

BÁRBARA KELLY GONÇALVES BRAGA

PROJETO ESTRUTURAL DE GALPÃO METÁLICO SEGUNDO  
RECOMENDAÇÕES DA NBR8800

Guaratinguetá  
2016



BÁRBARA KELLY GONÇALVES BRAGA

PROJETO ESTRUTURAL DE GALPÃO METÁLICO SEGUNDO  
RECOMENDAÇÕES DA NBR8800

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Marcelo Sampaio Martins

Guaratinguetá  
2016

Braga, Bárbara Kelly Gonçalves  
Projeto estrutural de galpão metálico segundo recomendações da NBR8800 /  
B813 Bárbara Kelly Gonçalves Braga– Guaratinguetá, 2016.  
83 f : il.  
P Bibliografia: f. 66-67

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual  
Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins


1. Projeto estrutural 2. Projeto estrutural - Modelos matemáticos 3.  
Estruturas metálicas I. Título

CDU 624.04


**Bárbara Kelly Gonçalves Braga**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

  
Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS  
Orientador UNESP-FEG

  
Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI  
UNESP-FEG

  
Prof. Dr. JOSÉ GERALDO TRANI BRANDÃO  
UNESP-FEG

**Abril de 2016**

BRAGA, B. K. G. Projeto estrutural de galpão metálico segundo recomendações ABNT NBR8800:2008. 2016. 83 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

### **RESUMO**

Este trabalho aborda de forma geral o histórico e vantagens de construções em aço, assim como sua crescente utilização no Brasil no último século. Descreve de forma geral os tipos e diversas utilizações das estruturas metálicas. Também é mostrado o uso da norma ABNT NBR 8800:2008 e seus métodos de cálculo através do dimensionamento de materiais regulamentados no Brasil para um projeto de galpão industrial de pequeno porte e de pórtico simples em estrutura metálica. Atendendo os requisitos da construção inclui a influência de sua localização seguindo as indicações normativas da ABNT NBR 6123, para o dimensionamento da ação do vento, uma vez que esta ação, combinada com as cargas permanentes, deve ser avaliada devido às solicitações dos perfis quanto à atuação simultânea de força axial e de momentos fletores obedecendo as limitações aplicadas à estrutura segundo a ABNT NBR 8800, assim como demonstrar os cálculos que garantem a estabilidade mecânica e sugerindo análise da eficiência dos materiais adotados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Projeto estrutural. Estrutura metálica. Galpão. Aplicações em aço. ABNT NBR8800

BRAGA, B. K. G. Projeto estrutural de galpão metálico segundo recomendações ABNT NBR8800:2008. 2016. 83 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

### **ABSTRACT**

This work deals in a general way, the history and advantages of steel buildings, as well as its increasing usage in Brazil in the last century. This work also generally describes some types and its uses of metal frame. It also demonstrates the use of the NBR 8800: 2008 standard and its calculation methods through the scale out materials regulated in Brazil for an industrial warehouse project small and simple portico metal frame. Given that the construction requirements include a locational influence following the normative indications of the NBR 6123, for the winding scale out, since this effect combined with the permanent loads must be seriously evaluated due to the shape type effort about acting simultaneous axial force and bending moments obeying the limitations applied to the structure according to NBR 8800. As it has been explained the calculations that ensures mechanical stability and suggesting an analysis of the efficiency of the used materials.

**KEYWORDS:** Structure project. Metallic structures. Hangar. Steel Applications. ABNT NBR8800.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Estação da Luz em construção, São Paulo .....                                                | 15 |
| Figura 2 – Exemplos de diferentes tipos de coberturas estruturais.....                                  | 17 |
| Figura 3 – Exemplificação da classificação das estruturas com base no número de pórticos. 17            |    |
| Figura 4 – Exemplos de tipos de perfis estruturais. ....                                                | 21 |
| Figura 5 – Exemplos de tipo de fixação por meio de parafusos. ....                                      | 22 |
| Figura 6 – Exemplos de contraventamentos. ....                                                          | 23 |
| Figura 7 – Esboço do galpão com as medidas a ser projetado.....                                         | 30 |
| Figura 8 – Isopletas da velocidade básica de vento segundo ABNT NBR 6123/88.....                        | 31 |
| Figura 9 – Preenchimento das dimensões. ....                                                            | 32 |
| Figura 10 – Definição da velocidade média de ventos por região. ....                                    | 32 |
| Figura 11 – Definição do fator topográfico ( $S_1$ ). ....                                              | 34 |
| Figura 12 - Definição do fator de rugosidade ( $S_2$ ). ....                                            | 35 |
| Figura 13 – Definição do fator estatístico ( $S_3$ ). ....                                              | 36 |
| Figura 14 – Determinação do coeficiente de pressão externa nas paredes (C <sub>pe</sub> - parede).....  | 37 |
| Figura 15 – Determinação do coeficiente de pressão externa no telhado (C <sub>pe</sub> - telhado). .... | 38 |
| Figura 16 - Determinação do coeficiente de pressão interna (C <sub>pi</sub> ). ....                     | 39 |
| Figura 17 - Demonstração da combinação dos coeficientes de pressão .....                                | 39 |
| Figura 18 - Demonstração dos esforços resultantes devido à ação do vento.....                           | 40 |
| Figura 19 - Esforços resultantes devido à ação do vento.....                                            | 40 |
| Figura 20 Representação das ações combinadas na hipótese 1. ....                                        | 43 |
| Figura 21 Representação das ações combinadas na hipótese 2. ....                                        | 44 |
| Figura 22 Representação das ações combinadas na hipótese 3. ....                                        | 45 |
| Figura 23 Diagrama de momentos solicitantes. ....                                                       | 53 |
| Figura 24 Esforços de cortante na estrutura.....                                                        | 58 |
| Figura 25 Deformações do pórtico.....                                                                   | 59 |



## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 – Dados estatísticos da produção siderúrgica brasileira 2015 .....                                              | 16 |
| Quadro 2 – Tipos de aços mais utilizados no Brasil .....                                                                 | 20 |
| Quadro 3 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações $\gamma_f = \gamma_{f1} \gamma_{f2}$ .....                   | 26 |
| Quadro 4 – Valores dos coeficientes de combinação $\psi_0$ e de redução $\psi_1$ e $\psi_2$ para as ações variáveis..... | 27 |
| Quadro 5 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências $\gamma_m$ .....                                      | 28 |
| Quadro 6 – Requisitos de projeto do galpão a ser dimensionado.....                                                       | 29 |
| Quadro 7 –Equações para o cálculo do coeficiente S1 em caso de talude e morros. ....                                     | 33 |
| Quadro 8 – Definição segundo a norma para o fator estatístico $S_2$ .....                                                | 36 |
| Quadro 9 - Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados. ....                                               | 47 |
| Quadro 10 - Agrupamento de resultados.....                                                                               | 62 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $F_r$  Valor representativo das ações
- $Y_f$  Coeficiente de ponderação
- $Y_{f1}$  Coeficiente de ponderação que representa a parcela que considera a variabilidade das ações
- $Y_{f2}$  Coeficiente de ponderação que representa a parcela que considera a simultaneidade de ações.
- $Y_{f3}$  Coeficiente de ponderação que representa a parcela que considera os possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações
- $F_d$  Força de ações combinadas para o estado- limite últimos de serviço
- $Y_g$  Coeficiente de ponderação referente às ações permanentes
- $F_{GLk}$  Valor característico das ações permanentes
- $F_{Q1,k}$  Valor característico da ação variável especial
- $\psi_{0f}$  Fator de combinação efetivos
- $F_{Q1E}$  Valor característico das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal.
- $Y_i$  Coeficiente de segurança interno
- $\sigma$  Tensões atuantes
- $Y_v$  Coeficiente de ponderação de ações variáveis
- $\psi_0$  Fator de combinação
- $\psi_1$  Fator de redução para estado-limite de fadiga
- $\psi_2$  Fator de redução para combinações excepcionais
- $f_d$  Resistência de cálculo
- $f_k$  Resistência nominal
- $Y_m$  Coeficiente de ponderação
- $Y_{m1}$  Coeficiente de ponderação que representa a parcela que considera a variabilidade da resistência dos materiais envolvidos.
- $Y_{m2}$  Coeficiente de ponderação que representa a parcela que considera a diferença entre as resistências do material no corpo de prova e na estrutura.
- $Y_{m3}$  Coeficiente de ponderação que representa a parcela que considera os desvios gerados na construção e as aproximações feitas no projeto.

|             |                                                                                   |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| $l_{vp}$    | Comprimento do vão longitudinal entre pórticos                                    |
| $L_v$       | Largura de vão livre                                                              |
| K           | Coefficiente de flambagem por flexão de elementos isolados                        |
| E           | Modulo de elasticidade                                                            |
| $f_y$       | Resistencia ao escoamento do aço.                                                 |
| r           | Raio de giração                                                                   |
| $V_0$       | Velocidade básica do vento                                                        |
| $V_k$       | Velocidade característica do vento                                                |
| $S_1$       | Fator topográfico                                                                 |
| $S_2$       | Fator de rugosidade                                                               |
| $S_3$       | Fator estatístico                                                                 |
| q           | Pressão dinâmica                                                                  |
| $F_d$       | Força resultante das combinações                                                  |
| $h_w$       | Largura da alma.                                                                  |
| $t_w$       | Espessura da alma                                                                 |
| $b_f$       | Largura da mesa.                                                                  |
| $t_f$       | Espessura da mesa.                                                                |
| Q           | Fator de redução total                                                            |
| $N_e$       | Carga de flambagem elástica por torção                                            |
| $A_g$       | Área bruta da seção transversal                                                   |
| $\lambda_p$ | Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação                              |
| $\lambda_r$ | Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento                      |
| $\chi$      | Fator de redução associado à resistência à compressão                             |
| $N_{e,Ed}$  | Força axial de compressão resistente de cálculo.                                  |
| $\beta_1$   | Coefficiente de dilatação térmica.                                                |
| J           | Constante de torção da seção uniforme                                             |
| $\sigma_r$  | Tensão residual de compressão nas mesas.                                          |
| $C_w$       | Constante de empenamento da seção transversal                                     |
| $I_y$       | Momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma |
| $r_y$       | Raio de giração de da seção em relação ao eixo principal de inércia               |
| $M_r$       | Momento fletor correspondente ao início do escoamento.                            |
| $\lambda$   | Parâmetro de esbeltez                                                             |

|             |                                                                 |
|-------------|-----------------------------------------------------------------|
| $\lambda_p$ | Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação            |
| $\lambda_r$ | Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento    |
| $M_{pl}$    | Momento fletor de plastificação da seção transversal            |
| $C_b$       | Fator de modificação para diagrama de momento fletor não linear |
| $M_{ov}$    | Momento fletor de flambagem elástica                            |
| $M_{rd}$    | Momento fletor resistente de cálculo                            |
| $V_{pl}$    | Força cortante correspondente à plastificação                   |
| $V_{Rd}$    | Força cortante resistente de cálculo                            |
| $\delta_h$  | Deslocamento horizontal                                         |
| $\delta_v$  | Deslocamento vertical                                           |
| $F_{Td}$    | Força de tração atuando na diagonal no contraventamento         |
| $N_{c,sa}$  | Força diagonal do contraventamento                              |
| $A_{trans}$ | Área da seção transversal do pórtico                            |
| $F_{dage}$  | Ação que atua nos eixos longitudinais                           |

## SUMÁRIO

|              |                                                                               |           |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                                       | <b>12</b> |
| 1.1          | OBJETIVOS .....                                                               | 12        |
| 1.2          | MOTIVAÇÃO.....                                                                | 12        |
| 1.3          | DELIMITAÇÕES DO PROJETO.....                                                  | 13        |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                                            | <b>14</b> |
| 2.1          | ESTRUTURAS METÁLICAS .....                                                    | 14        |
| <b>2.1.1</b> | <b>Surgimento da Engenharia Estrutural</b> .....                              | <b>14</b> |
| <b>2.1.2</b> | <b>Utilização e difusão no Brasil</b> .....                                   | <b>14</b> |
| <b>2.1.3</b> | <b>Edificações Industriais e Galpões</b> .....                                | <b>16</b> |
| <b>2.1.4</b> | <b>Vantagens e Desvantagens</b> .....                                         | <b>17</b> |
| <b>2.1.5</b> | <b>Em Relação ao Ambiente</b> .....                                           | <b>18</b> |
| <b>2.1.6</b> | <b>Economia e Viabilidade</b> .....                                           | <b>19</b> |
| 2.2          | PERFIS METÁLICOS .....                                                        | 19        |
| <b>2.2.1</b> | <b>Perfis para colunas</b> .....                                              | <b>20</b> |
| 2.3          | MEIOS DE FIXAÇÃO.....                                                         | 21        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Ligações Parafusadas</b> .....                                             | <b>21</b> |
| <b>2.3.2</b> | <b>Contraventamento</b> .....                                                 | <b>22</b> |
| 2.4          | PREMISSAS DE CÁLCULO .....                                                    | 23        |
| <b>2.4.1</b> | <b>Ações atuantes na estrutura.</b> .....                                     | <b>23</b> |
| 2.4.1.1      | Ações permanentes .....                                                       | 23        |
| 2.4.1.2      | Ações variáveis.....                                                          | 24        |
| 2.4.1.3      | Ações excepcionais.....                                                       | 24        |
| 2.4.1.4      | Valores de cálculo das ações .....                                            | 24        |
| 2.4.1.5      | Combinações últimas normais.....                                              | 24        |
| <b>2.4.2</b> | <b>Método dos estados limites últimos (ELU)</b> .....                         | <b>25</b> |
| 2.5          | NORMAS ADICIONAIS.....                                                        | 28        |
| <b>3</b>     | <b>METODOLOGIA</b> .....                                                      | <b>29</b> |
| 3.1          | DESCRIÇÃO DO PROJETO DO GALPÃO.....                                           | 29        |
| <b>3.1.1</b> | <b>Cálculo da força de vento</b> .....                                        | <b>30</b> |
| <b>3.1.2</b> | <b>Cálculo da velocidade característica de vento (<math>V_E</math>)</b> ..... | <b>41</b> |

|       |                                                                        |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.3 | Cálculo da pressão dinâmica (q).....                                   | 41 |
| 3.1.4 | Cálculo da ação acidental no telhado ( $F_{QEK}$ ).....                | 42 |
| 3.1.5 | Cálculo da ação permanente ( $F_{QEK}$ ).....                          | 42 |
| 3.1.6 | Cálculo da combinação de estados-limites últimos .....                 | 42 |
| 3.1.7 | Cálculo da Força nocional ( $F_n$ ) .....                              | 45 |
| 3.2   | PRÉ AVALIAÇÃO DOS PERFIS .....                                         | 45 |
| 3.3   | ANÁLISE DAS COLUNAS.....                                               | 46 |
| 3.3.1 | Análise da esbeltez: .....                                             | 46 |
| 3.3.2 | Análise de flambagem.....                                              | 48 |
| 3.3.3 | Cálculo do índice de esbeltez.....                                     | 49 |
| 3.3.4 | Análise da capacidade de flexão .....                                  | 50 |
| 3.3.5 | Verificação do estado limite para flambagem local da mesa (FLM).....   | 54 |
| 3.3.6 | Verificação do estado limite para flambagem em local da alma (FLA): .. | 55 |
| 3.3.7 | Verificação da capacidade ao cisalhamento: .....                       | 56 |
| 3.3.8 | Verificação para a combinação de esforços solicitantes:.....           | 57 |
| 3.3.9 | Verificação do Deslocamento Vertical e Lateral.....                    | 58 |
| 3.4   | VERIFICAÇÃO DOS CONTRAVENTAMENTOS DA COBERTURA. ....                   | 59 |
| 3.4.1 | Verificação dos contraventamentos verticais .....                      | 60 |
| 3.4.2 | Análise do Contraventamento .....                                      | 61 |
| 4     | RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                                           | 62 |
| 5     | CONCLUSÕES .....                                                       | 66 |
|       | REFERÊNCIAS .....                                                      | 67 |
|       | ANEXO A.....                                                           | 70 |
|       | ANEXO B.....                                                           | 71 |
|       | ANEXO C.....                                                           | 75 |
|       | ANEXO D.....                                                           | 76 |
|       | ANEXO E .....                                                          | 79 |

## 1 INTRODUÇÃO

Um estudo elaborado com base na aplicação de projetos de galpões para uso geral, é preciso saber quais são os materiais indicados para utilização, os pórticos e formas de ligação que oferecem aplicabilidade e estabilidade com o custo benefício desejado a partir de análises dos elementos estruturais, sendo este seguindo as normas brasileiras, em principal a NBR 8800: 2008 para projetos de estrutura de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios. Existe também a necessidade do conhecimento topográfico e geológico do solo, região e suas características físicas, assim como a magnitude e comportamento da carga de vento na região para análise da estabilidade estrutural.

### 1.1 OBJETIVOS

Elaborar um projeto de cunho instrutivo e acadêmico para análise da estabilidade de materiais empregados em um projeto de um galpão de pequeno porte e pórtico simples em estruturas metálicas, visando o ponto de vista das matérias abordadas no curso de engenharia mecânica, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 8800:2008.

Orientar quanto ao uso de materiais, perfis e quanto ao uso de materiais metálicos e suas aplicações. Demonstrar também os métodos de cálculo e processos de desenvolvimento utilizados, necessários ao atendimento das especificações da ABNT NBR 8800:2008 entre outras.

### 1.2 MOTIVAÇÃO

Desenvolver do ponto de vista acadêmico a utilização prática dos conhecimentos adquiridos no curso de engenharia mecânica em um projeto estrutural visando avaliar o comportamento de colunas, vigas e terças, segundo suas propriedades mecânicas e esforços aplicados a partir de recomendações de normas brasileiras.

Do ponto de vista da engenharia é interessante difundir os conhecimentos e aplicações da norma vigente no Brasil para esse tipo de construção, a NBR8800. Afinal, o conhecimento

e o correto cumprimento da norma garantem projetos confiáveis. Sendo ela também necessária para a construção de galpões metálicos.

### 1.3 DELIMITAÇÕES DO PROJETO

A elaboração deste trabalho é feita com base em um projeto básico de galpão para usos gerais. Foram utilizados perfis laminados e soldados segundo prescrito na ABNT NBR 14762:2010.

Por questões acadêmicas e restrições do escopo do trabalho, não será considerada a situação de incêndio. Para tal, será necessário consultar a norma ABNT NBR 14323 e ABNT NBR 14432 para elementos construtivos.

O dimensionamento da fundação também não será estudado neste trabalho, devido ao escopo visando a utilização da norma ABNT NBR 8800:2008 para a construção metálica em relação às colunas, vigas e terças, e contraventamentos.

Porém para o dimensionamento de bases e colunas é recomendado no Anexo S item S.2 da ABNT NBR 8800:2008 que seja utilizado o Steel Design Guide 1, 2ª edição, da *American Institute of Steel Construction* (2006) (AISC).

Para outras considerações, também é possível utilizar como referência o “Manual de Interfaces Aço – Concreto”, 2ª edição, do CBCA – IABr (2010).



## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão abordados temas como o início da construção em aço além da necessidade de desenvolvimento do mesmo, assim como a trajetória e expansão do uso de ligas metálicas no Brasil até os dias atuais.

Serão também brevemente introduzidos alguns conceitos de cálculos estruturais que serão importantes para o desenvolvimento de todo o conjunto de especificações como fundamentação teórica referenciada na ABNT NBR 8800:2008.

### **2.1 ESTRUTURAS METÁLICAS**

#### **2.1.1 Surgimento da Engenharia Estrutural**

Segundo Martins (2010), com a criação e expansão das ferrovias foi imprescindível o aprimoramento na elaboração de pontes com vãos cada vez maiores, tornando necessários o estudo dos materiais derivados do ferro, dando início à formulação da primeira teoria geral da elasticidade em 1821. Porém a utilização em escala industrial do ferro só se destacou em meados do século XIX com a industrialização de países Europeus como Inglaterra, Alemanha e França.

#### **2.1.2 Utilização e difusão no Brasil**

Junto com a corte real instalada no Rio de Janeiro e o crescente povoamento das cidades costeiras veio a necessidade de expandir e criar novos portos que abrigassem todas as embarcações. Para tanto surgiram técnicas de fabricação do ferro fundido e a necessidade de qualificação de mão-de-obra para o desenvolvimento portuário que atendesse às demandas da cidade, assim como a criação e expansão de ferrovias pelo território.

Em 1901 foi concluída a Estação da Luz, em São Paulo, sendo a Figura 1 uma ilustração da obra ainda em construção. Toda estrutura metálica na cobertura e passarelas foram trazidas da Inglaterra, uma vez que o Brasil só passou a desenvolver sua indústria siderúrgica na década de 20 com a criação da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira. Vinte

anos mais tarde acontecia a fundação da Companhia Siderúrgica Nacional, na cidade de Volta Redonda-RJ entrando em funcionamento 12 de outubro de 1945 com a finalidade de produzir chapas, trilhos e perfis metálicos segundo Bellei (2004).

Figura 1 - Estação da Luz em construção, São Paulo



Fonte: HONORATO.

Em 1953 foi fundada a Fábrica de Estruturas Metálicas – FEM, pioneira no Brasil na fabricação de edifícios de andares múltiplos e outras estruturas, utilizando mão-de-obra especializada na produção de estruturas metálicas. Porém foi desativada em 1998 segundo Bellei (2004).

Atualmente, a Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, tem capacidade de abastecer o mercado brasileiro com 5,6 toneladas de aço anualmente segundo o Instituto Aço Brasil, que também disponibilizou a capacidade produtiva e também apresenta os dados estatísticos com o desempenho do setor em sua página da internet, na qual as informações são atualizadas mensalmente. No Quadro 1 está a produção siderúrgica referente ao ano de 2015 segundo o Instituto.

Quadro 1 – Dados estatísticos da produção siderúrgica brasileira 2015

## Produção Siderúrgica Brasileira

*Unid.: 10<sup>3</sup>t*

| PRODUTOS                       | JAN/DEZ  |          | 1º/14<br>(%) | OUT<br>2015 | NOV<br>2015 | DEZEMBRO |         | 1º/14<br>(%) | ÚLTIMOS<br>12 MESES |
|--------------------------------|----------|----------|--------------|-------------|-------------|----------|---------|--------------|---------------------|
|                                | 2015(*)  | 2014     |              |             |             | 2015(*)  | 2014    |              |                     |
| AÇO BRUTO                      | 33.245,2 | 33.897,0 | ( 1,9)       | 2.982,5     | 2.548,0     | 2.461,7  | 2.622,6 | ( 6,1)       | 33.245,2            |
| LAMINAÇOS                      | 22.629,3 | 24.916,4 | ( 9,2)       | 1.883,2     | 1.838,3     | 1.514,1  | 1.729,2 | ( 12,4)      | 22.629,3            |
| PLANOS                         | 13.388,3 | 14.228,7 | ( 5,9)       | 1.056,7     | 1.059,2     | 1.073,6  | 1.114,7 | ( 3,7)       | 13.388,3            |
| LINGOTES                       | 9.241,0  | 10.687,7 | (13,5)       | 826,5       | 779,1       | 440,5    | 614,5   | (28,3)       | 9.241,0             |
| SEMI-ACABADOS F/VENDAS         | 9.135,0  | 7.002,8  | 30,4         | 822,5       | 819,1       | 868,9    | 755,1   | 15,1         | 9.135,0             |
| PLACAS                         | 8.012,8  | 6.508,3  | 23,1         | 783,2       | 705,2       | 736,6    | 702,1   | 4,9          | 8.012,8             |
| LINGOTES, BLOCOS E TARUGOS     | 1.122,2  | 494,5    | 126,9        | 39,3        | 113,9       | 132,3    | 53,0    | 149,6        | 1.122,2             |
| FERRO-GUSA (Usinas Integradas) | 27.803,3 | 27.016,3 | 2,9          | 2.433,6     | 2.169,0     | 2.276,3  | 2.451,1 | (7,1)        | 27.803,3            |

(\*) Dados Preliminares.

Fonte: Aço Brasil

PRELIMINAR ESTATÍSTICO | www.acobrasil.org.br | (21) 3445-6300 | acobrasil@acobrasil.org.br

Fonte: INSTITUTO Aço Brasil.

Com esses resultados, a produção nacional acumulada em 2015 totalizou 33,2 milhões de toneladas de aço bruto e 22,6 milhões de toneladas de laminados estimados para o ano de 2015.

### 2.1.3 Edificações Industriais e Galpões

Tanto os galpões quanto as coberturas são construções normalmente feitas em aço com finalidades geralmente voltadas para a indústria. Os componentes de apoio são basicamente vigas ou terças que sustentam a cobertura compostas em geral por treliças ou por perfis em forma de "tesouras" segundo Pravia (2010).

São em sua maioria, formados por um único pavimento destinados ambientes fabris ou depósitos, ou até mesmo para instalações e coberturas comerciais.

Dentre elas, são divididas em grupos Espaciais, Duas águas, Curvas ou Arco e Shed (MERIGO, et al. 2012). A Figura 2 é um exemplo dos tipos de estruturas citado anteriormente.

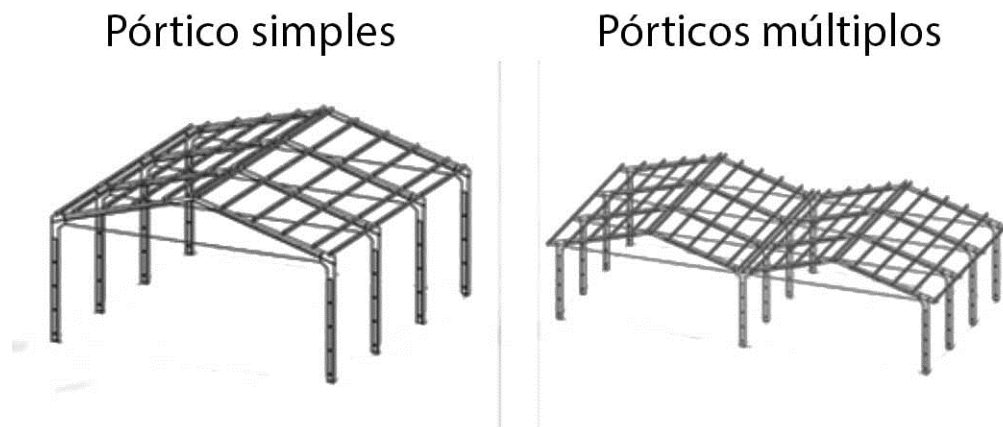
Figura 2 – Exemplos de diferentes tipos de coberturas estruturais.



Fonte – MERIGO, 2012

Existe também, no caso dos galpões, uma divisão quanto ao número de pórticos, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Exemplificação da classificação das estruturas com base no número de pórticos.



Fonte: GALPÕES Líder.

#### 2.1.4 Vantagens e Desvantagens

Dentre as principais vantagens em se utilizar construções metálicas a agilidade na construção é uma que se destaca, gerando um lucro devido ao menor tempo para se erguer a

estrutura, assim como maior facilidade de transporte. O aço também é bem empregado devido a sua alta resistência e boas propriedades mecânicas além de baixo peso próprio, cerca de um quinto do peso correspondente à utilização do concreto, considerando a mesmas dimensões de projeto, segundo Martins (2010).

A facilidade de montagem e desmontagem e sua flexibilidade em relação à formas e projetos de construção também são grandes vantagens em relação às práticas de alvenaria, uma vez que são utilizadas para vencer grandes vãos e abrangem elevadas possibilidades de formatos garantindo qualidade e eficiência.

As maiores desvantagens na utilização do aço em estruturas é que ele é suscetível a intempéries naturais como a corrosão e que acabam por comprometer a integridade da estrutura.

Uma vez reconhecida a necessidade de se prevenir contra esses processos naturais, foram desenvolvidos métodos que bem aplicados resultam em um projeto de elevada duração e confiabilidade. Porém alguns deles podem ser inacessíveis ou mesmo inviáveis por serem bem caros, como a substituição do aço por ligas resistentes à corrosão, como ligas de titânio, níquel, alumínio, ou aço inoxidável segundo Martins (2010).

Há também outras soluções para o tratamento da corrosão que seria a pintura ou jateamento de abrasivos secos, revestimento de alcatrão e carvão.

O aço possui sua resistência reduzida à alta temperatura, desta maneira em casos de incêndio o calor intenso pode deformar a estrutura o que exige uma proteção adicional como revestimentos minerais expandidos, materiais intumescentes e de concreto fazem com que o aço não atinja os limites de temperatura admissíveis. Para tanto as estruturas podem ser envolvidas em gesso, ou em materiais como argila. Entretanto, estes tratamentos geralmente são caros e exigem manutenção. Portanto, deve se levar em conta a análise das necessidades de cada projeto e deverão ser consultadas normas ABNT NBR 14323 e ABNT NBR 14432.

### **2.1.5 Em Relação ao Ambiente**

Estruturas metálicas devidamente projetadas podem garantir menores retrabalhos e desperdícios assim como menores quantidades de entulho e melhorar o aproveitamento do espaço. Também existe a facilidade em se adaptar estruturas, sem a necessidade de desconstrução e reconstrução sendo considerada muito menos agressiva ao meio ambiente pois o aço é 100% reciclável segundo o CBCA (Centro Brasileiro da Construção em Aço).

### 2.1.6 Economia e Viabilidade

Como citado anteriormente, devido à possibilidade de reaproveitamento do material e sua transposição, a construção em estruturas metálicas é considerada uma das mais versáteis e econômicas existentes.

Considerando a redução do tempo de obra, também gera indiretamente lucro para os investidores, desta forma ganhando cada vez mais espaço no mercado das edificações.

É notável também que a parte de detalhamento e de projeto numa construção metálica é visivelmente maior do que nas demais construções em concreto, devido à necessidade de grande precisão dimensional e quantitativa de material pois normalmente as peças já vem pré-montadas e desta maneira evitam-se erros de processo ou de montagem, exigindo também uma menor quantidade de mão de obra.

Para que o projeto seja realmente viável, deve se levar em consideração o planejamento e qualidade de todos os processos de construção pois não é necessariamente comum um programa de manutenção preventiva na área da construção civil.

Algumas das atividades que podem melhorar a qualidade da construção podem ser facilmente obtidas segundo um detalhamento que evite interferências com as instalações elétricas, hidráulicas e de condicionamento de ar. Deve-se tomar o devido cuidado para que os equipamentos e materiais de construção não fiquem em contato com terrenos com facilidade para deposição de água ou outros resíduos. Garantir que haja circulação de ar entre as faces dos perfis para que sua secagem natural não seja prejudicada, assim como evitar o contato direto do aço com outros metais sem o devido tratamento químico, para que não ocorra o fenômeno de corrosão galvânica. Estas e outras atividades permitem melhorar a vida útil da construção.

## 2.2 PERFIS METÁLICOS

Os perfis utilizados na indústria podem ser obtidos de duas maneiras, pelo processo siderúrgico (chapas, barras e perfis laminados) ou pelo processo metalúrgico (chapas dobradas ou perfis soldados).

A escolha do material e o tipo do aço podem depender de fatores como geometria e esforços solicitantes analisados, do ambiente onde se encontra a construção, assim como a

verificação da atmosfera, se for agressiva à estrutura deverá se tomar demais cuidados para evitar manutenção desnecessária segundo Bellei (2004).

Em geral os aços utilizados no Brasil são fabricados segundo normas como a ASTM (American Society for Testing and Materials) e a DIN (Deutsche Industrie Normen). Também podem ser fornecidos sob denominação dos próprios fabricantes.

Sendo assim, os aços comumente utilizados estão listados no Quadro 2.

Quadro 2 – Tipos de aços mais utilizados no Brasil

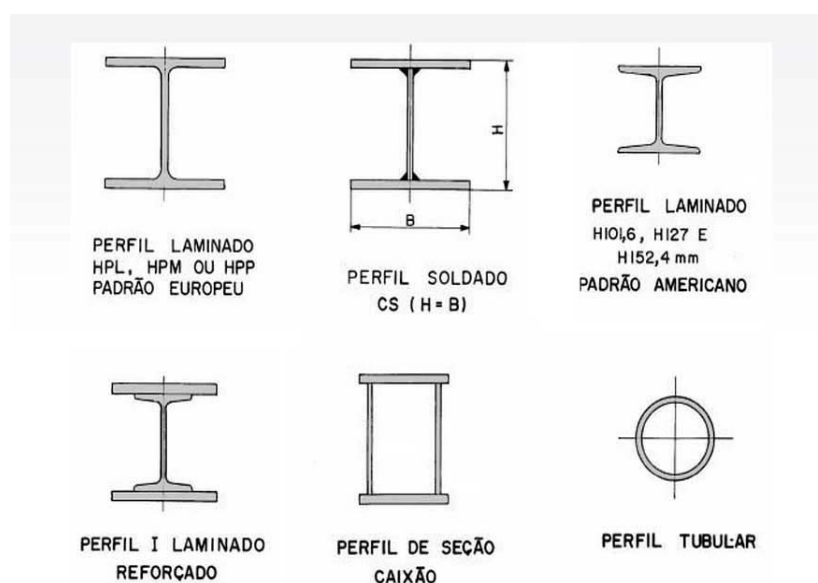
| <b>Aços de média resistência para uso geral</b>                                                     |                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Descrição</b>                                                                                    | <b>Material</b>                                                                  |
| Perfis, chapas e barras redondas acima de 50 mm                                                     | ASTM A- 36                                                                       |
| Chapas finas                                                                                        | ASTM A-570 e SAE 1020                                                            |
| Barras redondas (6 a 50 mm)                                                                         | SAE 1020                                                                         |
| Tubos redondos sem costura                                                                          | DIN 2448, ASTM A-53 grau B                                                       |
| Tubos quadrados e retangulares, com e sem costura                                                   | DIN 17100                                                                        |
| <b>Aços estruturais, baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, média resistência mecânica</b> |                                                                                  |
| Chapas                                                                                              | USI-SAC 41 (USIMINAS)                                                            |
| Chapas                                                                                              | Aço estrutural com limite de escoamento de 245 MPa (COSIPA)                      |
| <b>Aços estruturais, baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, alta resistência mecânica</b>  |                                                                                  |
| Chapas                                                                                              | ASTM A-242, ASTM A-588 COS-AR-COR (COSIPA), USI-SAC-50 (USIMINAS) e NIOCOR (CSN) |
| Perfis                                                                                              | ASTM A-242, A-588 (COFAVI)                                                       |

Fonte: PORTAL Metálica.

### 2.2.1 Perfis para colunas

Os perfis utilizados na construção são essencialmente dimensionados quanto à compressão, no caso das colunas segue alguns exemplos dos perfis utilizados na Figura 4.

Figura 4 – Exemplos de tipos de perfis estruturais.



Fonte: PORTAL Metálica.

## 2.3 MEIOS DE FIXAÇÃO

Os sistemas de ligações são os elementos que fazem a união dos diversos componentes da estrutura metálica, como vigas, pilares e contraventamentos

São geralmente chapas, parafusos, soldas que compõem os principais elementos de ligação e devem apresentar resistência compatível com o aço utilizado na construção. Para melhor otimização da obra é necessário escolher criteriosamente o meio de ligação a se utilizar segundo as condições de montagem, grau de dificuldade para a fabricação da peça assim como procurar uma padronização do sistema de ligações escolhido.

### 2.3.1 Ligações Parafusadas

São as substitutas do rebite, antigamente utilizados nas construções. As ligações com parafusos possuem vantagens como fácil desmontagem e remontagem e garantem maior padronização como exemplificado na Figura 5, porém necessitam de grandes cuidados pois



geram distribuições de tensão não uniforme nas peças ligadas, além de uma grande concentração de tensão nas roscas dos parafusos.

Elas podem utilizar dois tipos de parafusos:

**Comuns:** apresentam baixa resistência mecânica e são mais utilizados em peças sem muito esforço solicitado como guarda-corpos, corrimãos, e até terças.

**Alta resistência:** apresenta alta resistência e são utilizados em geral quando se é exigido bastante esforço ou quando há uma limitação no número de parafusos, muitas vezes devido à falta de espaço nas chapas e em outras ligações. É recomendado que se evite a utilização de parafusos e porcas galvanizados que estejam sem devida pintura em estruturas de aço carbono comum ou nas resistentes à corrosão atmosférica devido ao potencial eletroquímico que produz uma acelerada corrosão da camada de zinco.

Figura 5 – Exemplos de tipo de fixação por meio de parafusos.



Fonte: LEONARDI

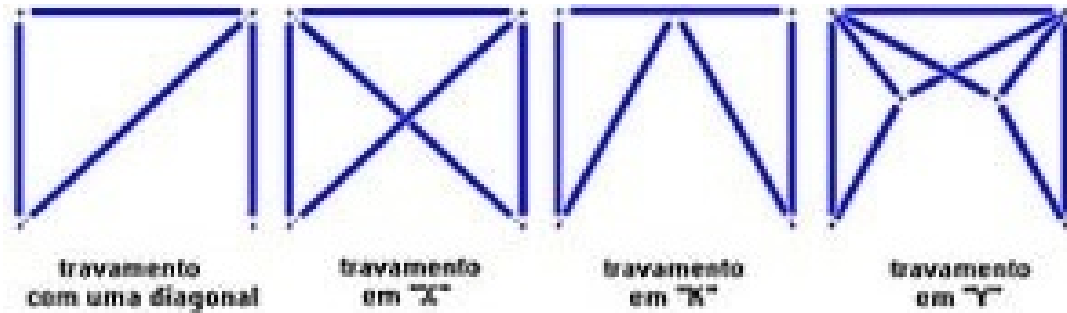
### 2.3.2 Contraventamento

“Nas estruturas de aço, por serem formadas na maioria por conexões flexíveis entre vigas e pilares e por apresentarem peças estruturais muito esbeltas devido à elevada resistência do material, o efeito do vento sempre é significativo” (DIAS, 2004).

Os contraventamentos são amplamente utilizados para dar maior estabilidade global à estrutura. Os tipos mais comuns são os em “X” e os com uma diagonal. Porém, é necessário avaliar a necessidade de abertura do vão, o que em muitos casos tornar-se-á viável a utilização

de formatos que favorecem maior abertura, como as versões em “K” ou em “Y”, conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 – Exemplos de contraventamentos.



Fonte: DIAS, 2004.

## 2.4 PREMISSAS DE CÁLCULO

Para a melhor compreensão dos desenvolvimentos elaborados nos capítulos em sequência é essencial que se faça uma introdução quanto a algumas nomenclaturas e referências em que os cálculos futuros serão baseados.

### 2.4.1 Ações atuantes na estrutura.

O conjunto de ações que atuam na estrutura devem ser considerados com seus valores representativos mais desfavoráveis para a segurança segundo a norma.

Para as demais generalidades é utilizado como base a ABNT NBR 6120.

Segundo a ABNT NBR 8621 item 4.7, as ações sob análise estrutural podem ser consideradas como:

#### 2.4.1.1 Ações permanentes

É todo o peso suportado pela estrutura, incluindo peso próprio e peso dos equipamentos ou qualquer instalação que seja permanente à estrutura, isto é, um somatório de pesos consideravelmente constantes durante toda utilização estrutural.

#### 2.4.1.2 Ações variáveis

São ações devidas às sobrecargas que podem ser consideradas variáveis ao longo da vida-útil da estrutura. São em geral novas instalações, ação do vento, variação de temperatura, incorporação de pisos ou equipamentos não considerados permanentes.

#### 2.4.1.3 Ações excepcionais

São ações com curto período de duração e com probabilidade de ocorrência muito baixa, como explosões, incêndios, enchentes, sismos consideráveis, ou algum choque demasiado grande contra a estrutura.

#### 2.4.1.4 Valores de cálculo das ações

O valor representativo  $F_r$  são os valores quantitativos devido às ações atuantes na estrutura, podendo elas serem permanentes, variáveis ou uma combinação de ações.

Para o cálculo das ações é necessário multiplicar os valores representativos das ações  $F_r$  pelo respectivo coeficiente de ponderação  $\gamma_f$ , dado por:

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \gamma_{f2} \gamma_{f3} \quad (1)$$

Onde:

$\gamma_{f1}$  representa a parcela que considera a variabilidade das ações

$\gamma_{f2}$  representa a parcela que considera a simultaneidade de ações.

$\gamma_{f3}$  representa a parcela que considera os possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações, de valor igual ou superior a 1,10.

#### 2.4.1.5 Combinações últimas normais

Segundo a ABNT NBR 8800:2008 são as combinações de ações que são previstas para a construção, durante todo o seu tempo de utilização. Deverão ser feitas as combinações tantas quanto forem necessárias para se verificar a segurança estrutural em estados- limites últimos.

$$F_d = \sum_{n=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi, k}) + \gamma_{gi} F_{Q1, k} \sum_{j=2}^n (\gamma_{gj} \psi_{0j} F_{Qj, k}) \quad (2)$$

#### 2.4.2 Método dos estados limites últimos (ELU)

É chamado estado-limite último o estado de esgotamento da capacidade portante associado a segurança da estrutura devido a ações ou combinações de ações desfavoráveis à estrutura, sendo inclusas as possíveis atuações de ações especiais ou excepcionais.

Para valores para verificação dos estados-limites últimos, conforme os quadros 3 e 4 a seguir, sendo o produto  $\gamma_{f1}\gamma_{f2}$  representado por  $\gamma_{d1}$  ou  $\gamma_{d2}$  (representando as ponderações permanentes e variáveis respectivamente) no Quadro 3 o coeficiente  $\gamma_{f2}$  é igual ao fator de combinação  $\psi_0$  no Quadro 4.

Quadro 3 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações  $\gamma_f = \gamma_{f1} \gamma_{fs}$ 

| Combinações                | Ações permanentes ( $\gamma_g$ ) <sup>1) 3)</sup> |                                         |                                                                                           |                                                                                    |                                                                    |             |
|----------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------|
|                            | Diretas                                           |                                         |                                                                                           |                                                                                    |                                                                    | Indiretas   |
|                            | Peso próprio de estruturas metálicas              | Peso próprio de estruturas pré-moldadas | Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados | Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i> | Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos     |             |
| Normais                    | 1,25<br>(1,00)                                    | 1,30<br>(1,00)                          | 1,35<br>(1,00)                                                                            | 1,40<br>(1,00)                                                                     | 1,50<br>(1,00)                                                     | 1,20<br>(0) |
| Especiais ou de construção | 1,15<br>(1,00)                                    | 1,20<br>(1,00)                          | 1,25<br>(1,00)                                                                            | 1,30<br>(1,00)                                                                     | 1,40<br>(1,00)                                                     | 1,20<br>(0) |
| Excepcionais               | 1,10<br>(1,00)                                    | 1,15<br>(1,00)                          | 1,15<br>(1,00)                                                                            | 1,20<br>(1,00)                                                                     | 1,30<br>(1,00)                                                     | 0<br>(0)    |
|                            | Ações variáveis ( $\gamma_q$ ) <sup>1) 4)</sup>   |                                         |                                                                                           |                                                                                    |                                                                    |             |
|                            | Efeito da temperatura <sup>2)</sup>               |                                         | Ação do vento                                                                             |                                                                                    | Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação |             |
| Normais                    | 1,20                                              |                                         | 1,40                                                                                      |                                                                                    | 1,50                                                               |             |
| Especiais ou de construção | 1,00                                              |                                         | 1,20                                                                                      |                                                                                    | 1,30                                                               |             |
| Excepcionais               | 1,00                                              |                                         | 1,00                                                                                      |                                                                                    | 1,00                                                               |             |

NOTAS:

<sup>1)</sup> Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

<sup>2)</sup> O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado como ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

<sup>3)</sup> Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem iguais ou superiores a 5 kN/m<sup>2</sup>, ou 1,40 quando isto não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

<sup>4)</sup> Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem iguais ou superiores a 5 kN/m<sup>2</sup>, ou 1,40 quando isto não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

Fonte: ABNT NBR 8800:2008.

Quadro 4 – Valores dos coeficientes de combinação  $\psi_0$  e de redução  $\psi_1$  e  $\psi_2$  para as ações variáveis.

| Ações                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                         | $\gamma_{f2}$ |          |                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------|---------------------------|
|                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                         | $\psi_0$      | $\psi_1$ | $\psi_2$ <sup>3) 4)</sup> |
| Cargas acidentais de edifícios                                                                                                                        | Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas <sup>1)</sup> | 0,5           | 0,4      | 0,3                       |
|                                                                                                                                                       | Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas <sup>2)</sup>      | 0,7           | 0,6      | 0,4                       |
|                                                                                                                                                       | Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)                                                                           | 0,8           | 0,7      | 0,6                       |
| Vento                                                                                                                                                 | Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral                                                                                                                       | 0,6           | 0,3      | 0                         |
| Temperatura                                                                                                                                           | Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local                                                                                                       | 0,6           | 0,5      | 0,3                       |
| Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos                                                                                                                | Passarelas de pedestres                                                                                                                                                 | 0,6           | 0,4      | 0,3                       |
|                                                                                                                                                       | Vigas de rolamento de pontes rolantes                                                                                                                                   | 1,0           | 0,8      | 0,5                       |
|                                                                                                                                                       | Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes                                                                          | 0,7           | 0,6      | 0,4                       |
| NOTAS:                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                         |               |          |                           |
| <sup>1)</sup> Edificações residenciais de acesso restrito.                                                                                            |                                                                                                                                                                         |               |          |                           |
| <sup>2)</sup> Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.                                                                             |                                                                                                                                                                         |               |          |                           |
| <sup>3)</sup> Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para $\psi_2$ o valor zero.                             |                                                                                                                                                                         |               |          |                           |
| <sup>4)</sup> Para combinações excepcionais onde a ação principal for o fogo, o fator de redução $\psi_2$ pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7. |                                                                                                                                                                         |               |          |                           |

Fonte: ABNT NBR 8800:2008.

Para resistência de cálculo  $f_d$  de um material é definida da forma:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (4)$$

Onde  $f_k$  é a resistência nominal e  $\gamma_m$  é o coeficiente de ponderação dado por:

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \gamma_{m2} \gamma_{m3} \quad (5)$$

Nos quais:

$\gamma_{m1}$  representa a parcela que considera a variabilidade da resistência dos materiais envolvidos.

$\gamma_{m2}$  representa a parcela que considera a diferença entre as resistências do material no corpo de prova e na estrutura.

$\gamma_{m3}$  representa a parcela que considera os desvios gerados na construção e as aproximações feitas no projeto.

Neste método os valores de  $\gamma_m$  dependem do material e da classificação da combinação última de ações, como mostrado no Quadro 5.

Quadro 5 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências  $\gamma_m$ .

| Combinações                | Aço estrutural <sup>a</sup>                                  |                          | Concreto<br>$\gamma_c$ | Aço das<br>armaduras<br>$\gamma_s$ |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------------|
|                            | $\gamma_a$                                                   |                          |                        |                                    |
|                            | Escoamento,<br>flambagem e<br>instabilidade<br>$\gamma_{a1}$ | Ruptura<br>$\gamma_{a2}$ |                        |                                    |
| Normais                    | 1,10                                                         | 1,35                     | 1,40                   | 1,15                               |
| Especiais ou de construção | 1,10                                                         | 1,35                     | 1,20                   | 1,15                               |
| Excepcionais               | 1,00                                                         | 1,15                     | 1,20                   | 1,00                               |

<sup>a</sup> Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

Fonte: ABNT NBR 8800:2008.

## 2.5 NORMAS ADICIONAIS

São apresentadas algumas outras normas, muito utilizadas no Brasil, e que serão de grande apoio no detalhamento do projeto.

Dentre elas são:

NBR6120/1980 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações;

NBR6123/1988 – Forças devidas ao vento em edificações;

NBR8681/2003 – Ações e segurança nas estruturas;

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os detalhes de projeto e a sequência de cálculos estruturais segundo normas ABNT NBR 8800:2008 e a ABNT NBR 6123/88 além de dados relevantes para a execução estudo. O qual prevalece o foco na análise dos dados gerados pelos programas Visualventos, para os cálculos das forças resultantes da ação do vento e diagramas obtidos a partir do software Ftool, para calcular as cargas solicitantes de momento fletor, esforços cortante e de deformação para os elementos estruturais analisados, ambos os softwares são encontrados no site do Etools criado pela Universidade de Passo Fundo e tem por objetivo projetar e construir programas computacionais de uso livre e gratuito para serem usados como elementos pedagógicos na aprendizagem de análise e dimensionamento de estruturas ou outras áreas da engenharia, cujas atribuições são voltadas para a exemplificação do trabalho.

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO PROJETO DO GALPÃO

Como definições do projeto em estudo, são estabelecidas as dimensões propostas para a estrutura de um galpão de pequeno porte e pórtico simples, cujas características são determinadas conforme o Quadro 6, e o esboço da estrutura representada pela Figura 7. A partir das definições mostradas, pode-se calcular os esforços devido às cargas de vento e cargas acidentais e permanentes na estrutura adotada.

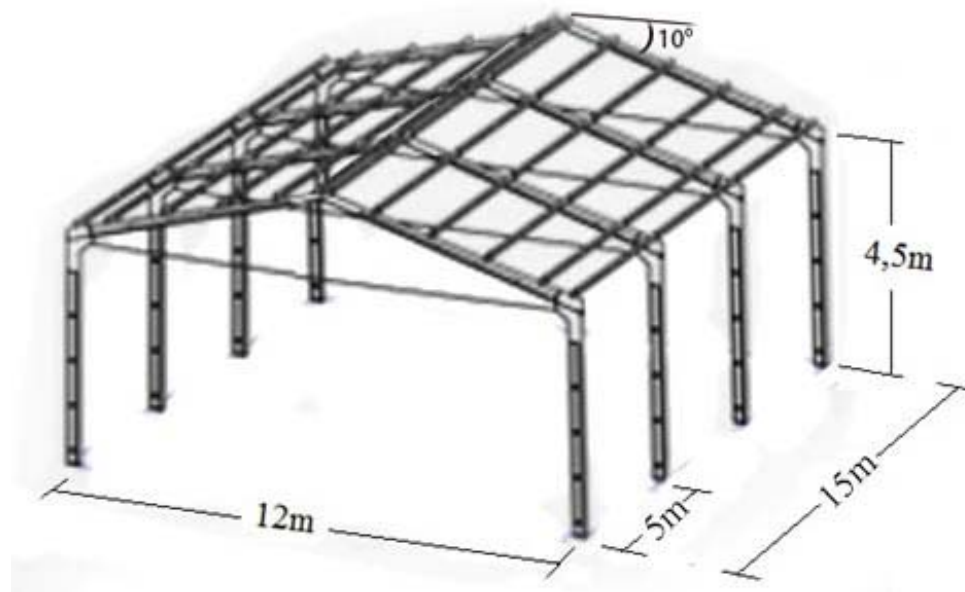
Quadro 6 – Requisitos de projeto do galpão a ser dimensionado

| Vão                                | Simplex.                   |
|------------------------------------|----------------------------|
| Vão longitudinal de entre pórticos | $l_{vp} = 5 \text{ m}$     |
| Comprimento total                  | $l_p = 15 \text{ m}$       |
| Pé direito                         | $L = 4,5 \text{ m}$        |
| Altura máxima do pórtico           | $L_{max} = 5,56 \text{ m}$ |
| Largura de vão livre               | $L_v = 12 \text{ m}$       |
| Inclinação da cobertura            | 10°                        |
| Material                           | Aço ASTM A752 Grau 50      |

Fonte: O autor.



Figura 7 – Esboço do galpão com as medidas a ser projetado



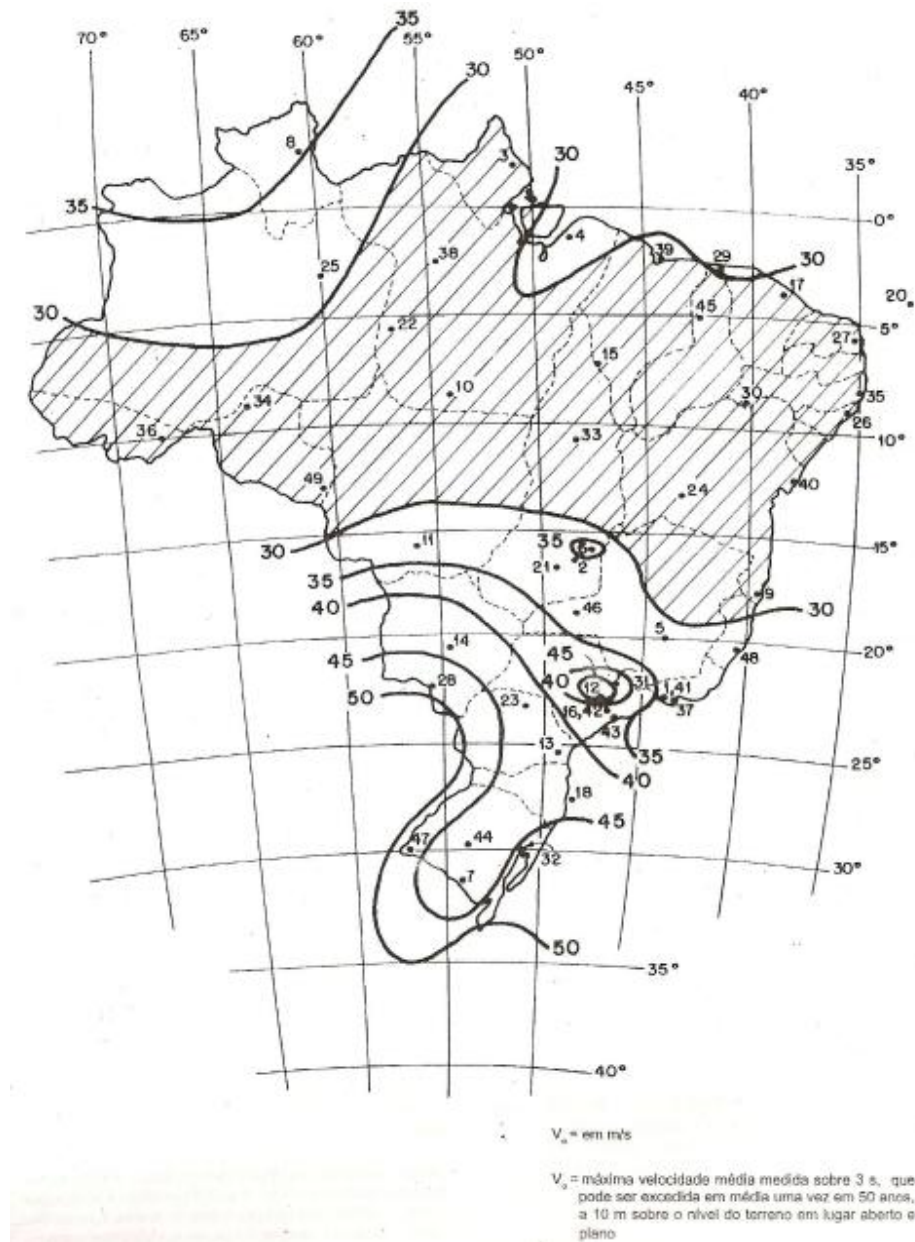
Fonte: GALPÕES Líder modificada pela autora.

### 3.1.1 Cálculo da força de vento

Por meio da utilização do Software Visualventos e de um mapa de curvas que representavam a velocidade média dos ventos por região demarcada, chamados isopleias (mapa cujas curvas traçadas representam a mesmo valor) como mostrado na Figura 8, de acordo com a ABNT NBR 6123/88 é utilizado para definir velocidade média para o vento em diversas regiões do território nacional.

Para fatores de cálculo, segundo a isopleia conforme indicado na Figura 10, na qual utiliza-se a velocidade básica de vento  $V_b$  segundo a ABNT NBR 6123/88 como sendo a velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida em média uma vez a cada 50 anos, localizada a 10 m acima do terreno de campo aberto e plano. Sendo assim, adotado  $V_b = 40 \frac{m}{s}$ , corresponde à da Região Metropolitana do Vale do Paraíba, onde situa-se a Unesp - Campus de Guaratinguetá.

Figura 8 – Isopletas da velocidade básica de vento segundo ABNT NBR 6123/88



Fonte: ABNT NBR 6123, 1988.

Segundo a utilização do Visualventos, desenvolvido com intuito educativo e segundo a norma ABNT NBR 6123/88 – Forças devido aos ventos em edificações, será mostrado o passo-a-passo do programa será mostrado a seguir com as dimensões do galpão a ser projetado segundo o Quadro 6, mostrado na Figura 9.

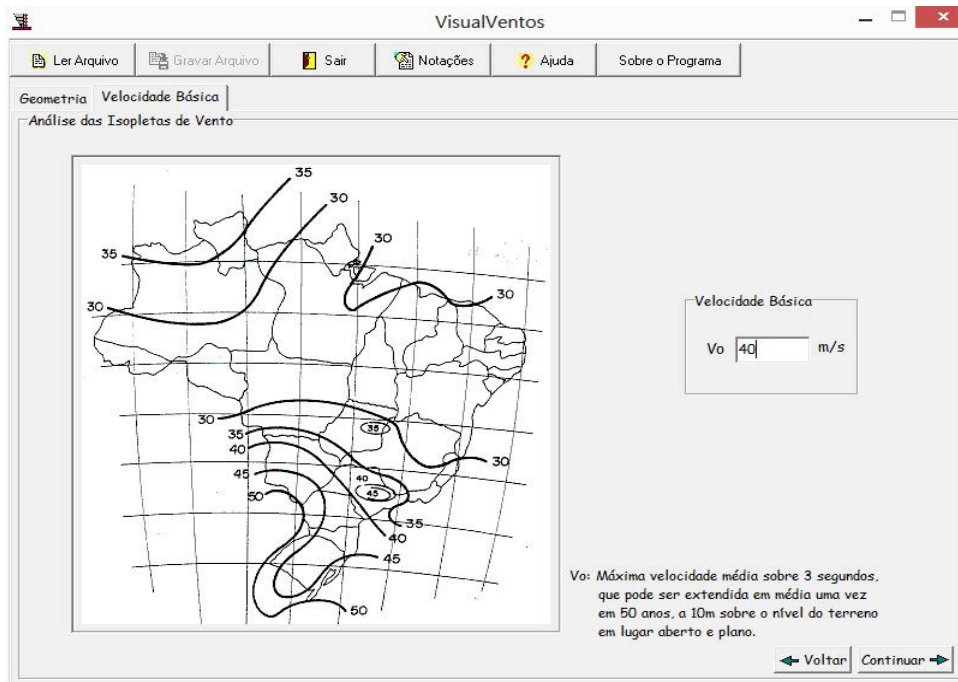
Figura 9 – Preenchimento das dimensões.

Fonte: VISUALVENTOS, 2007.

Para fins da aplicação no software, são preenchidos os valores de  $b$ ,  $h$  e  $p$ , os quais correspondem aos valores de  $L_p = 12 \text{ m}$ ,  $L = 4,5 \text{ m}$  e  $L_{op} = 5 \text{ m}$ , respectivamente, sendo  $a = 15 \text{ m}$  e  $\beta = 10^\circ$ .

Os valores restantes são automaticamente preenchidos após selecionar “confirmar”.

Figura 10 – Definição da velocidade média de ventos por região.



Fonte: VISUALVENTOS, 2007.

Segundo a ABNT NBR 6123/88 item 5.2, é definido Fator topográfico S1 como um fator que depende das características topográficas do terreno da construção, podendo ele ser classificado como:

- Plano ou fracamente acidentado ( $S_1 = 1,0$ )
- Talude e morros (para este, devem ser preenchidos valores de altura relativa a um ponto do terreno (z), diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro (d) e inclinação média do talude ou encosta do morro ( $\theta$ ) (S1 vide ilustração mostrada na Figura 11)<sup>1</sup>

No ponto A (morros) e pontos A e C (talude):  $S_1 = 1,0$

No ponto B: S1 segundo o Quadro 7:

Quadro 7 –Equações para o cálculo do coeficiente S1 em caso de talude e morros.

|                                     |                                                                                 |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $\theta \leq 3^\circ$               | $S_1 = 1,0$                                                                     |
| $6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$ | $S_1 = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \text{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1$ |
| $\theta \geq 45^\circ$              | $S_1 = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) 0,31 \geq 1$                        |

Fonte: Elaborado pela autora.

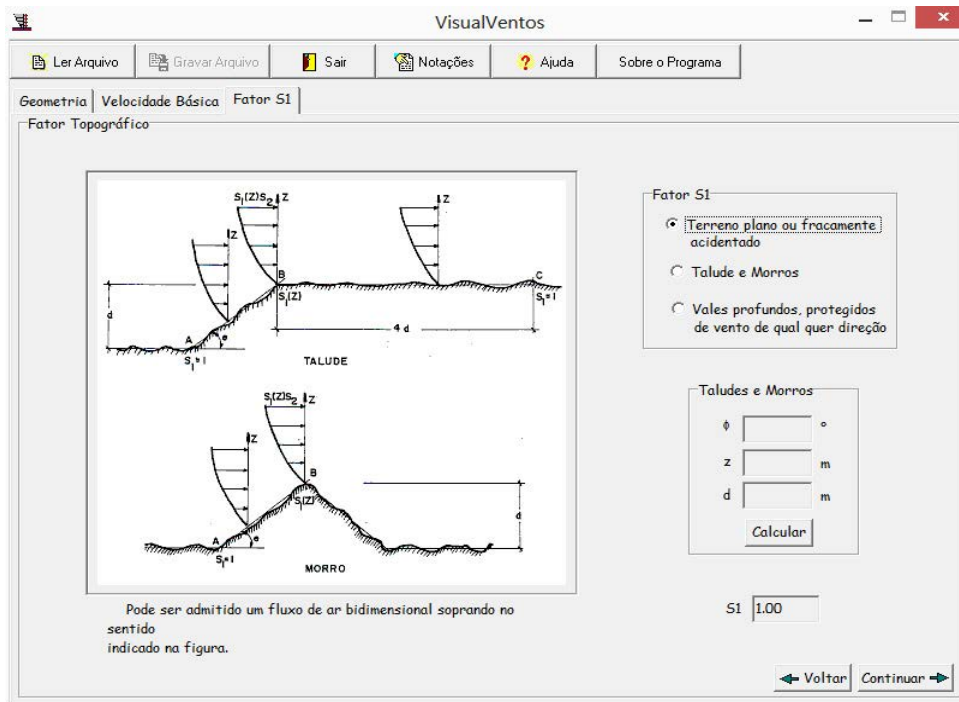
- Valores profundos protegidos de ventos de qualquer direção ( $S_1 = 0,9$ ).

Lembrando que deve ser selecionada a opção de projeto baseada nas condições que mais se assemelham com o tipo de relevo da obra em questão.

Para este estudo, foi considerado um terreno plano, sem muitos desníveis topográficos conforme preenchimento representado na Figura 11.

<sup>1</sup> Entre A e B e entre B e C, o fator S1 é obtido por interpolação linear.

Figura 11 – Definição do fator topográfico ( $S_1$ ).



Fonte: VISUALVENTOS, 2007.

Segundo o item 5.3 da ABNT NBR 6123/88, a definição do Fator de rugosidade ( $S_z$ ), leva em consideração alguns fatores. Sendo um deles o ambiente onde será feita a instalação. Isto é, o tipo de região onde será localizado o projeto. Podendo ser por exemplo, áreas rurais, planícies, áreas pouco povoadas e até mesmo áreas urbanas com grandes números de obstáculos, casas e edificações.

O outro fator considera a tamanho da construção, ou seja, considera a maior dimensão da base do projeto. Que pode variar entre as classes:

- Classe A: Menor do que 20m.
- Classe B: Entre 20m e 50m.
- Classe C: Maior do 50m.

No caso de valores acima de 80m deve ser consultado o Anexo A da ABNT NBR 6123/88.

Para fatores de cálculo, o projeto em estudo é situado em meio à construções civis e em terrenos parcialmente abertos ou com poucas árvores e construções espaçadas, considerando uma altura média de obstáculos igual a 3m, como base de simulação como representado na Figura 12.

Figura 12 - Definição do fator de rugosidade ( $S_2$ ).

VisualVentos

Ler Arquivo Gravar Arquivo Sair Notações Ajuda Sobre o Programa

Geometria Velocidade Básica Fator S1 Fator S2 Fator S3 Cpe - Paredes Cpe - Telhado

Fator de Rugosidade

Categoria do terreno

| Categoria                            | Descrição do ambiente                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="radio"/> I              | Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente.                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <input type="radio"/> II             | Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 3m.<br>Exemplos: zonas costeiras planas; pântanos com vegetação rala; campos de aviação; pradarias e charnecas; fazendas sem sebes ou muros.                                      |
| <input checked="" type="radio"/> III | Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3m.<br>Exemplos: granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos, fazendas com sebes e/ou muros, subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas. |
| <input type="radio"/> IV             | Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m.<br>Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores; cidades pequenas e seus arredores; subúrbios densamente construídos de grandes cidades; áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.    |
| <input type="radio"/> V              | Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25m.<br>Exemplos: florestas com árvores altas de copas isoladas; centros de grandes cidade; complexo industriais bem desenvolvidos.                                                                                                |

Classe de edificação

| Classe                             | Descrição                           |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| <input checked="" type="radio"/> A | Maior dimensão menor ou igual a 20m |
| <input type="radio"/> B            | Maior dimensão entre 20 e 50m       |
| <input type="radio"/> C            | Maior dimensão maior ou igual 50m   |

Maior dimensão:  m

Fator S2: S2

Calcular

Voltar Continuar

Fonte: VISUALVENTOS, 2007.

Ao calcular tem-se o fator  $S_2 = 0,89$ , cujo valor também pode ser obtido segundo demonstra a Tabela 2 da ABNT NBR 6123/88. Para valores na categoria III, classe A, para altura média de 3m.

Segundo o item 5.4 da ABNT NBR 6123/88 o fator estatístico  $S_3$  é baseado em conceitos que consideram o grau de segurança requerido e a vida útil da construção e depende principalmente do tipo de utilização destinada para o galpão e do seu fator de ocupação, podendo ser classificado em 5 tipos de grupos diferentes como representado na Figura 13, utilizando os dados obtidos segundo representa o Quadro 8 desta mesma seção da norma.

Quadro 8 – Definição segundo a norma para o fator estatístico  $S_3$ 

| Grupo | Descrição                                                                                                                                                                                                                       | $S_3$ |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1     | Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.) | 1,10  |
| 2     | Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação                                                                                                                         | 1,00  |
| 3     | Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)                                                                                                                  | 0,95  |
| 4     | Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)                                                                                                                                                                             | 0,88  |
| 5     | Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção                                                                                                                                                       | 0,83  |

Fonte: ABNT NBR 6123, 1988.

Figura 13 – Definição do fator estatístico ( $S_3$ ).

VisualVentos

Ler Arquivo Gravar Arquivo Sair Notações Ajuda Sobre o Programa

Geometria Velocidade Básica Fator S1 Fator S2 Fator S3

Fator Estatístico

Fator S3

| Grupo                              | Descrição                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="radio"/> 1            | Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros, centrais de comunicação, etc) |
| <input checked="" type="radio"/> 2 | Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação                                                                                               |
| <input type="radio"/> 3            | Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc)                                                                                         |
| <input type="radio"/> 4            | Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc)                                                                                                                                                    |
| <input type="radio"/> 5            | Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção                                                                                                                             |

S3 1,00

Voltar Continuar

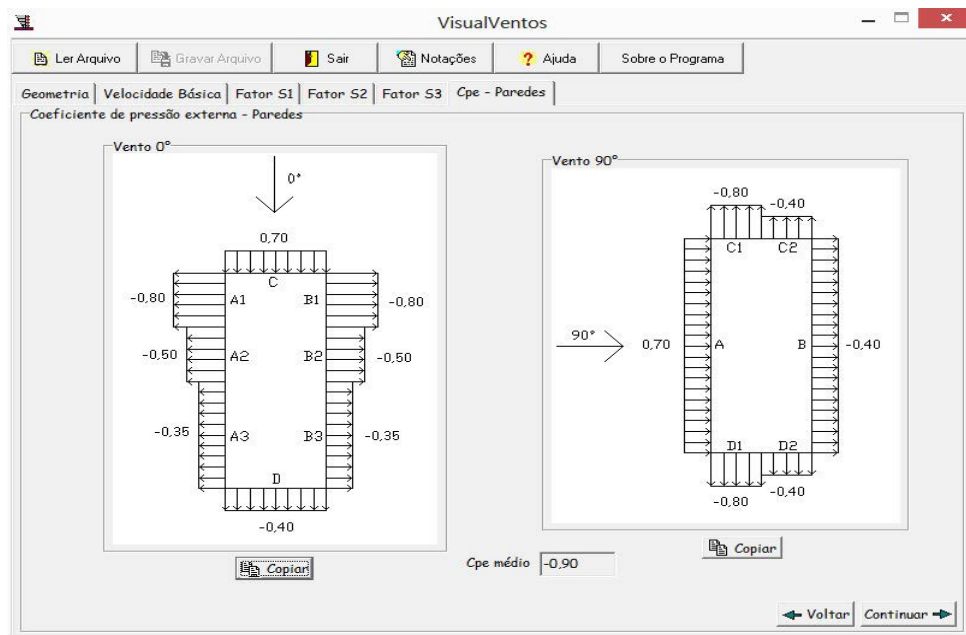
Fonte: VISUALVENTOS, 2007.

Desta forma, foi adotado para o projeto, como uma questão de segurança um alto fator de ocupação devido à possibilidade de utilização como uma instalação industrial com uma grande quantidade de funcionários atuando diariamente sob a instalação. Neste caso, classificado como Grupo 2, portanto, segundo a ABNT NBR 6123/88 o fator  $S_3$  é definido como 1,0.

Para a determinação do Coeficiente de Pressão Externa ( $C_{pe}$ ) nas paredes e no telhado, de acordo com a ABNT NBR 6123/88 são especificados os coeficientes de pressão para telhados do tipo duas águas, simétrico e base retangular.

Com isso, analisando os diagramas resultantes como mostra a Figura 14 e dois diagramas de pressão<sup>2</sup> para as reações nas paredes e no telhado do pórtico, respectivamente para ventos a 0° e 90°.

Figura 14 – Determinação do coeficiente de pressão externa nas paredes ( $C_{pe}$  - parede).



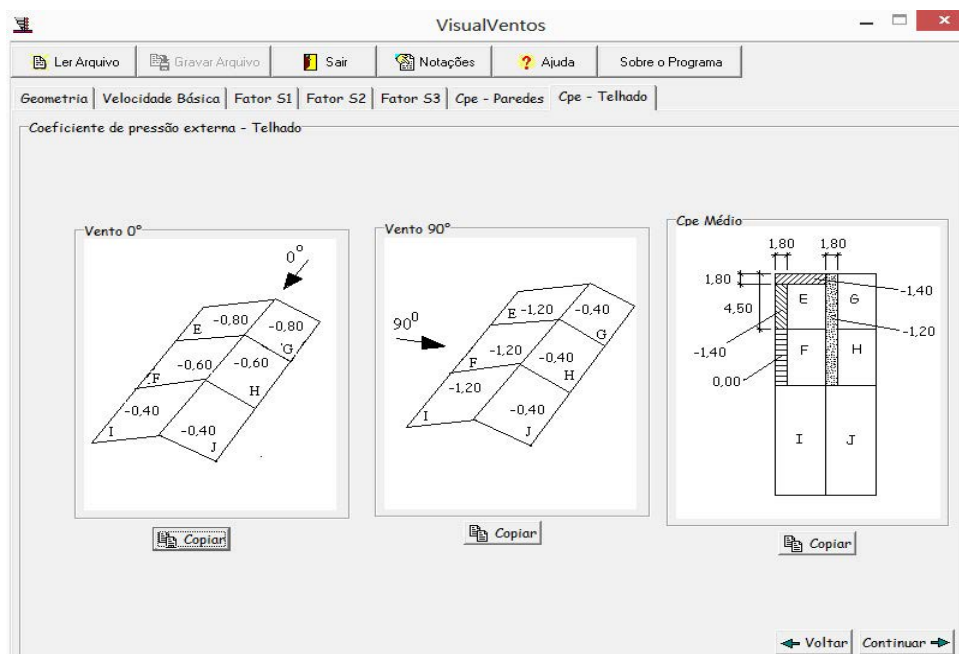
Fonte: VISUALVENTOS, 2007.

Segundo o programa, o coeficiente médio de pressão externa é dado como:  $C_{pe} = -0,90$ .

Este programa também oferece coeficientes de pressão externa atuantes no telhado, representando na Figura 15 as áreas mais prováveis de remoção das telhas devido à ação do vento em locais críticos.

<sup>2</sup> Diagramas de comportamento de um fluido (ar) conforme variações de pressão, como previsto por suas propriedades mecânicas. Dado na unidade Pa.



Figura 15 – Determinação do coeficiente de pressão externa no telhado (C<sub>Pe</sub> - telhado).

Fonte: VISUALVENTOS, 2007.

Para o cálculo do coeficiente de pressão interna ( $C_{Pi}$ ) são usadas as indicações do item 6.2 da ABNT NBR 6123/88, considerando os tapamentos laterais e frontais, assim como a cobertura do galpão composto de chapas trapezoidais e desprezando aberturas, tanto fixas quanto móveis em qualquer uma das faces do galpão obtém-se valores específicos de  $C_{Pi}$  previstos no item 6.2.5 da NBR 6123/88 citada. Caso os valores de aberturas sejam conhecidos, é possível obter valores de  $C_{Pi}$  mais próximos utilizando o Anexo D da NBR 6123/88.

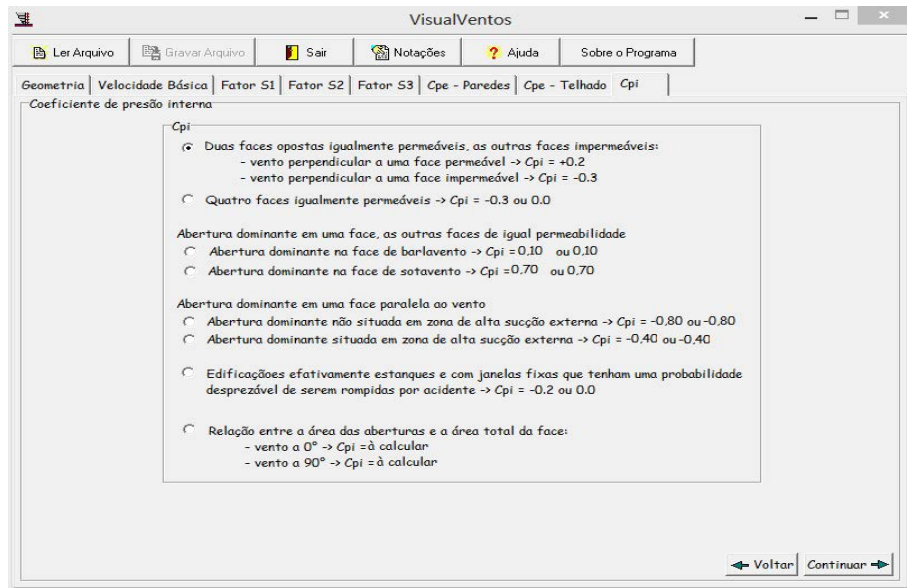
Para o caso em análise consideraremos a opção mostrada na Figura 16.

Sendo elas relacionadas à duas faces opostas igualmente permeáveis e as outras impermeáveis. Isto é, segundo a ABNT NBR 6123/88 são considerados impermeáveis as faces que obstruem a passagem do ar por elementos construtivos e vedações, por exemplo paredes de alvenaria ou concreto, consideradas permeáveis as faces com presença de janelas, frestas de portas, ventilação em telhado, vãos abertos em geral.

Portanto, tem-se duas possibilidades a serem estudadas segundo esse ponto de vista,

Uma das possibilidades é considerando o vento na direção perpendicular à face permeável e a outra considerando o vento perpendicular à face impermeável.

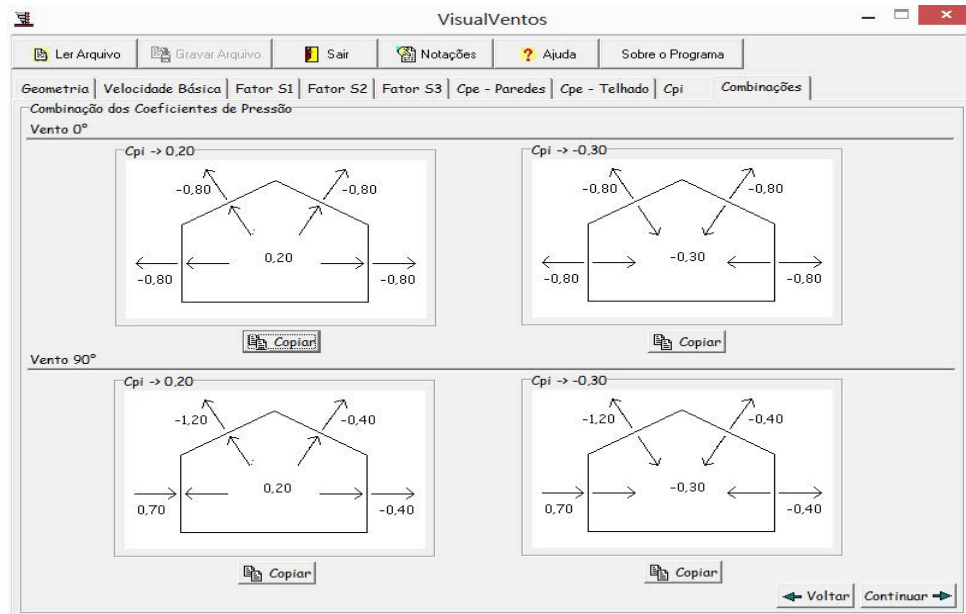
Figura 16 - Determinação do coeficiente de pressão interna ( $C_{pi}$ ).



Fonte: VISUALVENTOS, 2007.

O resultado da análise gerada pelo software representa as 4 combinações mostradas na Figura 17, sendo elas referentes aos valores de  $C_{pi}$  de +0,2 e -0,3, mostrados anteriormente combinados com a possibilidade do vento estar na direção do pórtico segundo um ângulo de  $0^\circ$  e outras duas opções para os mesmos valores de  $C_{pi}$  para o ângulo de  $90^\circ$ .

Figura 17 - Demonstração da combinação dos coeficientes de pressão

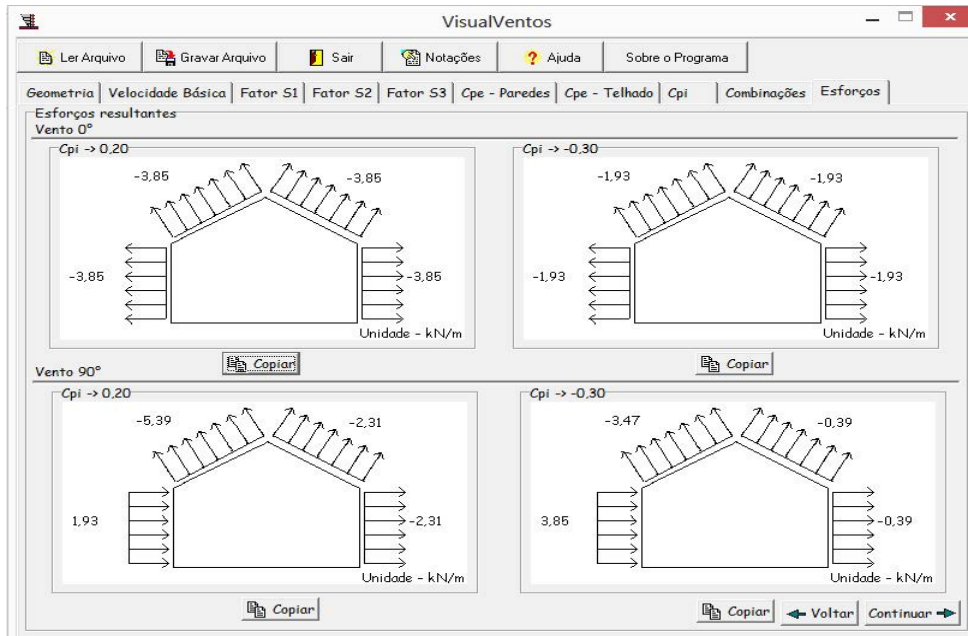


Fonte: VISUALVENTOS, 2007.

Devido à atuação das forças, serão considerados apenas as combinações cujos esforços são mais críticos para as análises futuras. Sendo eles os relacionados ao  $C_{pi} = 0,20$ .

Sendo assim, os esforços resultantes da força do vento estão demonstrados segundo a Figura 18.

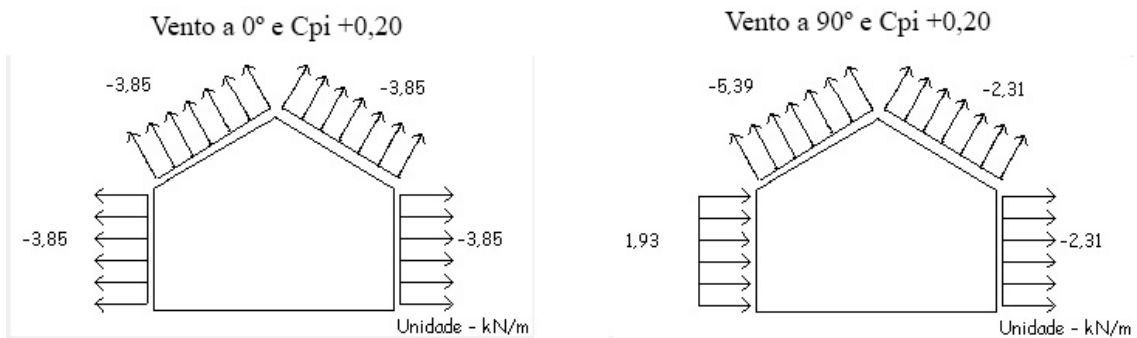
Figura 18 - Demonstração dos esforços resultantes devido à ação do vento



Fonte: VISUALVENTOS, 2007.

As situações cujos esforços são mais solicitantes são aquelas de  $C_{pi} = +0,20$  como citado anteriormente. Sendo assim, não usaremos as configurações com  $C_{pi} = -0,30$ , dessa forma, a representação dos esforços para o projeto está representado na Figura 19.

Figura 19 - Esforços resultantes devido à ação do vento.



Fonte: VISUALVENTOS, 2007.

Por convenção os valores com sinais negativos representam forças que estão no sentido de dentro para fora do pórtico, e os sinais positivos representam forças de fora para dentro.

Portanto:

$$C_{Pe} = - 0,90$$

Coeficiente de pressão interno:

$$C_{Pi 1} = 0,20$$

$$C_{Pi 2} = - 0,30$$

### 3.1.2 Cálculo da velocidade característica de vento ( $V_k$ )

Para calcular a velocidade característica do vento  $V_k$ , é preciso multiplicar a velocidade básica do vento  $V_0$  pelos fatores topográfico  $S_1$ , de rugosidade  $S_2$ , e estatístico  $S_B$ , segundo o item 4.2 b) da ABNT NBR 6123/88,

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_B \quad (6)$$

$$V_k = 40,00 \times 1,00 \times 0,89 \times 1,00$$

$$V_k = 35,46 \text{ m/s}$$

### 3.1.3 Cálculo da pressão dinâmica (q)

Segundo o item 4.2 c) da ABNT NBR 6123/88, em condições normais de temperatura e pressão<sup>3</sup> a pressão dinâmica do vento é dada por:

$$q = 0,613 \times V_k^2 \quad (7)$$

$$q = 0,613 \times 35,46^2$$

$$q = 0,77 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

---

<sup>3</sup> Temperatura 15°C e pressão 1 atm, sendo  $q = \frac{1}{2} \rho V_k^2$  e dadas as condições  $\rho = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

### 3.1.4 Cálculo da ação acidental no telhado ( $F_{Q_{LK}}$ )

Na ausência de especificações mais rigorosas, para o caso de ações em telhados é considerado, segundo o item B.5.1 do anexo B da ABNT NBR 8800:2008, o valor mínimo admitido é de  $0,25\text{kN/m}^2$  em projeção horizontal, linearmente distribuída sobre o pórtico.

Sendo assim,  $0,25\text{ kN/m}^2 \times 5\text{m} = 1,25\text{kN/m}$

### 3.1.5 Cálculo da ação permanente ( $F_{G_{LK}}$ )

Para chegar a um valor base de ações permanentes atuando na estrutura, será feita as seguintes estipulações segundo (PRAVIA, DREHMER, JÚNIOR, 2010), considerando o peso próprio dos materiais a seguir como:

Telhas:  $0,10\text{ kN/m}^2$

Contraventamentos:  $0,05\text{ kN/m}^2$

Terças e tirantes:  $0,10\text{ kN/m}^2$

Vigas e colunas:  $0,20\text{ kN/m}^2$

Sendo assim, o conjunto com toda a soma do peso próprio como carga permanente

Carga total permanente:

$$0,10 + 0,05 + 0,10 + 0,20 = \frac{0,45\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Considerando a carga linearmente distribuída sobre o pórtico tem-se:

$0,45\text{ kN/m}^2 \times 5\text{m} = 2,25\text{ kN/m}$

### 3.1.6 Cálculo da combinação de estados-limites últimos

Com base no item 2.4.1.5, tem-se 3 hipóteses a serem consideradas em termos de combinação de ações:

- A **hipótese 1** se refere à combinação da ação permanente ( $F_{G_{LK}}$ ) com a ação variável, sendo esta a ação acidental do telhado  $F_{Q_{LK}}$ .
- A **hipótese 2** se refere à combinação da ação permanente ( $F_{G_{LK}}$ ) com a ação variável, sendo esta a ação do vento perpendicular à face da estrutura ( $0^\circ$ )  $F_{w,k}$ , como  $F_{Q_{LK}}$

- A **hipótese 3** se refere à combinação da ação permanente ( $F_{GLK}$ ) com a ação variável, sendo esta a ação do vento paralela à face da estrutura ( $90^\circ$ )  $F_{w,k}$ , como  $F_{Q1k}$

Segundo o Quadro 3, para a combinação da hipótese 1, o coeficiente de ponderação  $\gamma_G = 1,25$  para o caso de combinações normais e referente ao peso próprio de estruturas metálicas e  $\gamma_Q = 1,5$  devido à ações variáveis incluindo as decorrentes do uso e ocupação, ambos para combinações normais de esforços.

Utilizando a equação (2) com os valores obtidos no Quadro 3, tem-se:

Para a hipótese 1:

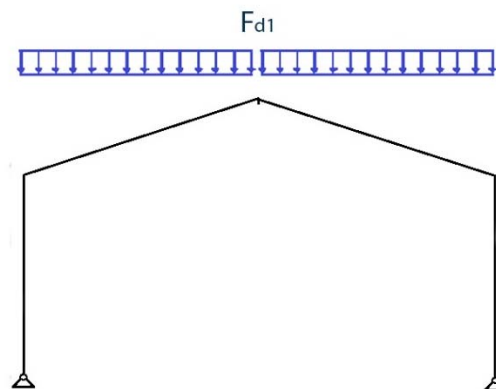
$$F_{d,1} = \gamma_{G1} F_{G1,k} + \gamma_{Q1} F_{Q1,k} \quad (8)$$

$$F_{d,1} = (1,25)F_{G1,k} + (1,5) F_{Q1,k}$$

$$F_{d,1} = (1,25)(2,7) + (1,5)(1,5) = 4,68 \frac{kN}{m}$$

A localização da força resultante da combinação foi ilustrado na Figura 20.

Figura 20 Representação das ações combinadas na hipótese 1.



Fonte: O autor.

Sendo o  $F_{GL,k}$  a ação permanente atuante sobre a estrutura obtido no item 3.1.5 e  $F_{Q1,k}$  a ação acidental no telhado obtido no item 3.1.4.

Segundo a ABNT NBR 8800:2008, para ações que favorecem a estrutura, usamos um coeficiente de  $\gamma = 1,0$ , para obter um mínimo de favorecimento, ou seja. Temos resultados de combinações mais críticas.

Para o caso observado nas hipóteses 2 e 3, no qual a ação permanente do peso próprio é uma ação contrária à ação do vento. Portanto para  $F_{GL,k}$  tem-se um coeficiente de ponderação

$\gamma_G = 1,0$ . E segundo o Quadro 4, para o coeficiente  $\gamma_F = 1,4$  devido a ação variável de vento, obtidas segundo a Figura 19.

Para o cálculo das ações resultantes da combinação, é preciso decompor  $F_{w,k}$  nos eixos x e y, uma vez que a ação permanente se encontra somente no eixo y, as ações no eixo x não sofrerão o efeito da combinação, sendo assim terão somente seu fator ampliado pelo coeficiente de ponderação para ação variável. A localização da forças resultantes da combinação foi ilustrado na Figura 21.

Para a hipótese 2:

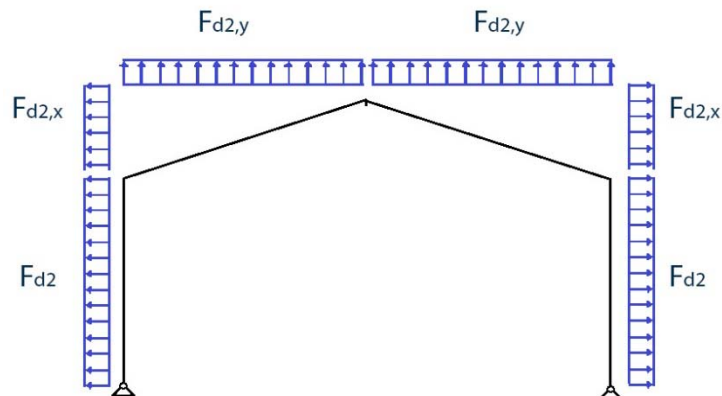
$$F_{d,2} = \gamma_{G1} F_{G1,k} - \gamma_{Q1} F_{w,k} \quad (9)$$

$$F_{d,2,y} = (1,00)(2,25) - (1,4)(3,85 \cdot \cos 10^\circ) = -3,05 \frac{kN}{m}$$

$$F_{d,2,x} = (1,4)(3,85 \cdot \sin 10^\circ) = 0,94 \frac{kN}{m}$$

$$F_{d,2} = -(1,4)(3,85) = -5,39 \frac{kN}{m}$$

Figura 21 Representação das ações combinadas na hipótese 2.



Fonte: O autor.

Para a hipótese 3:

$$F_{d,3} = \gamma_{G1} F_{G1,k} - \gamma_{Q1} F_{w,k}$$

$$F_{d,3,y2} = (1,00)(2,25) - (1,4)(7,31 \cdot \cos 10^\circ) = -0,93 \frac{kN}{m}$$

$$F_{d,3,y1} = (1,00)(2,25) - (1,4)(5,39 \cdot \cos 10^\circ) = -5,18 \frac{kN}{m}$$

$$F_{d,3,x1} = -(1,4)(5,39 \cdot \sin 10^\circ) = -1,31 \frac{kN}{m}$$

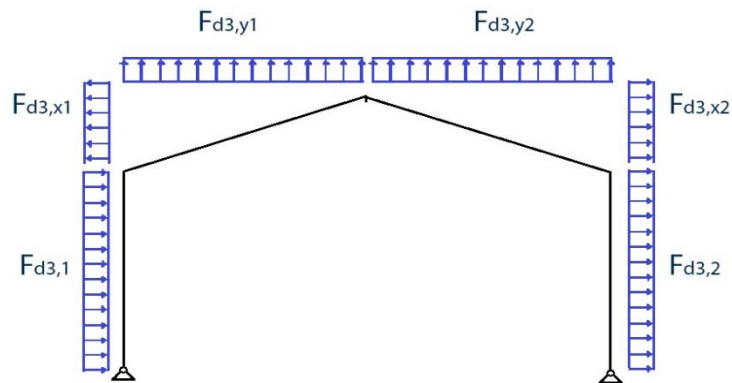
$$F_{d,s_{x1}} = -(1,4)(2,31 \cdot \sin[10^\circ]) = -0,56 \frac{kN}{m}$$

$$F_{d,s_{z1}} = (1,4)(1,93) = 2,70 \frac{kN}{m}$$

$$F_{d,s_{z2}} = (1,4)(2,31) = \frac{3,23 kN}{m}$$

A localização das forças resultantes da combinação foi ilustrado na Figura 22.

Figura 22 Representação das ações combinadas na hipótese 3.



Fonte: O autor.

### 3.1.7 Cálculo da Força nocional ( $F_n$ )

É uma força que considera os efeitos de deslocabilidade entre os níveis superior e inferior do galpão. Sendo esta força horizontal considerada equivalente a 0,3% do valor das cargas gravitacionais de cálculo.

$$F_n = 0,003 F_{d,z} \times L_v \quad (10)$$

$$F_n = 0,003 \left( \frac{4,58 kN}{m} \right) (12m) = 0,17 kN$$

### 3.2 PRÉ AVALIAÇÃO DOS PERFIS

Para a pré definição das colunas utilizamos as relações segundo Bellei (2006), em que é avaliado galpões sem pontes rolantes. Para pré aceitação do perfil é feita a verificação da altura dos perfis da coluna, ela deve compreender entre os valores H/20 e H/30. Já para a altura dos perfis da viga devem estar compreendidas entre L/50 e L/70.



Sendo assim para altura das colunas:

$$\frac{L}{20} = \frac{4500}{20} = 225$$

$$\frac{L}{30} = \frac{4500}{30} = 150$$

E para a altura das vigas tem-se:

$$\frac{L_v}{50} = \frac{12000}{50} = 240$$

$$\frac{L_v}{70} = \frac{12000}{70} = 171,4$$

Portanto, será adotado a família de perfis W200, pois estão dentro as especificações apresentadas, selecionando os perfis W200x26,6 e W200x19,3 para colunas e vigas respectivamente para o estudo, pois estão dentro do critério adotado anteriormente, segundo Bellei (2004), assim como qualquer outro perfil W200.

Deve se levar em consideração que não necessariamente os perfis que oferecem o melhor desempenho e menor peso ofereceram também o melhor custo benefício, uma vez que há a necessidade de avaliar a disponibilidade dos fornecedores e demais custos de transporte e montagem os valores precisam ser avaliados no total para a escolha final do perfil utilizado.

### 3.3 ANÁLISE DAS COLUNAS.

Nesta seção será avaliada as reações da coluna para o perfil pré selecionado, segundo pode ser acompanhado utilizando o fluxograma de base conforme Anexo B, dessa forma é possível dimensionar e direcionar as análises conforme a sequência sugerida segundo Pravia (2010).

#### 3.3.1 Análise da esbeltez:





Segundo item 5.3.4 da ABNT NBR8800:2008 a relação entre o comprimento de flambagem por flexão e o raio de giração não deve ser superior a 200.

$$\frac{KL}{r} \leq 200$$

Sendo o K o coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados, L o comprimento do perfil e r é o raio de giração.

Segundo a Tabela E.1 do Anexo E da ABNT NBR8800:2008 representada no Quadro 9, a relação dos coeficientes de flambagem por flexão para os diferentes tipos de travamento usualmente adotados.

Quadro 9 - Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |      |      |     |     |     |     |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem | (a)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | (b)  | (c)  | (d) | (e) | (f) |     |
|                                                        | Valores teóricos de $K_x$ ou $K_y$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,5  | 0,7  | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 |
|                                                        | Valores recomendados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,65 | 0,80 | 1,2 | 1,0 | 2,1 | 2,0 |
| Código para condição de apoio                          |  Rotação e translação impedidas<br> Rotação livre, translação impedida<br> Rotação impedida, translação livre<br> Rotação e translação livres |      |      |     |     |     |     |

Fonte: ABNT NBR 8800:2008.

Porém, segundo o item E.2.1.2 da ABNT NBR 8800:2008, para elementos contraventados o valor de K deve ser tomado como igual a 1,0 para ambas as direções x e y.

Para o raio de giração utilizamos a tabela de bitolas fornecida pela GERDAU de acordo com o perfil adotado W200x26,6 com as propriedades do perfil está disponível no Anexo A

Portanto:

$$\frac{K_x L}{r_x} = \frac{L}{r_x} = \frac{4500}{87,8} = 51,5 \leq 200$$

$$\frac{K_y L}{r_y} = \frac{L}{r_y} = \frac{4500}{31,0} = 145 \leq 200$$

Observamos que os resultados obtidos estão condizentes com o esperado nível de esbeltez do perfil, uma vez que atendem as especificações

Para avaliarmos a capacidade de compressão segundo o a Tabela F1 do Anexo F da ABNT NBR8800:2008 representada no Anexo D seguimos a relação para seção I, grupo 2, elemento AA e mesa de seção I, grupo 4, elemento AL, respectivamente:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Onde  $E$  é o módulo de elasticidade e  $f_y$  é a resistência do aço ao escoamento.

Assim:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{205000}{345}} = 36,32 \quad \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,56 \sqrt{\frac{205000}{345}} = 13,65$$

Para o perfil W200X26,6, segundo Anexo A:

$h_w$  representa o elemento  $d'$  na tabela de bitolas GERDAU.

$t_w$  é a espessura da alma

$b_f$  é a largura da mesa.

$t_f$  é a espessura da mesa.

Logo, para o

$$\frac{b}{t} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{170}{5,8} = 29,34 < 36,32$$

$$\frac{b}{t} = \frac{(b_f/2)}{t_f} = \frac{(133/2)}{8,4} = 7,92 < 13,65$$

Onde  $b$  e  $t$  são a largura e espessura do elemento, respectivamente como representada no Anexo C.

Segundo o item F1.2 do Anexo F da ABNT NBR 8800:2008 para os requisitos acima, uma vez aceitos, um Fator de redução total  $Q = 1,0$ .

### 3.3.2 Análise de flambagem

Para realizarmos a carga de flambagem elástica por torção para as colunas de perfis com simetria, segundo o item E.1.1 do Anexo E da ABNT NBR8800:2008, as equações para seções transversais em relação aos momentos de inércia  $x$  e  $y$  em relação ao eixo central e para o eixo longitudinal  $z$ , respectivamente.

$$N_{ox} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (11)$$

$$N_{oy} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (12)$$

$$N_{e,z} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_x L_x)^2} + GJ \right] \quad (13)$$

Onde:

$KL$  e  $I$  são o comprimento de flambagem por flexão e o momento de inércia, respectivamente, ambos em relação ao eixo subscrito;

$C_w$  é a constante de empenamento da seção transversal (cujo valor encontra-se na tabela de bitolas GERDAU no Anexo A;

$G$  é o módulo de elasticidade transversal do aço;

$J$  é a constante de torção da seção uniforme;

$r_0$  é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento.

Como já foi antes mencionado que o coeficiente de flambagem por flexão ( $K$ ) é para o nosso caso de estudo equivalente a 1,00, faremos os cálculos utilizando

$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2}$ . Como  $x_0$  e  $y_0$  são coordenadas do centro de cisalhamento em relação ao centro geométrico da seção. Como o perfil é simétrico  $x_0$  e  $y_0$  correspondem exatamente as coordenadas dos eixos centrais  $x$  e  $y$ , portanto  $x_0$  e  $y_0$  são ambos iguais a zero. Enquanto os valores de  $r_x$  e  $r_y$  são ambos encontrados na tabela de bitolas GERDAU contidas no Anexo A.

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

$$r_0 = \sqrt{87,3^2 + 31,0^2} = 92,64 \text{ mm}$$

$$N_{e,x} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 2,611 \cdot 10^7}{(4500)^2} = 2545,14 \text{ kN}$$

$$N_{e,y} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 3,3 \cdot 10^6}{(4500)^2} = 321,68 \text{ kN}$$

$$N_{e,z} = \frac{1}{92,64^2} \left[ \frac{\pi^2 \times 200000 \times 3,2477 \cdot 10^{10}}{(4500)^2} + 77000 \times 76500 \right] = 1055,24 \text{ kN}$$

### 3.3.3 Cálculo do índice de esbeltez

Segundo o item 5.3.3.2 da ANBT NBR 8800:2008, o índice de esbeltez reduzido  $\lambda_0$  é dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_s}} \quad (14)$$

Onde  $A_g$  é a área bruta da seção transversal, sendo  $A_g = 342 \text{ cm}^2$  segundo o Anexo A para o perfil adotado e  $N_s$  é o menor dos valores de força axial de compressão calculada anteriormente.

Portanto:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{1,00 \times 3420 \times 345}{321660}} = 1,915$$

Segundo o item 5.3.3.1 da ABNT NBR 8800:2008 para calcular o Fator de redução associado à resistência à compressão ( $\chi$ ) para a condição  $\lambda_0 > 1,5$  :

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (15)$$

Portanto:

$$\chi = \frac{0,877}{1,915^2} = 0,24$$

O Fator de redução é utilizado segundo o item 5.3.2 da ABNT NBR 8800:2008 para calcular a Força axial de compressão resistente de cálculo, dada por:

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

(16)

Onde  $\gamma_{a1}$  é o coeficiente de ponderação das resistências para flambagem com combinações normais, segundo o Quadro 5.

$$N_{s,Rd} = \frac{0,24 \times 1,00 \times 3420 \times 345}{1,1} = 257,43 \text{ kN}$$

### 3.3.4 Análise da capacidade de flexão

De acordo com a Tabela G.1 do Anexo G da ABNT NBR 8800:2008, representado no Anexo D, para seção I com dois eixos de simetria, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia, para o estado limite de flambagem lateral com torção (FLT):

Para o caso FLT, o Momento fletor correspondente ao início do escoamento ( $M_r$ ) e os Parâmetros de esbeltez ( $\lambda$ ,  $\lambda_y$  e  $\lambda_z$ ) dados nas equações (17), (18), (19) e (20):

$$M_r = (f_y - \alpha_r) W \quad (17)$$

$$\lambda_{FLT} = \frac{L_b}{r_y} \quad (18)$$

$$\lambda_p = 1,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (19)$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y / \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (20)$$

Sendo  $\lambda_p$  o Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação e  $\lambda_r$  correspondente ao início do escoamento.

Onde:

$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço.

$\sigma_r$  é a tensão residual de compressão nas mesas.

$C_w$  é a constante de empenamento da seção transversal.

$\beta_1$  é o coeficiente de dilatação térmica.

$I_y$  é o momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma.

$J$  é a constante de torção da seção uniforme

$r_y$  é o raio de giração de da seção em relação ao eixo principal de inércia.

Os valores de  $C_w$ ,  $I_y$ ,  $J$  e  $r_y$  são encontrados segundo o Anexo A

Para ao cálculo do coeficiente de dilatação térmica, tem-se:

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W_x}{E J} \quad (21)$$

Onde: W é o módulo de resistência (mínimo) elástico, relativo ao eixo de flexão, cujo valor se encontra no Anexo A.

Para o cálculo da tensão residual, de acordo com a Tabela 1 do Anexo G da ABNT NBR 8800: 2008, a tensão residual deve ser tomada como 30% da resistência ao escoamento.

Portanto:

$$\sigma_r = 0,3 f_y \quad (22)$$

$$\sigma_r = 0,3 \times 345 \cdot 10^6 = 103,5 \text{ MPa}$$

Substituindo os valores nas equações (17), (18), (19), (21) e (20), respectivamente, tem-se:

$$M_p = (345 - 103,5) 252300 = 60,93 \text{ kN.m}$$

$$\lambda = \frac{4500}{31,0} = 145,16$$

$$\lambda_y = 1,76 \sqrt{\frac{200000}{345}} = 42,38$$

$$\beta_1 = \frac{(345 - 103,5)252300}{200000 \times 76500} = 0,00398$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{3,3 \cdot 10^6 \times 76500}}{31,0 \times 76500 \times 0,00398} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \times 3,2477 \cdot 10^{10} \times 0,00398^2}{3,3 \cdot 10^6}}}$$

$$\lambda_r = 133,092$$

Como  $\lambda > \lambda_r$ , conforme indicado no item G.2.1.c) da ABNT NBR8800:2008 para calcular o Momento fletor resistente de cálculo ( $M_{rd}$ ), para este caso:

$$M_{rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (23)$$

Sendo  $M_{pl}$  o Momento fletor de plastificação da seção transversal, dado como o produto do módulo de resistência plástico (valor de Z é obtido no Anexo A) pela resistência ao escoamento do aço ( $f_y$ ), como mostrado na equação (24):

$$M_{pl} = Z \times f_y \quad (24)$$

$$M_{pl} = 282.300 \times 345 = 97,39 \text{ kN.m}$$

Sendo  $M_{cr}$  o momento fletor de flambagem elástica, dado por:

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

(25)

Sendo  $C_b$  o Fator de modificação para diagrama de momento fletor não linear, dado segundo o item 5.4.2.3.a) da ABNT NBR8800:2008 como:

$$C_b = \frac{M_{max}}{M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} R_m \leq 3,0$$

(25)

Onde:

$M_{max}$  é o valor do momento fletor máximo solicitante de cálculo, em módulo, no comprimento destravado;

$M_A$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda;

$M_B$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado;

$M_C$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda;

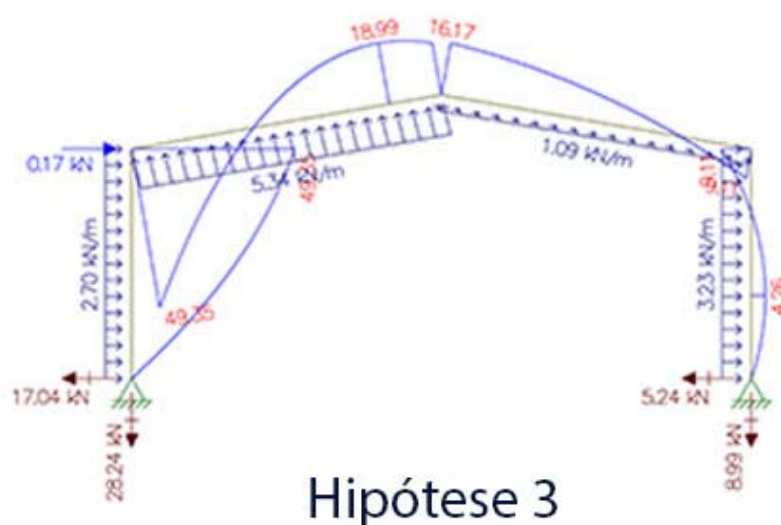
$R_m$  é um parâmetro de monossimetria da seção transversal, igual a  $0,5 + 2 \left( \frac{I_{yc}}{I_y} \right)^2$  para seções com um eixo de simetria, fletidas em relação ao eixo que não é de simetria, sujeitas à curvatura reversa, e igual a **1,00** em todos os demais casos;

$I_{yc}$  é o momento de inércia da mesa comprimida em relação ao eixo de simetria (como a curvatura é reversa, esse momento de inércia refere-se à mesa de menor momento de inércia);

Sendo assim, considerando a coluna com maior carga de momento solicitante (encontrada para a hipótese 3) para o cálculo, como sendo a viga da direita, podendo ser visto na

Figura 23, retirada do Anexo E, representando um momento máximo de 49,35 kN/m.

Figura 23 Diagrama de momentos solicitantes.





Portanto o Cálculo de ficará com as substituições assim:

$$C_b = \frac{12,5 \times 49,35}{2,5 \times 49,35 + 3 \times 42,14 + 4 \times 31,51 + 3 \times 17,46} \times 1,0$$

$$C_b = 1,44 < 3,0$$

Assim sendo, substituindo os valores na equação (25), podemos calcular o  $M_{cr}$ :

$$M_{cr} = \frac{1,44 \times \pi^2 \times 200000 \times 3,3 \cdot 10^6}{4500^2 \sqrt{\frac{3,2477 \cdot 10^{10}}{3,3 \cdot 10^6} \left(1 + 0,039 \frac{76500 \times 4500^2}{3,2477 \cdot 10^{10}}\right)}}$$

$$M_{cr} = 77,72 \text{ kN.m}$$

Portanto, substituindo os valores na equação (23), o Momento fletor resistente de cálculo ( $M_{rd}$ ), dado por:

$$M_{rd} = \frac{77,72}{1,1} \leq \frac{97,39}{1,1}$$

$$M_{rd} = 70,64, \leq 88,54$$

### 3.3.5 Verificação do estado limite para flambagem local da mesa (FLM)

#### Parâmetro de esbeltez:

Considerando a verificação para o caso FLM como mostrado no item 3.3.1

$$\lambda_{FLM} = \frac{b_f}{2t_f} \tag{27}$$

$$\lambda_{FLM} = \frac{133}{2 \times 8,4} = 7,92$$

#### Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação:

Segundo a tabela G.1 do Anexo G da ABNT NBR8800:2008, representada no Anexo D para seção I com dois eixos de simetria, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia, para o estado limite de flambagem local da mesa (FLM):

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \tag{28}$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{200.000}{345}} = 9,14$$

**Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:**

$$\lambda_p = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \quad (29)$$

Lembrando a tensão residual  $\sigma_r$  deve ser considerada igual à 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado. Como mostrada segundo a equação (22), tem-se:

$$\lambda_p = 0,83 \sqrt{\frac{200.000}{(345 - 0,3 \times 345)}} = 23,88$$

Como  $\lambda_{FLM} \leq \lambda_p$ , para calcular o Momento fletor resistente de cálculo ( $M_{FLM}$ ), utilizamos a equação (30), conforme indicado no item G.2.2 a) da ABNT NBR 8800:2008:

$$M_{FLM} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (30)$$

$$M_{FLM} = \frac{97,39}{1,10} = 88,54 \text{ kN.m}$$

### 3.3.6 Verificação do estado limite para flambagem em local da alma (FLA):

Segundo a tabela G.1 do anexo G da ABNT NBR8800:2008, para seção I com dois eixos de simetria, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia, para o estado limite de flambagem local da alma (FLA):

**Parâmetro de esbeltez:**

Considerando a verificação para o caso FLA como mostrado no item 3.3.1

$$\lambda_{FLA} = \frac{h_w}{t_w} \quad (31)$$

$$\lambda_{FLA} = \frac{170}{5,8} = 29,31$$

**Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação:**

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (32)$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{200.000}{345}} = 90,53$$

Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:

$$\lambda_{pr} = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (33)$$

$$\lambda_{pr} = 5,70 \sqrt{\frac{200.000}{345}} = 137,24$$

Segundo indicado no item G.2.2 a) da ABNT NBR 8800:2008, para o caso  $\lambda_{FLA} \leq \lambda_p$

$$M_{FLA} = \frac{M_{pt}}{\gamma_{ca}} \quad (34)$$

$$M_{FLA} = \frac{97,39}{1,10} = 88,54 \text{ kN.m}$$

Para calcular o momento fletor resistente de cálculo  $M_{rd}$  de acordo com o item 5.4.2.1. da ABNT NBR 8800:2008

O momento deve ser o mínimo entre os momentos encontrados:  $M_{FLF}$ ,  $M_{FLM}$ ,  $M_{FLA}$ .

Assim sendo,  $M_{rd} = 85,14$

### 3.3.7 Verificação da capacidade ao cisalhamento:

A verificação é feita segundo os procedimentos descritos no item 5.4.3 da ABNT NBR 8800:2008.

Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda_V = \frac{h}{i_{wv}} \quad (35)$$

$$\lambda_V = \frac{170}{5,8} = 29,31$$

Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação:

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{K_V E}{f_y}} \quad (36)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{5,0 \times 200.000}{345}} = 59,22$$

**Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:**

$$\lambda_{cr} = 1,37 \sqrt{\frac{K_y E}{f_y}} \quad (37)$$

$$\lambda_{cr} = 1,37 \sqrt{\frac{5 \times 200.000}{345}} = 73,76$$

Segundo o item 5.4.3.1.1 da ABNT NBR 8800:2008 Para as seções I fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma, para o caso  $\lambda_V \leq \lambda_{cr}$  :

$$V_{Ed} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{m1}} \quad (38)$$

Onde  $V_{pl}$  é a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento, obtida segundo o item 5.4.3.2 da ABNT NBR 8800:2008, conforme a equação (39):

$$V_{pl} = 0,60 A_w f_y \quad (39)$$

Onde  $A_w$  é a área efetiva de cisalhamento, devendo ser calculada como:

$$A_w = d t_w \quad (40)$$

Onde  $d$  é a altura total da seção transversal e  $t_w$  é a espessura da alma, ambos os valores encontrados no Anexo A:

Sendo assim, substituindo os valores na equação (40), tem-se:

$$A_w = 207 \times 5,8 = 1200,6 \text{ mm}^2$$

Assim sendo, para a equação (39), obtém-se a força cortante:

$$V_{pl} = 0,60 \times 1200,6 \times 345 = 248,52 \text{ kN}$$

### 3.3.8 Verificação para a combinação de esforços solicitantes:

Para tanto, segundo descrito no item 5.5.1.2 da ABNT NBR 8800:2008, para atuação simultânea da força axial de tração ou de compressão e de momentos fletores, deve ser obedecida a limitação fornecida pelas seguintes expressões de interação:

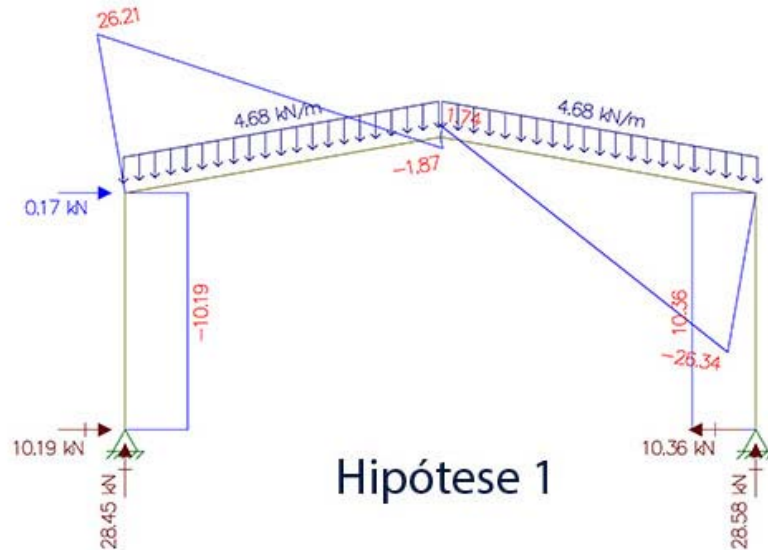
É preciso avaliar a relação  $\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}$ . Sendo:

$N_{Ed}$  é a força axial solicitante de cálculo de tração ou de compressão máxima obtida pela análise das 3 hipóteses. Sendo a máxima obtida através da hipótese 1, mostrada abaixo:

$N_{Rd}$  é a força axial resistente de cálculo de tração ou compressão obtida no item número 3.2.3 deste trabalho.

Conforme a Figura 24, retirada do Anexo E os esforços de cortante na estrutura para o caso da hipótese mais crítica.

Figura 24 Esforços de cortante na estrutura.



Fonte: FTOOL, 2015.

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} = \frac{26,34}{257,43} = 0,10$$

Sendo assim, para a  $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2$  tem-se:

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left( \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0$$

(41)

$$\frac{26,34}{2 \times 257,43} + \left( \frac{49,33}{70,64} \right) = 0,75 \leq 1,0$$

### 3.3.9 Verificação do Deslocamento Vertical e Lateral

O limite dado para o deslocamento segundo o Anexo C da ABNT NBR 8800:2008, a Tabela C.1 o máximo de deslocamento aceitável para vigas de cobertura é de  $L/250$ .

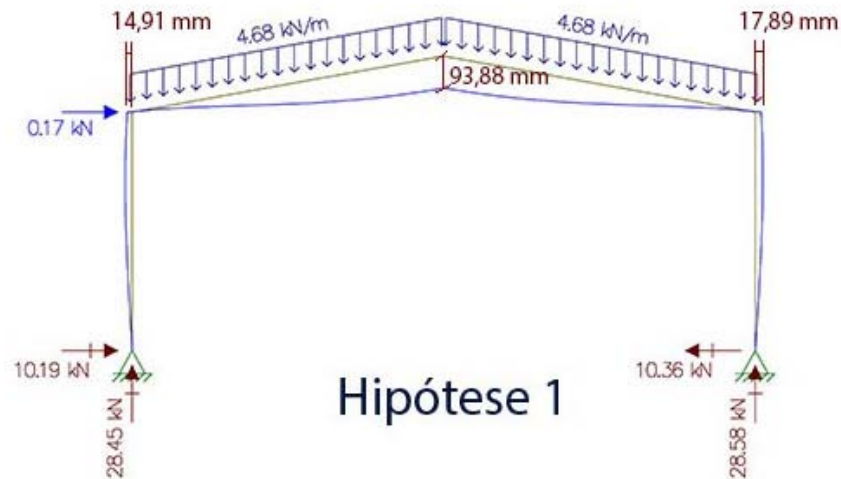
Sendo o máximo permitido para as vigas de cobertura é de  $12000/250 = 48$  mm.

Já para o estado limite de deformação horizontal para galpões em geral é usado a proporção  $1/300$  da altura da coluna em relação à base.

Sendo o máximo permitido para o deslocamento lateral é de  $4500/300 = 15$  mm.

Portanto, a análise do deslocamento lateral do pórtico deve ser considerada para a pior condição proposta, levando em consideração à condição de carregamento nominal do vento, como sendo a hipótese 1 avaliada anteriormente, neste caso representado pela Figura 25, retirada do Anexo E, com as deformações analisadas computacionalmente:

Figura 25 Deformações do pórtico



Fonte: FTOOL, 2015.

Considerando os deslocamentos, horizontais  $\delta_h$ , e verticais  $\delta_v$ , como mostrado na Figura 25, dado como:

$$\delta_h = 17,89 \text{ mm} > 15 \text{ mm}$$

$$\delta_v = 93,88 \text{ mm} > 48 \text{ mm}$$

$$\delta > \delta_{max} \square$$

### 3.4 VERIFICAÇÃO DOS CONTRAVENTAMENTOS DA COBERTURA.

A distância entre as terças deve ser baseada no tipo de cobertura a ser utilizada, e deve ser baseado segundo o fabricante de telhas de aço revestidas. Cujas fabricação se baseia nas normas ABNT NBR 14513 e ABNT NBR 14514.

Para os contraventamentos será utilizado o material Aço-carbono ASTM A36.

Segundo as propriedades estabelecidas na Tabela A.2 do Anexo A da ABNT NBR 8800:2008, Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural.

Assim, para esse material a resistência ao escoamento  $f_y$  igual a 250 MPa, e o limite de resistência  $f_u$  variando de 400 a 550 MPa, como fator de segurança será utilizado 400 MPa.

Assumindo uma distância entre as terças como  $l_c = 1,52 \text{ m}$

De acordo com o Quadro 6, tem-se  $L_{max} = 5,56 \text{ m}$  e  $l_{vp} = 5 \text{ m}$  é o vão longitudinal entre pórticos.

$q = 0,77 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$  segundo o item 3.1.3 deste trabalho.

Assim, a força de tração atuando na diagonal é obtida segundo a fórmula.

$$F_{TD} = 1,4 q l_c \left( \frac{L_{max}}{2} \right) \quad (42)$$

$$F_{TD} = 1,4 \times 0,77 \times 1,52 \times \left( \frac{5,56}{2} \right) = 4,56 \text{ kN}$$

A força diagonal do contraventamento é então obtida por:

$$N_{c,5d} = F_{TD} \frac{\sqrt{l_{vp}^2 + l_c^2}}{l_{vp}} \quad (43)$$

$$N_{c,5d} = 4,56 \times \frac{\sqrt{5^2 + 1,52^2}}{5} = 4,77 \text{ kN}$$

### 3.4.1 Verificação dos contraventamentos verticais

Considerando apenas um sistema treliçado cujo dimensionamento se dá somente à diagonal do contraventamento sob esforço de tração.

Desta forma, considerando o lado esquerdo do pórtico, a ação que atua nos eixos longitudinais

$$F_{diag} = 1,4 q \left( \frac{A_{trans}}{2} \right) \quad (44)$$

Sendo  $A_{trans}$  a área da seção transversal do pórtico, dada por:

$$A_{trans} = \frac{(5,56 + 4,5)}{2} \times 6 = 30,18 \text{ m}^2$$

$$F_{diag} = 1,4 \times 0,77 \times \left( \frac{30,18}{2} \right) = 16,27 \text{ kN}$$

Desse modo, a força aplicada na diagonal é:

$$N_{c,5d} = F_{diag} \frac{l_{diag}}{l_{vp}} \quad (45)$$

Sendo  $l_{diag}$  o comprimento da diagonal da lateral entre os pórticos, dada por:

$$l_{diag} = \sqrt{4,5^2 + 5^2} = 6,73 \text{ m}$$

Logo:#

$$N_{t,sd} = 16,27 \times \frac{6,73}{5} = 21,89 \text{ kN}$$

### 3.4.2 Análise do Contraventamento

Utilizando o valor mínimo de barra roscada recomendado pela ABNT NBR 8800:2008 de  $d_b = 12 \text{ mm}$  tem-se:

$$A_b = 0,25 \pi d_b^2 \quad (46)$$

$$A_b = 0,25 \pi 12^2 = 113 \text{ mm}^2$$

**Cálculo da resistência à tração pelo escoamento da seção maciça da barra:**

$$N_{t,sd} = \frac{A_b f_y}{1,1} \quad (47)$$

$$N_{t,sd} = \frac{113 \times 250}{1,1} = 25,68 \text{ kN}$$

**Cálculo da resistência à tração pela ruptura da seção na rosca:**

$$N_{t,sd} = \frac{0,75 A_b f_y}{1,35}$$

(48)

$$N_{t,sd} = \frac{0,75 \times 113 \times 400}{1,35} = 25,11 \text{ kN}$$

Verificando então que a capacidade do material é 5 vezes maior do que a carga de sollicitação para o caso do contraventamento de cobertura, e possui um fator 15% menor do que as cargas máximas admitidas para as sollicitações laterais.



#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Abaixo está o Quadro 10 com os resultados obtidos pela sequência de cálculos elaborada.

Quadro 10 - Agrupamento de resultados

| Nomenclatura                                                              | Símbolo       | Resultado              | Admissível |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------|------------|
| Fator topográfico                                                         | $S_t$         | 1,00                   |            |
| Fator de rugosidade                                                       | $S_z$         | 0,89                   |            |
| Fator estatístico                                                         | $S_n$         | 1,00                   |            |
| Coefficiente de pressão externa                                           | $C_{pe}$      | -0,90                  |            |
| Coefficiente de pressão interna                                           | $C_{pi}$      | 0,20                   |            |
| Velocidade básica de vento                                                | $V_o$         | 40 m/s                 |            |
| Velocidade característica do vento                                        | $V_k$         | 35,45 m/s              |            |
| Pressão dinâmica                                                          | q             | 0,77 kN.m <sup>2</sup> |            |
| Carga Permanente                                                          | $F_{GK}$      | 2,25 kN                |            |
| Carga acidental                                                           |               | 1,25 kN                |            |
| Força nocional                                                            | $F_n$         | 0,17 kN                |            |
| Capacidade de compressão AA                                               | $(b/t)_{lim}$ | 29,34                  | < 36,32    |
| Capacidade de compressão AL                                               | $(b/t)_{lim}$ | 7,92                   | < 13,65    |
| Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento | $r_o$         | 92,64 mm               |            |
| Carga de flambagem elástica em relação ao $I_x$                           | $N_{ex}$      | 2545,14 kN             |            |
| Carga de flambagem elástica em relação ao $I_y$                           | $N_{ey}$      | 321,68 kN              |            |
| Carga de flambagem elástica em relação ao J                               | $N_{eJ}$      | 1055,24 kN             |            |
| Fator de redução associado à resistência à compressão                     | $\chi$        | 0,24                   |            |
| Força axial de compressão resistente de cálculo                           | $N_{e,Rd}$    | 257,43 kN              |            |

(Continuação)

| Nomenclatura                                                        | Símbolo         | Resultado  | Admissível   |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------|------------|--------------|
| Momento fletor correspondente ao início do escoamento               | $M_y$           | 60,93 kN.m |              |
| Parâmetro de esbeltez (FLT)                                         | $\lambda_{FLT}$ | 145,16     |              |
| Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação (FLT)          | $\lambda_p$     | 42,38      |              |
| Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento (FLT)  | $\lambda_y$     | 133,092    |              |
| Coefficiente de dilatação térmica                                   | $\beta_1$       | 0,00398    |              |
| Momento fletor de plastificação da seção transversal                | $M_{pl}$        | 97,39 kN.m |              |
| Fator de modificação para diagrama de momento fletor não linear     | $C_b$           | 1,44       | < 3,0        |
| Momento fletor de flambagem elástica                                | $M_{cr}$        | 77,71      |              |
| Momento fletor resistente de cálculo                                | $M_{rd}$        | 70,64 kN.m | < 88,54 kN.m |
| Parâmetro de esbeltez (FLM)                                         | $\lambda_{FLM}$ | 7,92       |              |
| Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação (FLM)          | $\lambda_p$     | 9,14       |              |
| Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento (FLM)  | $\lambda_y$     | 23,88      |              |
| Momento fletor resistente de cálculo (FLM)                          | $M_{FLM}$       | 88,54 kN.m |              |
| Parâmetro de esbeltez (FLA)                                         | $\lambda_{FLA}$ | 29,31      |              |
| Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação (FLA)          | $\lambda_p$     | 90,53      |              |
| Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento (FLA)  | $\lambda_y$     | 137,24     |              |
| Momento fletor resistente de cálculo (FLA)                          | $M_{FLA}$       | 88,54 kN.m |              |
| Parâmetro de esbeltez (cisalhamento)                                | $\lambda_v$     | 29,31      |              |
| Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação (cisalhamento) | $\lambda_p$     | 59,22      |              |

(Continuação)

| Nomenclatura                                                                | Símbolo                 | Resultado             | Admissível |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------|------------|
| Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento (cisalhamento) | $\lambda_r$             | 73,76                 |            |
| Cortante correspondente à plastificação                                     | $V_{pt}$                | 248,52 kN             |            |
| Força cortante resistente de cálculo                                        | $V_{Rd}$                | 225,93 kN             |            |
| Relação de atuação simultânea                                               | $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}}$ | 0,10                  |            |
| Relação de atuação simultânea                                               | equação (41)            | 0,75                  | < 1,0      |
| Deformação horizontal                                                       |                         | 17,89 mm              | < 15 mm    |
| Deformação vertical                                                         |                         | 93,88                 | < 48 mm    |
| Força de tração atuando na diagonal                                         | $F_{TD}$                | 4,56 kN               |            |
| Força diagonal do contraventamento de cobertura                             | $N_{c,Sd}$              | 4,70 kN               | < 25,68 kN |
| Área da seção transversal do pórtico                                        | $A_{trans}$             | 30,18 mm <sup>2</sup> |            |
| Ação que atua nos eixos longitudinais                                       | $F_{diago}$             | 16,27 kN              |            |
| Força diagonal do contraventamento verticais                                | $N_{c,Sd}$              | 21,89 kN              | < 25,68 kN |
| Resistência à tração pelo escoamento da seção maciça#                       | $N_{c,Sd}$              | 25,68 kN              |            |
| Resistência à tração pela ruptura da seção na rosca#                        | $N_{c,Sd}$              | 25,11 kN              |            |

Fonte: Elaborado pela autora.

Levando em consideração os cálculos feitos para item 3.2, foi realizado com base na coluna com esforços mais críticos e estes foram eficientemente adequados para garantir a estabilidade do perfil W200X26 adotado (não havendo necessidade de cálculo para as demais colunas). Porém, levando em consideração aos esforços estabelecidos na estrutura devido às combinações críticas de peso próprio mais a carga acidental os resultados demonstraram um comportamento para a análise de deslocamento desfavorável para as hipóteses 1 e 3 como é possível observar segundo o Anexo E. Isto se deve ao elevado peso próprio pré adotado para a estrutura, para o caso de um projeto real, após dimensionamento dos elementos estruturas,

deva-se estabelecer novamente uma análise das cargas permanente da estrutura referente materiais escolhidos (aceitos no pré – dimensionamento como mostra os cálculos), sendo assim obter valores condizentes com os valores reais aplicados à estrutura. Só então deve se considerar as deformações como relevantes para análise.

Porém, para estudo utilizamos os valores adotados pré-estabelecidos segundo Pravia (2010), como reais para a análise da deformação, dessa forma observamos deformações de grandezas consideráveis.

Para o caso das vigas e terças, as mesmas considerações e passos devem ser seguidos para a avaliação do perfil, como foi feito para o caso das colunas. Por esta razão não será descrito estes cálculos segundo o estudo elaborado neste trabalho. Lembrando que para o caso de projeto, todos os passos e esforços devem ser considerados e analisados segundo a norma, utilizando as verificações necessárias para colunas, vigas e terças utilizadas.

Contudo, os valores obtidos nos cálculos nos dão indicação de que as vigas e colunas em estudo foram selecionadas buscando a eficiência máxima (valores aceitáveis para a avaliação do perfil), ou seja, quanto mais os valores se aproximam de 1,0. Dessa forma foi possível obter valores aceitáveis de dimensionamento para o perfil. Porém, não significam, segundo a ABNT NBR 8800:2008 que a estrutura está demonstrando a estabilidade necessária para o devido carregamento e demais combinações últimas consideradas, sendo preciso passar também pelo critério de análise das deformações. Dessa forma, podendo indicar perfis mais robustos visando o atendimento dos limites de deslocabilidade recomendados na ABNT NBR 8800:2008.

Portando é possível sugerir que, para o projeto adotado, como foi possível avaliar, é necessário um estudo do deslocamento como fator limitante de cálculo, ou seja, recomenda-se que se inicie após da pré definição dos perfis, como foi elaborado segundo item 3.2, dessa forma, utilizando por meio computacional uma avaliação dos deslocamentos horizontais e verticais para os perfis pré adotados, assim é possível ter uma estimativa de quais perfis ofereceriam resistência adequada e cujas características e propriedades sejam compatíveis com o projeto, Após análise seria então selecionado os elementos estruturais mais solicitantes para dimensionamento das colunas, vigas e terças, buscando dimensionamentos econômicos cujos passos para a verificação eficiência dimensional foi demonstrado, conforme a ABNT NBR 8800:2008 para os elementos estruturais isolados no estudo.

## 5 CONCLUSÕES

Foi elaborado um projeto, como proposto, utilizando as recomendações e restrições da norma de forma a instruir sobre a análise dos elementos estruturais da construção proposta, sugerir uma sequência de passos e análises para o elemento mais crítico selecionado seguindo também a recomendação sobre a análise das deformações efetivas como critério de aceitação dos perfis adotados.

Foi orientado que para a escolha final do perfil deva ser feita com base nos cálculos e especificações que considerem não somente as análises dos elementos estruturais adotados, assim como a consideração sobre os esforços gerados por análises de combinações de esforços, considerando a situação mais crítica para a construção, sendo assim, recomendando a mudança de perfil até que encontre um perfil ideal para resistência mecânica e eficiente estabilidade estrutural, demonstrado a partir de métodos especificados na ABNT NBR 8800:2008.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devida ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estrutura de aço e estrutura mista de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

BELLEI, I. H. Galpões industriais em aço. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1998. 489 p.

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O.; **Edifícios de múltiplos andares em aço**. São Paulo: Pini, 2004. 454p.

BLAT. **Estruturas metálicas**. Disponível em: <<http://www.blatestruturasmetalicas.com.br/conteudo/conteudo.asp?id=6>>. Acesso em: 14.out.2014.

CBCA: Centro Brasileiro de Construção em Aço. **Construções em Aço: Sustentabilidade**. Disponível em <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-sustentabilidade.php>> Acesso em 28.mar.2016

D'ALAMBERT, F. Gerdau Açominas: **Galpões em pórticos com perfis estruturais laminados**, 3ª ed, 2005. v.3, 56p.

DIAS, R. H. **Importância e interferência da concepção dos subsistemas verticais em edifícios altos na arquitetura**. Arquitectos, ano 05, dez. 2004. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitectos/05.055/520>>. Acesso em: 02.dez.2014.

ESTRUTURA de concreto I: **Introdução à segurança das estruturas**. Disponível em: <<http://www.lem.ep.usp.br/pef2303/PEF2303%20Seguranca.pdf>>. Acesso em: 09.dez.2014.

FTOOL, versão 3.0 Tecgraf/PUC – Rio 2015. **Instituto de desenvolvimento de software técnico-científico**. Disponível em: < <http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/ftool/>> Acesso em: 17.abr.2016.

GALPÕES Líder, **Estruturas Metálicas e pré-moldados**. Disponível em: < <http://www.galpoeslider.com.br/galpaosimples.html>> Acesso em: 17.abr.2016.

GILANI, N.: **Desvantagens das estruturas metálicas**. Disponível em:<[http://www.ehow.com.br/desvantagens-estruturas-metalicas-lista\\_16091/](http://www.ehow.com.br/desvantagens-estruturas-metalicas-lista_16091/)>. Acesso em: 02.set.2014.

HONORATO, C. **Comunidade ciência e cultura**. Disponível em<<http://stoa.usp.br/carlosd/files/-/14325/Luz+constru%C3%A7%C3%A3o.JPG>> Acesso em: 17.abr.2016.

IINABA, R. **Construções Metálicas: O uso do aço na construção civil**. Portal metálica. Disponível em:<<http://www.metalica.com.br/construcoes-metalicas-o-uso-do-aco-na-construcao-civil>>. Acesso em: 18.nov.2014.

INSTITUTO aço Brasil, Governo Federal. Disponível em:<<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/instituto/associadas--csn.asp>> Acesso em: 20.ago.2014.

Leonardi: **Design Inovadores** <<http://www.leonardi.com.br/media/images/galerias/metallico-588.jpg>> Acesso em: 20.mar.2016.

MARTINS, C. H. DEC-4930 – **Estruturas Metálicas**. Maringá, 2010. 36p.

MERIGO, J. A.; RADIN, M.; BURTET, C.: **Coberturas Metálicas**, 2012. Disponível em :<<http://trabalhocc2-grupo4.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 17.mar.2016

PORTAL METALICA. **Recomendações para Elaboração de Projetos Estruturais de Edifícios em Aço**. Disponível em:<[http://www.metalica.com.br/pg\\_dinamica/bin/pg\\_dinamica.php?id\\_pag=740](http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=740)> Acesso em 30.mar.2016.

PORTAL METALICA. **Tipos de aço e perfis para estrutura metálica de edifícios**. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/tipos-de-aco-e-perfis-para-estrutura-metalica-de-edificios>> Acesso em: 30.mar.2016.

PRAVIA, C. M. Z.; DREHMER, A. G.; JÚNIOR, M. E. **Galpões para usos gerais**. 4ª ed. Rio de Janeiro, 2010. 76 p.

SITE engenharia: **O portal do construtor**. Disponível em:<<http://www.sitengenharia.com.br/metallicasvantagens.htm>>. Acesso em 02.out.2014.

VISUALVENTOS, versão 2.0.[S.I]: FEAR Universidade de Passo Fundo, 2008. Disponível em:<[http://www.ertools.upf.br/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=1&Itemid=20](http://www.ertools.upf.br/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=1&Itemid=20)> Acesso em: 17.abr.2016.



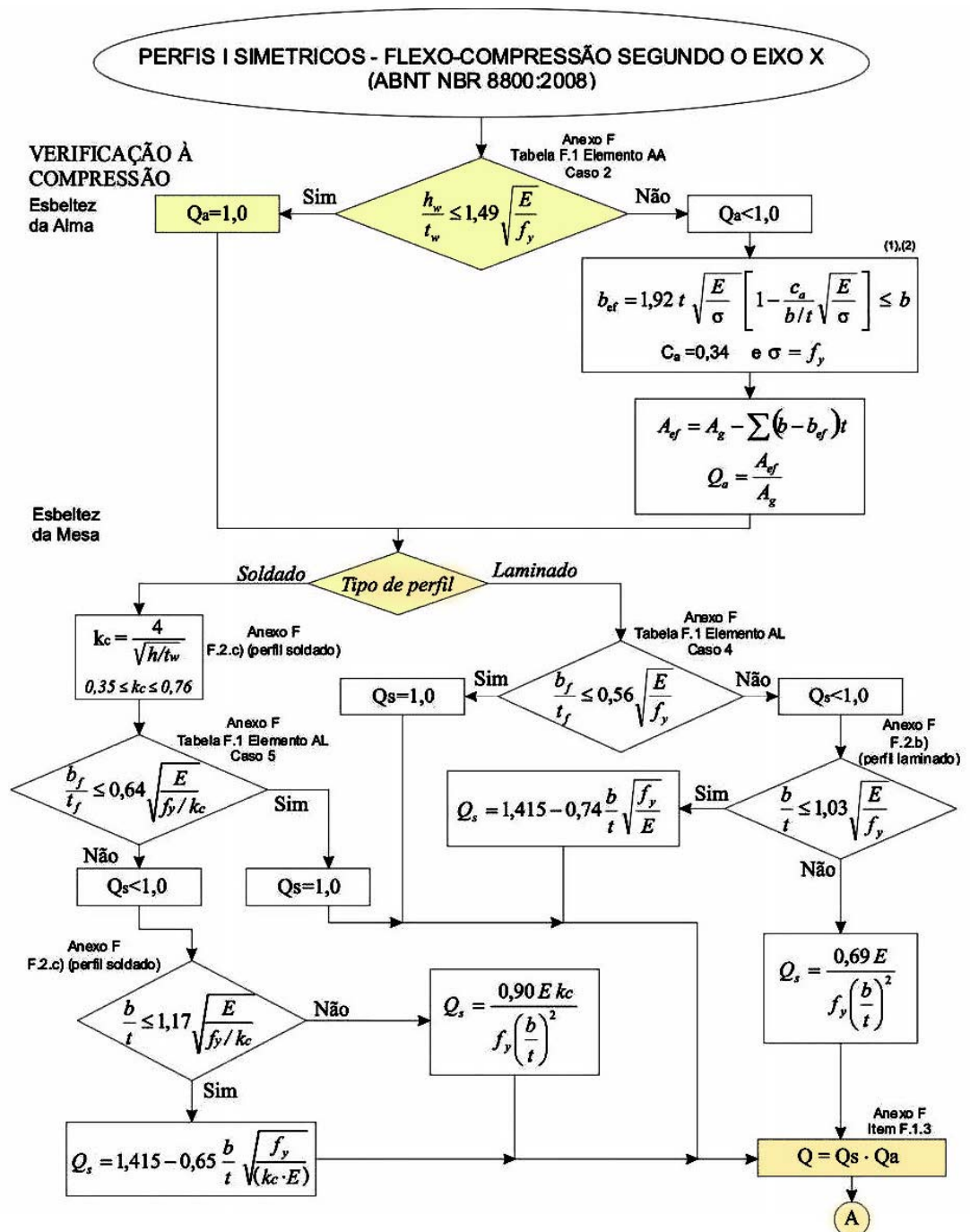
## ANEXO A

| PERFIS I<br>BITOLA | Massa<br>Linear<br>Kg/m | d<br>mm | b <sub>1</sub><br>mm | Espessura            |                      | h<br>mm | d'<br>mm | Área <sub>3</sub><br>cm <sup>2</sup> | EIXO X - X                        |                                   |                      |                                   |
|--------------------|-------------------------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|----------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
|                    |                         |         |                      | t <sub>w</sub><br>mm | t <sub>f</sub><br>mm |         |          |                                      | I <sub>x</sub><br>cm <sup>4</sup> | W <sub>x</sub><br>cm <sup>3</sup> | r <sub>x</sub><br>cm | Z <sub>x</sub><br>cm <sup>3</sup> |
| W 150 x 13,0       | 13,0                    | 148     | 100                  | 4,3                  | 4,9                  | 138     | 118      | 16,6                                 | 635                               | 85,8                              | 6,18                 | 96,4                              |
| W 150 x 18,0       | 18,0                    | 153     | 102                  | 5,8                  | 7,1                  | 139     | 119      | 23,4                                 | 939                               | 122,8                             | 6,34                 | 139,4                             |
| W 200 x 15,0       | 15,0                    | 200     | 100                  | 4,3                  | 5,2                  | 190     | 170      | 19,4                                 | 1.305                             | 130,5                             | 8,20                 | 147,9                             |
| W 200 x 19,3       | 19,3                    | 203     | 102                  | 5,8                  | 6,5                  | 190     | 170      | 25,1                                 | 1.686                             | 166,1                             | 8,19                 | 190,6                             |
| W 200 x 22,5       | 22,5                    | 206     | 102                  | 6,2                  | 8,0                  | 190     | 170      | 29,0                                 | 2.029                             | 197,0                             | 8,37                 | 225,5                             |
| W 200 x 26,6       | 26,6                    | 207     | 133                  | 5,8                  | 8,4                  | 190     | 170      | 34,2                                 | 2.611                             | 252,3                             | 8,73                 | 282,3                             |
| W 200 x 31,3       | 31,3                    | 210     | 134                  | 6,4                  | 10,2                 | 190     | 170      | 40,3                                 | 3.168                             | 301,7                             | 8,86                 | 338,6                             |
| W 250 x 17,9       | 17,9                    | 251     | 101                  | 4,8                  | 5,3                  | 240     | 220      | 23,1                                 | 2.291                             | 182,6                             | 9,96                 | 211,0                             |
| W 250 x 22,3       | 22,3                    | 254     | 102                  | 5,8                  | 6,9                  | 240     | 220      | 28,9                                 | 2.939                             | 231,4                             | 10,09                | 267,7                             |
| W 250 x 25,3       | 25,3                    | 257     | 102                  | 6,1                  | 8,4                  | 240     | 220      | 32,6                                 | 3.473                             | 270,2                             | 10,31                | 311,1                             |
| W 250 x 28,4       | 28,4                    | 260     | 102                  | 6,4                  | 10,0                 | 240     | 220      | 36,6                                 | 4.046                             | 311,2                             | 10,51                | 357,3                             |
| W 250 x 32,7       | 32,7                    | 258     | 146                  | 6,1                  | 9,1                  | 240     | 220      | 42,1                                 | 4.937                             | 382,7                             | 10,83                | 428,5                             |
| W 250 x 38,5       | 38,5                    | 262     | 147                  | 6,6                  | 11,2                 | 240     | 220      | 49,6                                 | 6.057                             | 462,4                             | 11,05                | 517,8                             |
| W 250 x 44,8       | 44,8                    | 266     | 148                  | 7,6                  | 13,0                 | 240     | 220      | 57,6                                 | 7.158                             | 538,2                             | 11,15                | 606,3                             |
| W 310 x 21,0       | 21,0                    | 303     | 101                  | 5,1                  | 5,7                  | 292     | 272      | 27,2                                 | 3.776                             | 249,2                             | 11,77                | 291,9                             |
| W 310 x 23,8       | 23,8                    | 305     | 101                  | 5,6                  | 6,7                  | 292     | 272      | 30,7                                 | 4.346                             | 285,0                             | 11,89                | 333,2                             |
| W 310 x 28,3       | 28,3                    | 309     | 102                  | 6,0                  | 8,9                  | 291     | 271      | 36,5                                 | 5.500                             | 356,0                             | 12,28                | 412,0                             |
| W 310 x 32,7       | 32,7                    | 313     | 102                  | 6,6                  | 10,8                 | 291     | 271      | 42,1                                 | 6.570                             | 419,8                             | 12,49                | 485,3                             |
| W 310 x 38,7       | 38,7                    | 310     | 165                  | 5,8                  | 9,7                  | 291     | 271      | 49,7                                 | 8.581                             | 553,6                             | 13,14                | 615,4                             |
| W 310 x 44,5       | 44,5                    | 313     | 166                  | 6,6                  | 11,2                 | 291     | 271      | 57,2                                 | 9.997                             | 638,8                             | 13,22                | 712,8                             |
| W 310 x 52,0       | 52,0                    | 317     | 167                  | 7,6                  | 13,2                 | 291     | 271      | 67,0                                 | 11.909                            | 751,4                             | 13,33                | 842,5                             |

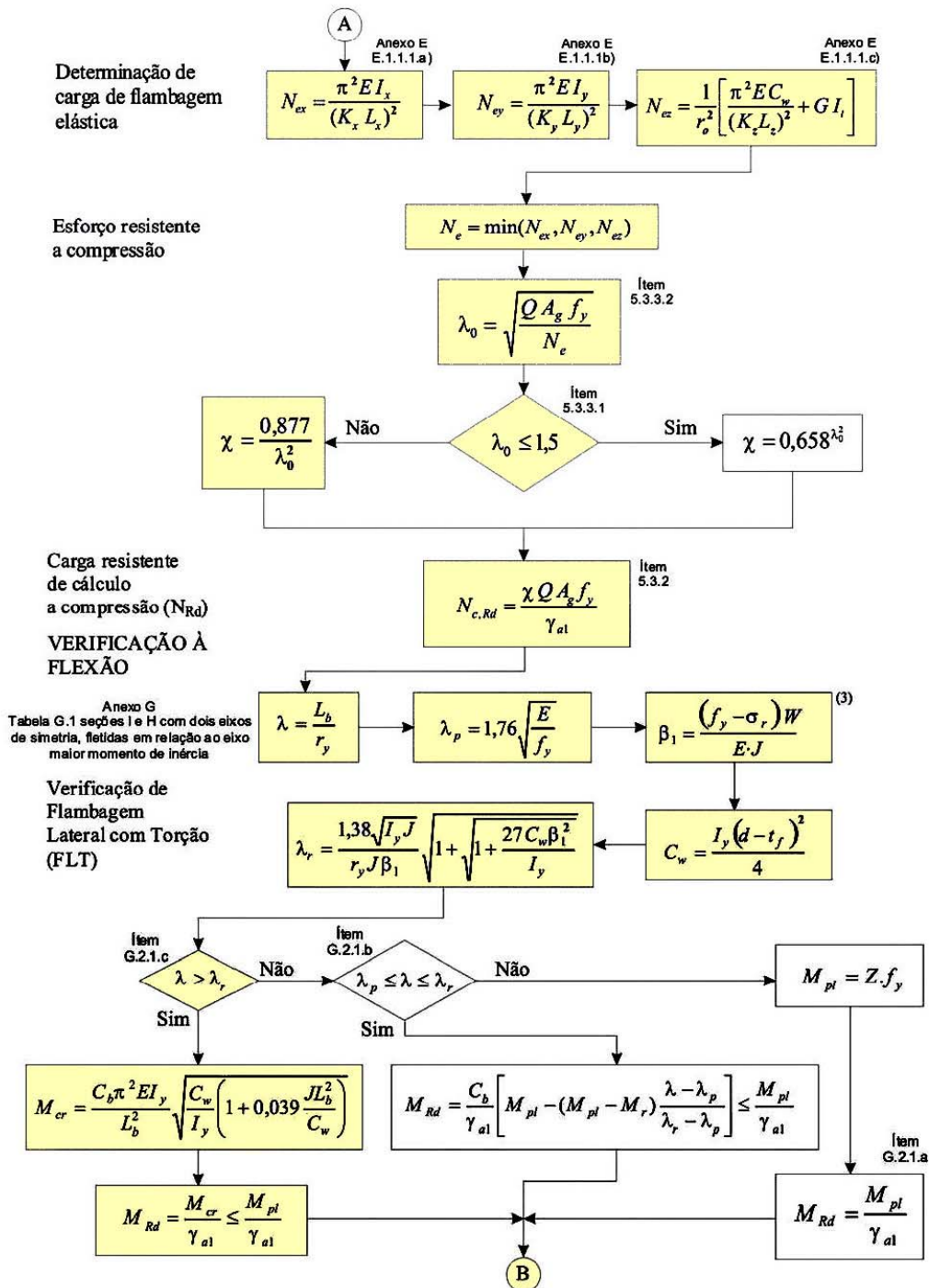
  

| EIXO Y - Y                        |                                   |                      |                                   | r <sub>y</sub><br>cm | I <sub>y</sub><br>cm <sup>4</sup> | ESBELTEZ                                                 |                                              | C <sub>w</sub><br>cm <sup>6</sup> | u<br>m <sup>2</sup> / m | BITOLA       |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------|
| I <sub>y</sub><br>cm <sup>4</sup> | W <sub>y</sub><br>cm <sup>3</sup> | r <sub>y</sub><br>cm | Z <sub>y</sub><br>cm <sup>3</sup> |                      |                                   | ABA - λ <sub>1</sub><br>b <sub>1</sub> / 2t <sub>1</sub> | ALMA - λ <sub>2</sub><br>d' / t <sub>w</sub> |                                   |                         |              |
| 82                                | 16,4                              | 2,22                 | 25,5                              | 2,60                 | 1,72                              | 10,20                                                    | 27,49                                        | 4.181                             | 0,67                    | W 150 x 13,0 |
| 126                               | 24,7                              | 2,32                 | 38,5                              | 2,69                 | 4,34                              | 7,18                                                     | 20,48                                        | 6.683                             | 0,69                    | W 150 x 18,0 |
| 87                                | 17,4                              | 2,12                 | 27,3                              | 2,55                 | 2,05                              | 9,62                                                     | 39,44                                        | 8.222                             | 0,77                    | W 200 x 15,0 |
| 116                               | 22,7                              | 2,14                 | 35,9                              | 2,59                 | 4,02                              | 7,85                                                     | 29,31                                        | 11.098                            | 0,79                    | W 200 x 19,3 |
| 142                               | 27,9                              | 2,22                 | 43,9                              | 2,63                 | 6,18                              | 6,38                                                     | 27,42                                        | 13.868                            | 0,79                    | W 200 x 22,5 |
| 330                               | 49,6                              | 3,10                 | 76,3                              | 3,54                 | 7,65                              | 7,92                                                     | 29,34                                        | 32.477                            | 0,92                    | W 200 x 26,6 |
| 410                               | 61,2                              | 3,19                 | 94,0                              | 3,60                 | 12,59                             | 6,57                                                     | 26,50                                        | 40.822                            | 0,93                    | W 200 x 31,3 |
| 91                                | 18,1                              | 1,99                 | 28,8                              | 2,48                 | 2,54                              | 9,53                                                     | 45,92                                        | 13.735                            | 0,88                    | W 250 x 17,9 |
| 123                               | 24,1                              | 2,06                 | 38,4                              | 2,54                 | 4,77                              | 7,39                                                     | 37,97                                        | 18.629                            | 0,89                    | W 250 x 22,3 |
| 149                               | 29,3                              | 2,14                 | 46,4                              | 2,58                 | 7,06                              | 6,07                                                     | 36,10                                        | 22.955                            | 0,89                    | W 250 x 25,3 |
| 178                               | 34,8                              | 2,20                 | 54,9                              | 2,62                 | 10,34                             | 5,10                                                     | 34,38                                        | 27.636                            | 0,90                    | W 250 x 28,4 |
| 473                               | 64,8                              | 3,35                 | 99,7                              | 3,86                 | 10,44                             | 8,02                                                     | 36,03                                        | 73.104                            | 1,07                    | W 250 x 32,7 |
| 594                               | 80,8                              | 3,46                 | 124,1                             | 3,93                 | 17,63                             | 6,56                                                     | 33,27                                        | 93.242                            | 1,08                    | W 250 x 38,5 |
| 704                               | 95,1                              | 3,50                 | 146,4                             | 3,96                 | 27,14                             | 5,69                                                     | 28,95                                        | 112.398                           | 1,09                    | W 250 x 44,8 |
| 98                                | 19,5                              | 1,90                 | 31,4                              | 2,42                 | 3,27                              | 8,86                                                     | 53,25                                        | 21.628                            | 0,98                    | W 310 x 21,0 |
| 116                               | 22,9                              | 1,94                 | 36,9                              | 2,45                 | 4,65                              | 7,54                                                     | 48,50                                        | 25.594                            | 0,99                    | W 310 x 23,8 |
| 158                               | 31,0                              | 2,08                 | 49,4                              | 2,55                 | 8,14                              | 5,73                                                     | 45,20                                        | 35.441                            | 1,00                    | W 310 x 28,3 |
| 192                               | 37,6                              | 2,13                 | 59,8                              | 2,58                 | 12,91                             | 4,72                                                     | 41,12                                        | 43.612                            | 1,00                    | W 310 x 32,7 |
| 727                               | 88,1                              | 3,82                 | 134,9                             | 4,38                 | 13,20                             | 8,51                                                     | 46,66                                        | 163.728                           | 1,25                    | W 310 x 38,7 |
| 855                               | 103,0                             | 3,87                 | 158,0                             | 4,41                 | 19,90                             | 7,41                                                     | 41,00                                        | 194.433                           | 1,26                    | W 310 x 44,5 |
| 1.026                             | 122,9                             | 3,91                 | 188,8                             | 4,45                 | 31,81                             | 6,33                                                     | 35,61                                        | 236.422                           | 1,27                    | W 310 x 52,0 |

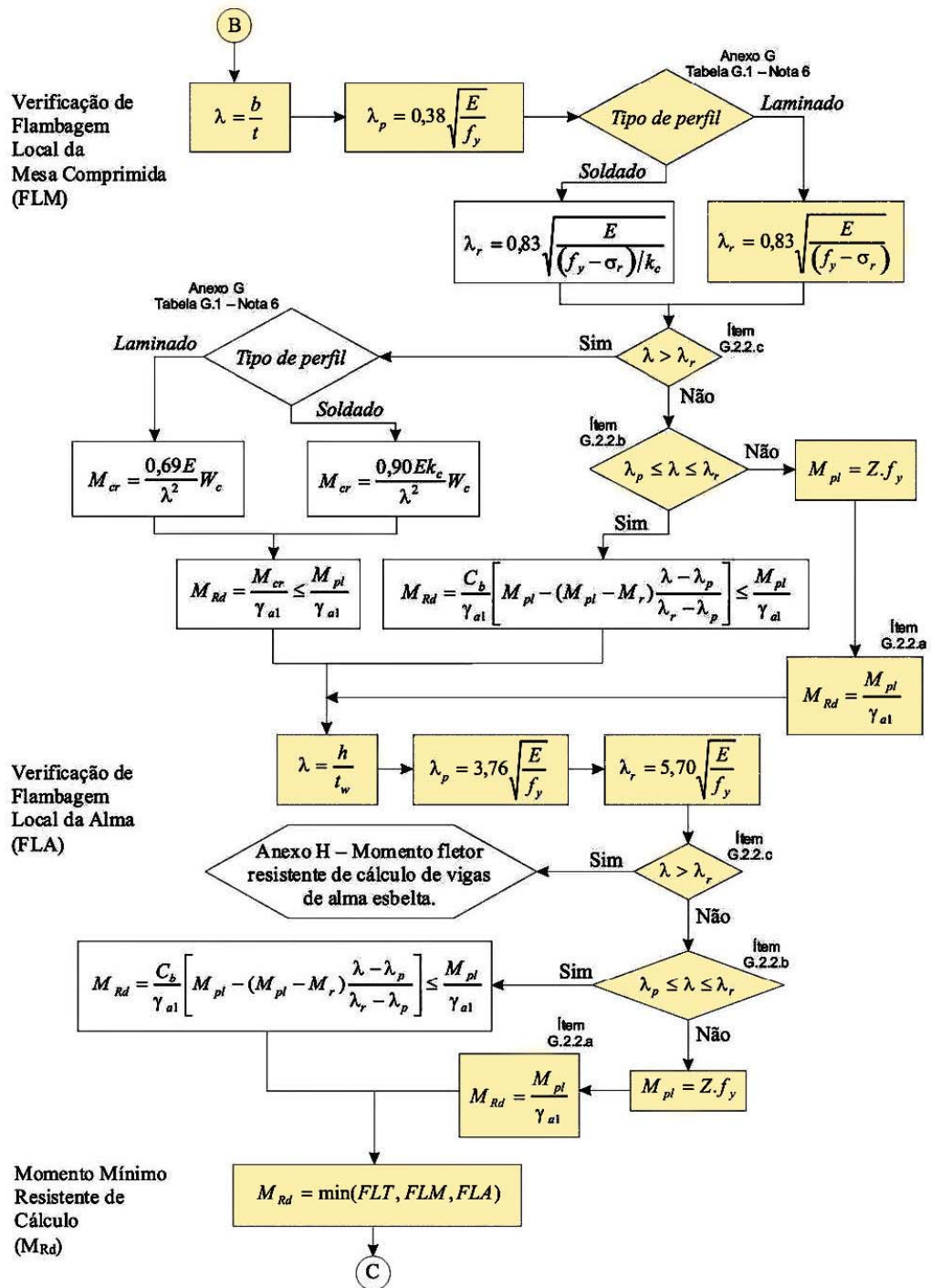
ANEXO B

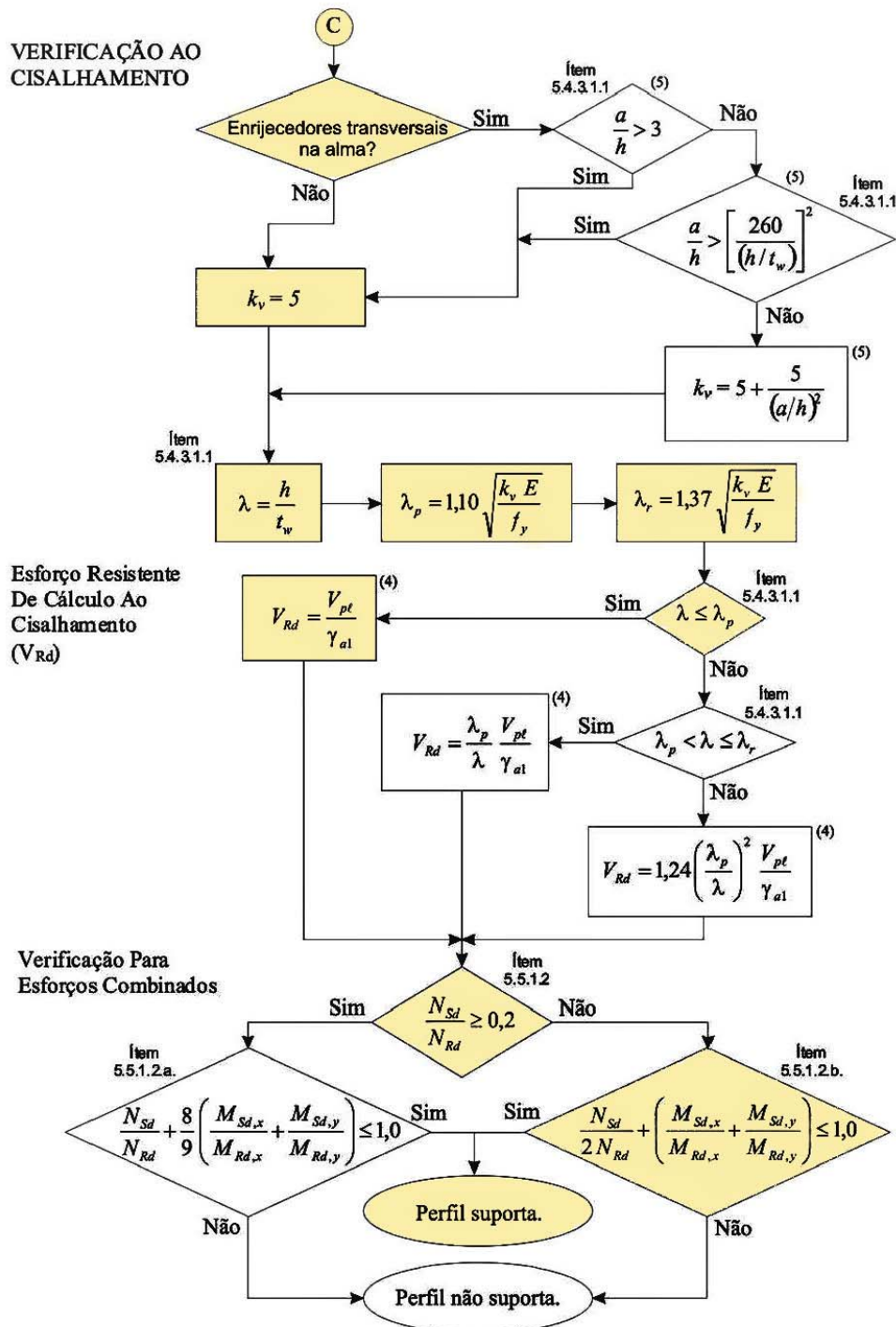


- (1) =  $C_a$  é um coeficiente, igual a 0,38 para mesas ou almas de seções tubulares retangulares e 0,34 para todos os outros elementos;
- (2) =  $\sigma$  é a tensão que pode atuar no elemento analisado, tomada igual a  $\sigma = \chi f_y$ , com  $\chi$  obtido conforme 5.3.3, adotando Q igual a 1,0. Opcionalmente, de forma conservadora, pode-se tomar  $\sigma = f_y$ .



(3) = Segundo a Nota 5 da Tabela G.1 do Anexo G, o valor de  $\sigma_r$ , tensão residual de compressão nas mesas, deve ser tomada igual a 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado.





(4)  $V_{pl}$  é a força cortante correspondente à plastificação da(s) alma(s) por cisalhamento, dada por  $V_{pl} = 0,60 A_w f_y$ , onde  $A_w = d \cdot t_w$ ;

(5) a é a distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores transversais adjacentes;  
h é a altura livre da alma entre mesas;  
t<sub>w</sub> é a espessura da(s) alma(s).

## ANEXO C

ABNT NBR 8800:2008

Tabela F.1 — Valores de  $(b/t)_{lim}$ 

| Elementos | Grupo | Descrição dos elementos                                                                                                                                                                                                                                                        | Alguns exemplos com indicação de $b$ e $t$ | $(b/t)_{lim}$                     |
|-----------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| AA        | 1     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mesas ou almas de seções tubulares retangulares</li> <li>Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas</li> </ul>                                                                                                  |                                            | $1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$       |
|           | 2     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Almas de seções I, H ou U</li> <li>Mesas ou almas de seção-caixão</li> <li>Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1</li> </ul>                                                                                              |                                            | $1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$       |
| AL        | 3     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travessamento</li> </ul>                                                                                                                                                 |                                            | $0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$       |
|           | 4     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mesas de seções I, H, T ou U laminadas</li> <li>Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas</li> <li>Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas</li> </ul> |                                            | $0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$       |
|           | 5     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mesas de seções I, H, T ou U soldadas<sup>a</sup></li> </ul>                                                                                                                                                                            |                                            | $0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$ |
|           | 6     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Almas de seções T</li> </ul>                                                                                                                                                                                                            |                                            | $0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$       |

<sup>a</sup> O coeficiente  $k_c$  é dado em F.2.

## ANEXO D

ABNT NBR 8800:2008

Tabela G.1 — Parâmetros referentes ao momento fletor resistente

| Tipo de seção e eixo de flexão                                                                                                                   | Estados-limites aplicáveis | $M_r$                                                 | $M_{cr}$                                | $\lambda$                   | $\lambda_p$                                                                                                | $\lambda_r$                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia     | FLT                        | $(f_y - \sigma_r)W$<br>Ver Nota 5                     | Ver Nota 1                              | $\frac{L_b}{r_y}$           | $1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$                                                                                | Ver Nota 1                      |
|                                                                                                                                                  | FLM                        | $(f_y - \sigma_r)W$<br>Ver Nota 5                     | Ver Nota 6                              | $\frac{b}{t}$<br>Ver Nota 8 | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$                                                                                | Ver Nota 6                      |
|                                                                                                                                                  | FLA                        | $f_y W$                                               | Viga de alma esbelta (Anexo H)          | $\frac{h}{t_w}$             | $3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$                                                                                | $5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$     |
| Seções I e H com apenas um eixo de simetria situado no plano médio da alma, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia (ver Nota 9) | FLT                        | $(f_y - \sigma_r)W_c$<br>$\leq f_y W_t$<br>Ver Nota 5 | Ver Nota 2                              | $\frac{L_b}{r_{yc}}$        | $1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$                                                                                | Ver Nota 2                      |
|                                                                                                                                                  | FLM                        | $(f_y - \sigma_r)W_c$<br>Ver Nota 5                   | Ver Nota 6                              | $\frac{b}{t}$<br>Ver Nota 8 | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$                                                                                | Ver Nota 6                      |
|                                                                                                                                                  | FLA                        | $f_y W$                                               | Viga de alma esbelta (Anexo H)          | $\frac{h_c}{t_w}$           | $\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}}$<br>$\left( \frac{0,54 M_{pt}}{M_r} - 0,09 \right)^2 \leq \lambda_r$ | $5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$     |
| Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia                                       | FLM<br>Ver Nota 3          | $(f_y - \sigma_r)W$                                   | Ver Nota 6                              | $\frac{b}{t}$<br>Ver Nota 8 | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$                                                                                | Ver Nota 6                      |
|                                                                                                                                                  | FLA<br>Ver Nota 3          | $f_y W_{ef}$<br>Ver Nota 4                            | $\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$<br>Ver Nota 4  | $\frac{h}{t_w}$             | $1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$                                                                                | $1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$     |
| Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia                                                              | FLT                        | $f_y W$                                               | $\frac{2,00 C_b E \sqrt{J A}}{\lambda}$ | $\frac{L_b}{r_y}$           | $\frac{0,13 E \sqrt{J A}}{M_{pt}}$                                                                         | $\frac{2,00 E \sqrt{J A}}{M_r}$ |
| Seções-caixão e tubulares retangulares, duplamente simétricas, fletidas em relação a um dos eixos de simetria que seja paralelo a dois lados     | FLT<br>Ver Nota 7          | $(f_y - \sigma_r)W$<br>Ver Nota 5                     | $\frac{2,00 C_b E \sqrt{J A}}{\lambda}$ | $\frac{L_b}{r_y}$           | $\frac{0,13 E \sqrt{J A}}{M_{pt}}$                                                                         | $\frac{2,00 E \sqrt{J A}}{M_r}$ |
|                                                                                                                                                  | FLM                        | $f_y W_{ef}$<br>Ver Nota 4                            | $\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$<br>Ver Nota 4  | $\frac{b}{t}$<br>Ver Nota 8 | $1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$                                                                                | $1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$     |
|                                                                                                                                                  | FLA                        | $f_y W$                                               |                                         | $\frac{h}{t_w}$             | Ver Nota 10                                                                                                | $5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$     |

As Notas relacionadas à Tabela G.1 são as seguintes:

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

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

onde:

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W}{E J}$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4}, \text{ para seções I}$$

$$C_w = \frac{t_f (b_f - 0,5 t_w)^3 (d - t_f)^2}{12} \left[ \frac{3(b_f - 0,5 t_w) t_f + 2(d - t_f) t_w}{6(b_f - 0,5 t_w) t_f + (d - t_f) t_w} \right], \text{ para seções U}$$

$$2) \lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_{yc} J \beta_1} \sqrt{\beta_2 + \sqrt{\beta_2^2 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}}$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \left[ \beta_3 + \sqrt{\beta_3^2 + \frac{C_w}{I_y} \left( 1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \right]$$

onde:

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W_c}{E J}$$

$$\beta_2 = 5,2 \beta_1 \beta_3 + 1$$

$$\beta_3 = 0,45 \left( d - \frac{t_{fs} + t_{fl}}{2} \right) \left( \frac{\alpha_y - 1}{\alpha_y + 1} \right), \text{ com } \alpha_y \text{ conforme Nota 9 a seguir}$$

$$C_w = \frac{\left( d - \frac{t_{fs} + t_{fl}}{2} \right)^2}{12} \left( \frac{t_{fl} b_{fl}^3 t_{fs} b_{fs}^3}{t_{fl} b_{fl}^3 + t_{fs} b_{fs}^3} \right)$$

- 3) O estado-limite FLA aplica-se só à alma da seção U, quando comprimida pelo momento fletor. Para seção U, o estado-limite FLM aplica-se somente quando a extremidade livre das mesas for comprimida pelo momento fletor.



**ABNT NBR 8800:2008**

4)  $W_{ef}$  é o módulo de resistência mínimo elástico, relativo ao eixo de flexão, para uma seção que tem uma mesa comprimida (ou alma comprimida no caso de perfil U fletido em relação ao eixo de menor inércia) de largura igual a  $b_{ef}$ , dada por F.3.2, com  $\sigma$  igual a  $f_y$ . Em alma comprimida de seção U fletida em relação ao eixo de menor momento de inércia,  $b = h$ ,  $t = t_w$  e  $b_{ef} = h_{ef}$ .

5) A tensão residual de compressão nas mesas,  $\sigma_r$ , deve ser tomada igual a 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado.

6) Para perfis laminados:  $M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_c$ ,  $\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}}$

Para perfis soldados:  $M_{cr} = \frac{0,90E k_c}{\lambda^2} W_c$ ,  $\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)/k_c}}$

com  $k_c$  conforme F.2.

7) O estado-limite FLT só é aplicável quando o eixo de flexão for o de maior momento de inércia.

8)  $b/t$  é a relação entre largura e espessura aplicável à mesa do perfil; no caso de seções I e H com um eixo de simetria,  $b/t$  refere-se à mesa comprimida (para mesas de seções I e H,  $b$  é a metade da largura total, para mesas de seções U, a largura total, para seções tubulares retangulares, a largura da parte plana e para perfis caixão, a distância livre entre almas).

9) Para essas seções, devem ser obedecidas as seguintes limitações:

a)  $\frac{1}{9} \leq \alpha_y \leq 9$

com

$$\alpha_y = \frac{I_{yc}}{I_{yt}}$$

b) a soma das áreas da menor mesa e da alma deve ser superior à área da maior mesa.

10) Para seções-caixão:  $\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Para seções tubulares retangulares:  $\lambda_p = 2,42 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

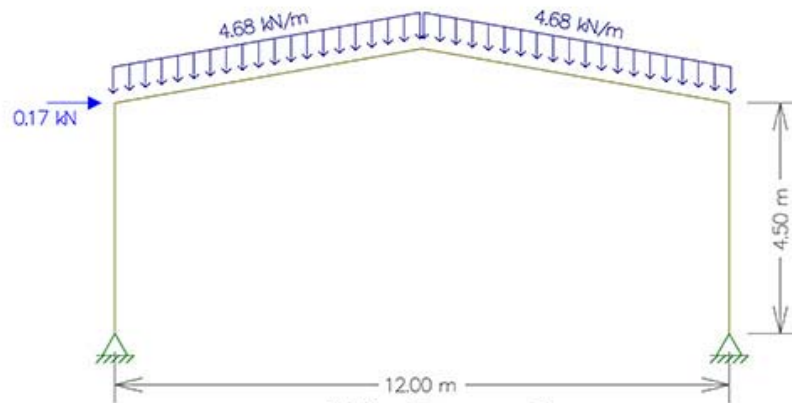
**G.3 Simbologia**

Para este Anexo adota-se a seguinte simbologia adicional:

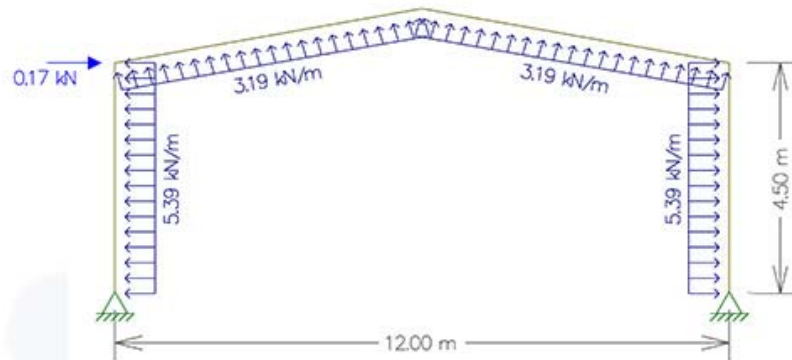
FLA - flambagem local da alma;

FLM - flambagem local da mesa comprimida;

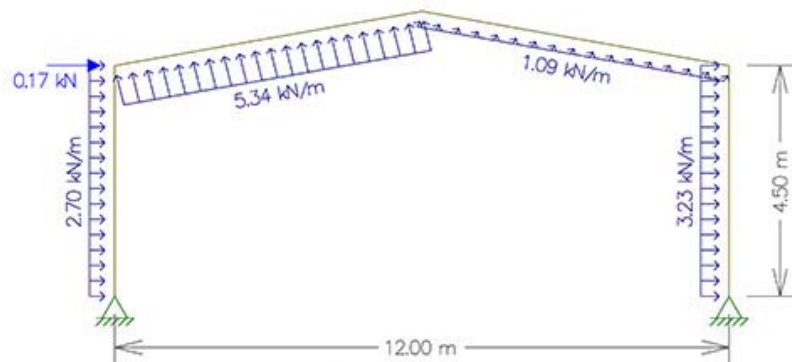
## ANEXO E



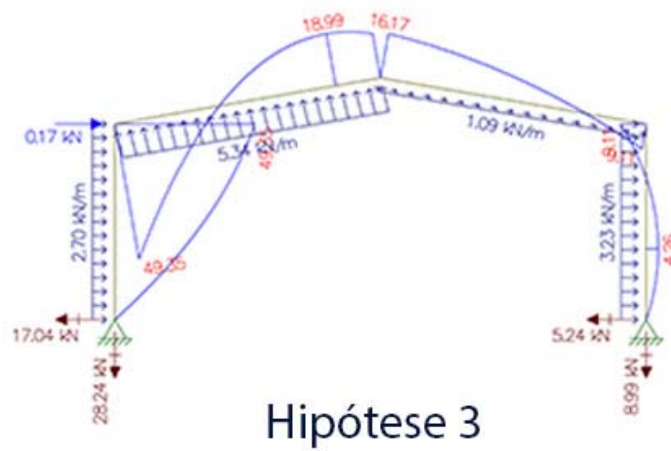
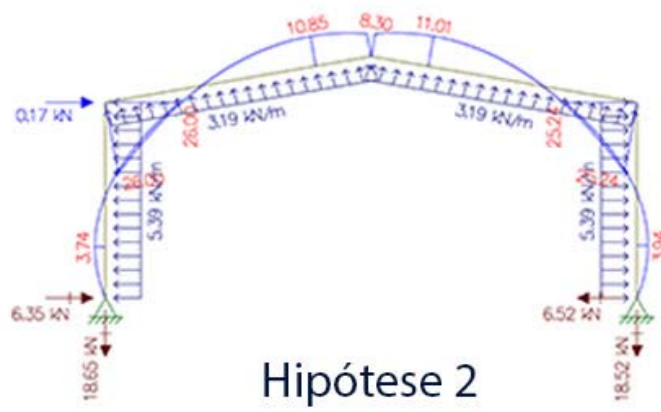
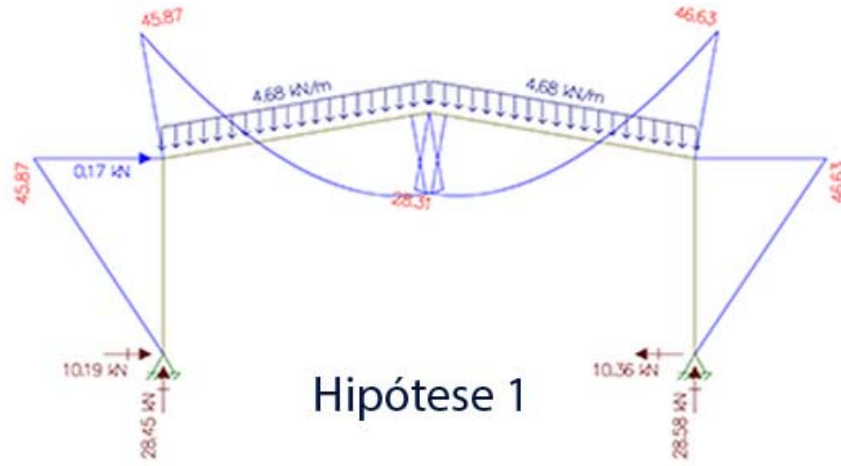
Hipótese 1

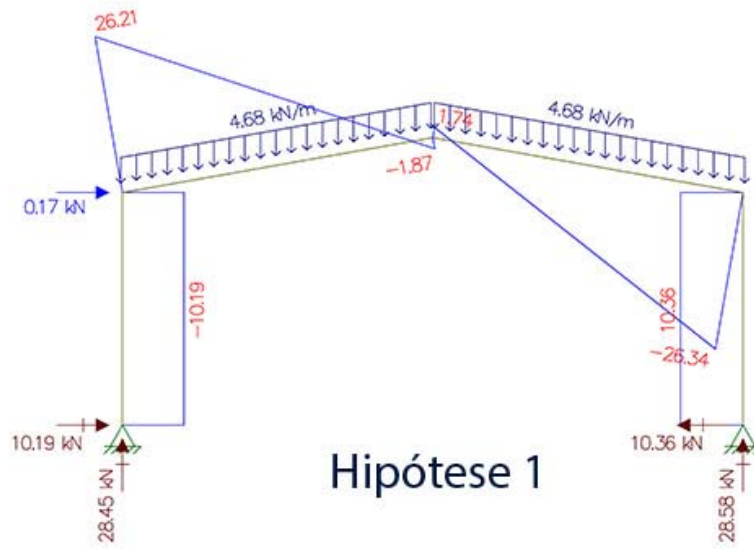


Hipótese 2

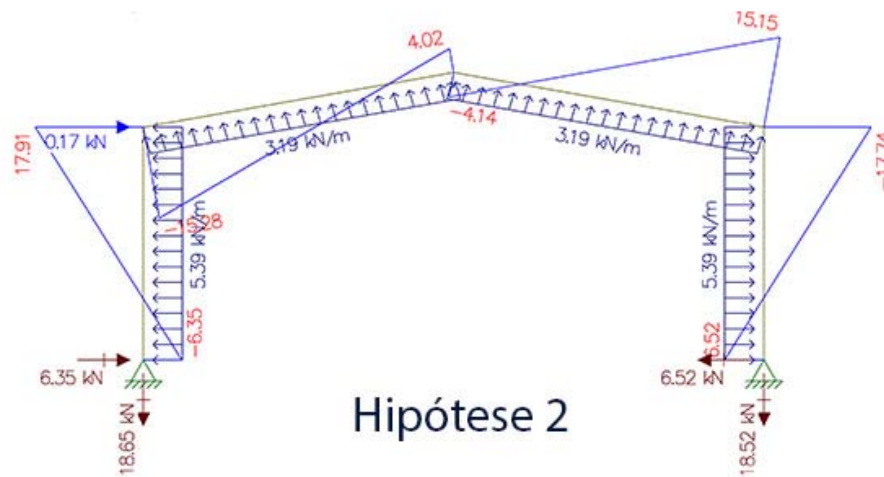


Hipótese 3

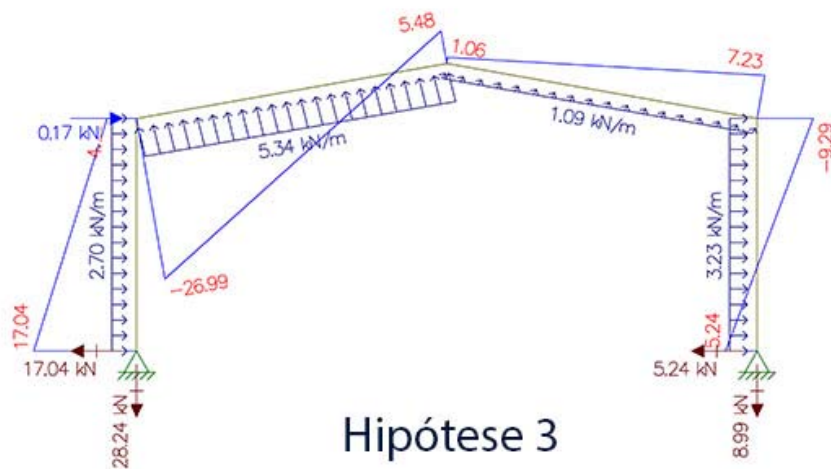




Hipótese 1



Hipótese 2



Hipótese 3

