 \cdot 11,6 \cdot 25}{1,1} = 222,2 \cdot \text{kN} > N_{c,Sd} \dots \dots \dots \text{OK!}$$

▪ **Chapas espaçadoras:**

$$\lambda_{\max} = \frac{l}{r_{\min-\text{cantoneira}}} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{r} \rightarrow l \leq \frac{1}{2} \cdot 55 \cdot 1,24 = 34 \cdot \text{cm}$$

Usar 3 chapas espaçadoras com distância de 35 cm entre si.

9) VERIFICAÇÃO DA VIGA DOS PÓRTICOS INTERNOS

▪ Propriedades do perfil VS 600x95

$$- \text{Área } (A_g) = 121 \text{ cm}^2$$

$$- W_x = 2580 \text{ cm}^3$$

$$- r_x = 25,29 \text{ cm}$$

$$- Z_x = 2864 \text{ cm}^3$$

$$- W_y = 375 \text{ cm}^3$$

$$- r_y = 6,82 \text{ cm}$$

$$- Z_y = 572 \text{ cm}^3$$

$$- J = 49,1 \text{ cm}^4$$

$$- C_w = 4853760 \text{ cm}^6$$

▪ Verificação da flambagem local

- FLM:

$$\lambda = \frac{150}{12,5} = 12$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{20000}{30}} = 9,81$$

$$\lambda_r = 0,95 \cdot \sqrt{\frac{k_c \cdot E}{0,7 \cdot f_y}} = 0,95 \cdot \sqrt{\frac{0,47 \cdot 20000}{0,7 \cdot 30}} = 20$$

$$\lambda_r > \lambda > \lambda_p$$

$$M_{rk} = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y = 2864 \cdot 30 = 85920 \text{ kN.cm}$$

$$M_r = W_x \cdot 0,7 \cdot f_y = 2580 \cdot 0,7 \cdot 30 = 54180 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rk} = 85920 - (85920 - 54180) \frac{12 - 9,81}{20 - 9,81} = 79099.kN.cm$$

- FLA:

$$\lambda = \frac{575}{8} = 71,9$$

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 97$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$M_{rk} = M_{pl}$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y = 2864 \cdot 30 = 85920.kN.cm$$

- FLT:

$$\lambda = \frac{L}{r_y} = \frac{1200}{6,82} = 176$$

$$\lambda_p = 1,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 45,4$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta_1} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2}{I_y}}}$$

$$\beta_1 = \frac{0,7 \cdot f_y \cdot W_x}{E \cdot J} = \frac{0,7 \cdot 30 \cdot 2580}{20000 \cdot 49,1} = 0,055$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{5627 \cdot 49,1}}{6,82 \cdot 49,1 \cdot 0,055} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 4853760 \cdot 0,055^2}{5627}}} = 121$$

$$\lambda > \lambda_r$$

$$C_b = 3,00 - \frac{M_1}{M_0} - \frac{8}{3} \cdot \frac{M_2}{(M_0 + M_1)} = 3,00 - \frac{-376,59}{-434,58} - \frac{8}{3} \cdot \frac{600,61}{(-434,58 - 376,59)} = 5,84$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_b^2} \cdot \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \cdot (1 + 0,039 \cdot \frac{J \cdot L_b^2}{C_w})}$$

$$M_{cr} = \frac{5,84 \cdot \pi^2 \cdot 20000 \cdot 5627}{1200^2} \cdot \sqrt{\frac{4853760}{5627} \cdot (1 + 0,039 \cdot \frac{49,1 \cdot 1200^2}{4853760})}$$

$$M_{cr} = 165771 \text{ kN.cm} < M_{pl}$$

▪ **Momento resistente:**

$$M_{Rd} = M_{rk} / 1,1 = 79099 \text{ kN.cm} / 1,1 = \mathbf{71908 \text{ kN.cm}} < (1,5 \cdot W_x \cdot f_y = 116100 \text{ kN.cm})$$

▪ **Verificação à força cortante:**

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{575}{8} = 71,9$$

$$\lambda_p = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{5,0 \cdot 20000}{30}} = 63,5$$

$$\lambda_r = 1,37 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 1,37 \cdot \sqrt{\frac{5,0 \cdot 20000}{30}} = 79$$

$$\lambda_r > \lambda > \lambda_p$$

$$V_{rk} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot V_{pl} = \frac{63,5}{71,9} \cdot 0,6 \cdot A_w \cdot f_y = 731 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = V_{rk} / 1,1 = 731 / 1,1 = 665 \text{ kN} > V_{sd} \dots\dots\dots \text{OK!}$$

OBS: Esta verificação desconsidera a força de compressão atuante na viga.

▪ **Estado limite de serviço:**

- Combinação:

$$74,97 \text{ kN} + 0,4 \times 63 \text{ kN} = 100,17 \text{ kN nos pontos 4,5 e 6}$$

$$\delta = 3,7 \text{ cm (Obtido através do software)} = L/324 > L/350$$

Dar contra-flecha de 27cm (Flecha devido ao peso próprio)

10) VERIFICAÇÃO DAS VIGAS V1 e V2

- VIGA V1:

- Cargas atuantes:

- Vigamento metálico + Revestimento + Forro + Laje = $3,57 \text{ kN/m}^2 \times 1,5 = 5,36 \text{ kN/m}$

- Sobrecarga: $3,0 \text{ kN/m}^2 \times 1,5 = 4,5 \text{ kN/m}$

- Combinação:

$$1,4 \times 5,36 \text{ kN/m} + 1,4 \times 4,5 \text{ kN/m} = 13,62 \text{ kN/m}$$

- Esforços atuantes:

$$M_{sd} = \frac{q.l^2}{8} = \frac{0,1362.700^2}{8} = 8342 \text{ kN.cm}$$

$$V_{sd} = \frac{13,62.7}{2} = 47,7 \text{ kN}$$

▪ Propriedades do perfil W 310x32,7

- Área (A_g) = $42,1 \text{ cm}^2$

- $W_x = 419,8 \text{ cm}^3$

- $Z_x = 485,3 \text{ cm}^3$

▪ Verificação da flambagem local

- FLM:

$$\lambda = 4,7$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 9,15$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y = 485,3 \cdot 34,5 = 16742 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rk} = M_{pl} = 16742 \text{ kN.cm}$$

- FLA:

$$\lambda = 41$$

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 90,5$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$M_{rk} = M_{pl}$$

$$M_{rk} = M_{pl} = 16742 \text{ kN.cm}$$

- FLT:

Não aplicável: $L_b = 0$

▪ **Momento resistente:**

$$M_{Rd} = M_{rk} / 1,1 = 16742 \text{ kN.cm} / 1,1 = \mathbf{15220 \text{ kN.cm}} < (1,5 \cdot W_x \cdot f_y = 21724 \text{ kN.cm}) > M_{sd} \dots \text{OK!}$$

▪ **Verificação à força cortante:**

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{271}{6,6} = 41$$

$$\lambda_p = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{5,0 \cdot 200000}{34,5}} = 59,22$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$V_{rk} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot V_{pl} = \frac{59,22}{41} \cdot 0,6 \cdot A_w \cdot f_y = 535 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = V_{rk} / 1,1 = 535 / 1,1 = 486 \text{ kN} > V_{sd} \dots\dots\dots \text{OK!}$$

▪ **Estado limite de serviço:**

- Combinação:

$$5,36 \text{ kN/m} + 0,4 \times 4,5 \text{ kN/m} = 7,16 \text{ kN/m}$$

$$\delta = \frac{5,0 \cdot 0,716 \cdot 700^4}{384 \cdot 200000 \cdot 6570} = 1,7 \text{ cm} = L/411 > L/350 \dots\dots\dots \text{OK!}$$

- **VIGA V2:**

- Cargas atuantes:

- Vigamento metálico + Revestimento + Forro + Laje = $3,57 \text{ kN/m}^2 \times 3 = 10,72 \text{ kN/m}$

- Sobrecarga: $3,0 \text{ kN/m}^2 \times 3,0 = 9,0 \text{ kN/m}$

- Combinação:

$$1,4 \times 10,72 \text{ kN/m} + 1,4 \times 9,0 \text{ kN/m} = 27,61 \text{ kN/m}$$

- Esforços atuantes:

$$M_{sd} = \frac{q.l^2}{8} = \frac{0,2761.700^2}{8} = 16911 \text{ kN.cm}$$

$$V_{sd} = \frac{27,61.7}{2} = 96,6 \text{ kN}$$

▪ **Propriedades do perfil W 360x64**

- Área (A_g) = $81,7 \text{ cm}^2$

- $W_x = 1031,1 \text{ cm}^3$

- $r_x = 14,8 \text{ cm}$

- $Z_x = 1145,5 \text{ cm}^3$

▪ **Verificação da flambagem local**

- **FLM:**

$$\lambda = 7,5$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 9,15$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y = 1145,5 \cdot 34,5 = 39520 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rk} = M_{pl} = 39520 \text{ kN.cm}$$

- FLA:

$$\lambda = \frac{575}{8} = 37,4$$

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 90,5$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$M_{rk} = M_{pl}$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y = 1145,5 \cdot 34,5 = 39520 \text{ kN.cm}$$

- FLT:

Não aplicável: $L_b = 0$

▪ **Momento resistente:**

$$M_{Rd} = M_{rk} / 1,1 = 39520 \text{ kN.cm} / 1,1 = \mathbf{35927 \text{ kN.cm}} < (1,5 \cdot W_x \cdot f_y = 53359 \text{ kN.cm}) > M_{sd} \dots \text{ OK!}$$

▪ **Verificação à força cortante:**

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{288}{7,7} = 37,4$$

$$\lambda_p = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{5,0 \cdot 200000}{34,5}} = 59,22$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$V_{rk} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot V_{pl} = \frac{59,22}{37,4} \cdot 0,6 \cdot A_w \cdot f_y = 727 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = V_{rk} / 1,1 = 731 / 1,1 = 660 \text{ kN} > V_{sd} \dots\dots\dots \text{OK!}$$

▪ **Estado limite de serviço:**

- Combinação:

$$10,72 \text{ kN/m} + 0,4 \times 9,0 \text{ kN/m} = 14,32 \text{ kN/m}$$

$$\delta = \frac{5,0 \cdot 1432 \cdot 700^4}{384 \cdot 200000 \cdot 17890} = 1,25 \text{ cm} = L/560 > L/350 \dots\dots\dots \text{OK!}$$

11) VERIFICAÇÃO DAS COLUNAS DOS PÓRTICOS INTERNOS

▪ Propriedades do perfil H 310x79

- Área (A_g) = 100 cm²

- $W_x = 1091,3$ cm³

- $r_x = 12,77$ cm

- $Z_x = 1210,1$ cm³

- $W_y = 343,7$ cm³

- $r_y = 7,25$ cm

- $J = 46,72$ cm⁴

- $C_w = 1089258$ cm⁶

Momento fletor resistente de cálculo

▪ Verificação da flambagem local

- FLM:

$$\lambda = \frac{153}{11} = 13,9$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 9,15$$

$$\lambda_r = 0,83 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,83 \cdot \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 20$$

$$\lambda_r > \lambda > \lambda_p$$

$$M_{rk} = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y = 1210,1 \cdot 34,5 = 41748 \text{ kN.cm}$$

$$M_r = W_x \cdot 0,7 \cdot f_y = 1091,3 \cdot 0,7 \cdot 34,5 = 26355 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rk} = 41748 - (41748 - 26355) \frac{13,9 - 9,15}{20 - 9,15} = 35009 \text{ kN.cm}$$

- FLA:

$$\lambda = \frac{277}{11} = 25,2$$

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 90,5$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$M_{rk} = M_{pl}$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y = 1210,1 \cdot 34,5 = 41748 \text{ kN.cm}$$

- FLT:

$$\lambda = \frac{L}{r_y} = \frac{320}{7,25} = 44$$

$$\lambda_p = 1,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 42,4$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta_1} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2}{I_y}}}$$

$$\beta_1 = \frac{0,7 \cdot f_y \cdot W_x}{E \cdot J} = \frac{0,7 \cdot 34,5 \cdot 1091,3}{20000 \cdot 46,72} = 0,028$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{5258 \cdot 46,72}}{7,25 \cdot 46,72 \cdot 0,028} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 1089258 \cdot 0,028^2}{5258}}} = 131,4$$

$$\lambda_r > \lambda > \lambda_p$$

$$C_b = \frac{12,5.M_{\max}}{2,5.M_{\max} + 3.M_A + 4.M_B + 3.M_C} \leq 3,0$$

$$C_b = \frac{12,5.214,98}{2,5.214,98 + 3.145 + 4.62,6 + 3.17,4} = 2,1 \leq 3,0$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_b^2} \cdot \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \cdot \left(1 + 0,039 \cdot \frac{J \cdot L_b^2}{C_w}\right)}$$

$$M_{cr} = \frac{2,1 \cdot \pi^2 \cdot 20000 \cdot 5258}{320^2} \cdot \sqrt{\frac{1089258}{5258} \cdot \left(1 + 0,039 \cdot \frac{46,72 \cdot 320^2}{1089258}\right)}$$

$$M_{cr} = 331220 \text{ kN.cm}$$

▪ **Momento resistente:**

$$M_{Rd} = M_{rk} / 1,1 = 35009 \text{ kN.cm} / 1,1 = \mathbf{31826 \text{ kN.cm}} < (1,5 \cdot W_x \cdot f_y = 56745 \text{ kN.cm})$$

FORÇA AXIAL RESISTENTE DE CÁLCULO

- FLM:

$$\lambda = \frac{153}{11} = 13,9$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = 0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,56 \cdot \sqrt{\frac{20000 \cdot \frac{kN}{cm^2}}{34,5 \cdot \frac{kN}{cm^2}}} = 13,48$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{sup.}} = 1,03 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,03 \cdot \sqrt{\frac{20000 \cdot \frac{kN}{cm^2}}{34,5 \cdot \frac{kN}{cm^2}}} = 24,8$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} < \frac{b}{t} \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{sup}}$$

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = 1,415 - 0,74 \cdot 13,9 \cdot \sqrt{\frac{34,5 \cdot \frac{kN}{cm^2}}{20000 \cdot \frac{kN}{cm^2}}} = 0,99$$

- FLA:

$$\lambda = \frac{277}{11} = 25,2$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = 1,49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 \cdot \sqrt{\frac{20000 \cdot \frac{kN}{cm^2}}{34,5 \cdot \frac{kN}{cm^2}}} = 36$$

$$\frac{b}{t} < \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} \rightarrow Q_a = 1,0$$

$$Q = Q_a \cdot Q_s = 0,99$$

- Flambagem global:

- Força de flambagem por flexão e esbeltez em relação ao eixo "X":

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k \cdot L)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 16316 \cdot cm^4}{(320)^2} = 31420 \cdot kN$$

$$\lambda_x = \frac{K \cdot L_x}{r_x} = \frac{320 \cdot cm}{12,77 \cdot cm} = 25 < 200 \dots\dots\dots OK!$$

- Força de flambagem por flexão e esbeltez em relação ao eixo "Y":

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k \cdot L)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 5258 \cdot cm^4}{(320)^2} = 10125 \cdot kN$$

$$\lambda_y = \frac{K \cdot L_y}{r_y} = \frac{320 \cdot cm}{7,25 \cdot cm} = 44 < 200 \dots\dots\dots OK!$$

- Força de flambagem por torção pura:

Como o comprimento de flambagem por torção não é maior do que o comprimento de flambagem por flexão em torno da menor inércia, a primeira não ocorre.

- Valores de N_e , λ_0 , e χ :

$$N_e = N_{ey} = 10125 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{0,99 \cdot 100 \cdot 34,5}{10125}} = 0,58 \rightarrow \chi = 0,869$$

▪ **Força axial de compressão resistente de cálculo:**

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,869 \cdot 0,99 \cdot 100 \cdot 34,5}{1,1} = 2698 \cdot kN$$

▪ Esforços combinados:

$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} = \frac{419,58}{2698} = 0,16 < 0,2$$

$$\frac{N_{sd}}{2 \cdot N_{Rd}} + \left(\frac{M_{sd}}{M_{Rd}} \right) \leq 1,0$$

$$\frac{419,58}{2 \cdot 2698} + \left(\frac{21498}{31826} \right) = 0,753 \leq 1,0 \dots\dots\dots OK!$$

- **Verificação à força cortante:**

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{277}{11} = 71,9$$

$$\lambda_p = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{5,0 \cdot 200000}{34,5}} = 59,22$$

$$\lambda_r = 1,37 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 1,37 \cdot \sqrt{\frac{5,0 \cdot 200000}{34,5}} = 74$$

$$\lambda_r > \lambda > \lambda_p$$

$$V_{rk} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot V_{pl} = \frac{59,22}{71,9} \cdot 0,6 \cdot A_w \cdot f_y = 519 \text{ kN}$$

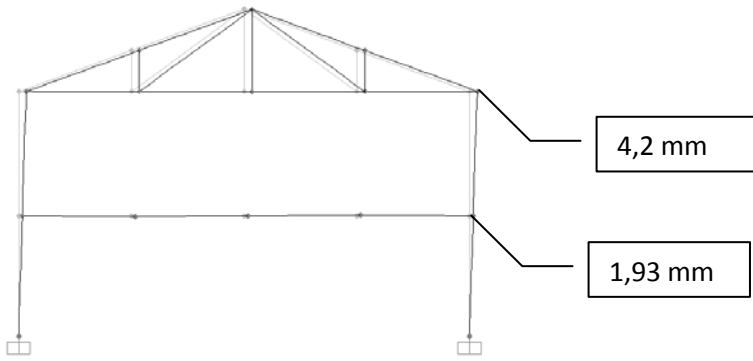
$$V_{Rd} = V_{rk} / 1,1 = 519 / 1,1 = 472 \text{ kN} > V_{sd} \dots\dots\dots\text{OK!}$$

- **Estado limite de serviço:**

Como a estrutura é de média deslocabilidade, os estados limites de serviço podem ser obtidos através de uma análise de primeira ordem, desconsiderando os efeitos das imperfeições geométricas e de material.

Deslocamento máximo (obtido através do software):

Combinações raras de serviço, com vento como carga variável principal:



1º andar: $\Delta = 1,93 \text{ mm} < h/500 (6,4 \text{ mm})$ OK!

2º andar: $\Delta = 4,2 - 1,93 = 2,27 \text{ mm} < h/500 (6,6 \text{ mm})$ OK!

12) CONCLUSÃO

Através do cálculo parcial do galpão apresentado, verifica-se a pouca praticidade em dimensionar estruturas de aço sem a ajuda de softwares, dada o aperfeiçoamento constante do conhecimento do comportamento dos elementos estruturais de aço e à busca cada vez maior das normas em simular de forma mais precisa a situação real da estrutura. Não obstante o conhecimento do projetista deve ser cada vez mais aprofundado, tendo em vista que a utilização indiscriminada de softwares sem o conhecimento técnico necessário pode resultar em estruturas quando não onerosas, inseguras.

13) NORMAS / REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 8800 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de aço e concreto de edifícios. Associação de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.2008.
- FAKURY, R. Dimensionamento básico de Elementos de Estruturas de Aço. Versão 3. 2009.