

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS - UNIS**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CLEBSON BATISTA SANTANA**

**ANÁLISE ESTRUTURAL E AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE UM GALPÃO**  
**METÁLICO DE ACORDO COM A ABNT NBR 8800:2008**

**VARGINHA**

**2018**

**CLEBSON BATISTA SANTANA**

**ANÁLISE ESTRUTURAL E AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE UM GALPÃO  
METÁLICO DE ACORDO COM A ABNT NBR 8800:2008**

Projeto de pesquisa apresentado ao curso de Engenharia  
Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, sob  
orientação do Professor Matheus Henrique.

**VARGINHA**

**2018**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os meus familiares, meus pais, a todos que me deram condições para seguir em frente nos estudos, meu professor orientador Matheus Henrique, e a todos os meus amigos e colegas de sala que contribuíram para o meu crescimento acadêmico e profissional.

## RESUMO

O seguinte trabalho faz uma análise dos elementos estruturais de um galpão em estrutura metálica, este que por sua vez, encontra-se totalmente edificado. Este estudo faz-se necessário pois existem diversas estruturas que são construídas sem nenhum projeto estrutural, contando apenas com a experiência profissional das equipes de montagem, como é o caso do galpão em estudo. O objetivo fundamental deste trabalho é verificar se os elementos estruturais utilizados no galpão atendem às exigências da NBR 8800: 2008. Para isto, foi necessário a verificação no local do galpão, coletando-se todas as informações arquitetônicas da estrutura, além dos perfis empregados em sua construção, e se tratando de aço, tomando como base suas propriedades mecânicas, para posteriormente serem executados os cálculos baseados nas considerações pertinentes aos estados limites ultimo e de serviço. Assim, foram verificadas as ações do vento na edificação, tomando como referência a NBR 6123, e assim realizados os cálculos para obtenção dos valores reais das ações a que realmente a estrutura esta sendo submetida.

**Palavras-chave:** NBR 8800: 2008. Estruturas metálicas.Verificação.

## **ABSTRACT**

*The following work makes an analysis of the structural elements of a shed in metallic structure, which in turn, is fully built. This study is necessary because there are several structures that are built without any structural design, relying only on the professional experience of the assembly teams, as is the case of the shed under study. The main objective of this work is to verify if the structural elements used in the shed meet the requirements of NBR 8800: 2008. For this, it was necessary to verify the shed's location, collecting all the architectural information of the structure, besides the profiles used in its construction, and steel, based on its mechanical properties, and then perform the calculations based on the considerations pertinent to the final and service limit states. Thus, the actions of the wind were verified in the building, taking as reference to NBR 6123, and thus the calculations were made to obtain the actual values of the actions to which the structure is actually submitted.*

**Key words:** *NBR 8800: 2008. Metal structures. Verification.*

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 01: Diagrama tensão x deformação de aços dúcteis .....                            | 20 |
| Figura 02: Seções produzidas pela indústria siderúrgica .....                            | 23 |
| Figura 03: Seções produzidas pela indústria metalúrgica .....                            | 24 |
| Figura 04: Treliça plana nas duas faces laterais utilizada em passarela urbana.....      | 27 |
| Figura 05: Momento fletor agindo no plano principal de inércia .....                     | 30 |
| Figura 06: Momento fletor agindo inclinado em relação ao plano principal de inércia..... | 30 |
| Figura 07: Viga I sujeita a FLA .....  | 31 |
| Figura 08: Viga I sujeita a FLM .....  | 32 |
| Figura 09: Viga I sujeita a FLT .....  | 33 |
| Figura 10: Deslocamentos verticais a serem considerados .....                            | 36 |
| Figura 11: Fachada galpão metálico .....   | 37 |
| Figura 12: Elementos estruturais do galpão .....   | 38 |
| Figura 13: Seção transversal perfil “C” enrijecido .....                                 | 38 |
| Figura 14: Seção transversal perfil “C” .....  | 39 |
| Figura 15: Dois perfis “C” em conjunto .....   | 40 |
| Figura 16: Pilar P8 visto lateralmente .....   | 41 |
| Figura 17: Planta baixa arquitetônica do galpão e locação dos pilares .....              | 42 |
| Figura 18: Gráfico de isopletras – Fato $V_0$ .....                                      | 44 |
| Figura 19: Telha trapezoidal modelo AT 40/ 980 .....                                     | 48 |
| Figura 20: Valores de sobrecarga em função do número de apoios e comprimento do vão .... | 49 |
| Figura 21: Carregamento aproximado para vão de 1,7 metros .....                          | 50 |
| Figura 22: COMBINAÇÃO 1 – Peso próprio + Sobrecarga – (KN/ m) .....                      | 53 |
| Figura 23: Diagrama de esforço cortante – Combinação 1 – PP + SC – (KN) .....            | 53 |
| Figura 24: Diagrama de momento fletor – Combinação 1 – PP + SC – (KN.m) .....            | 53 |
| Figura 25: COMBINAÇÃO 2 – Peso próprio + vento – (KN/ m) .....                           | 54 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 26: Diagrama de esforço cortante – Combinação 2 – PP + Vento – (KN) ..... | 54 |
| Figura 27: Diagrama de momento fletor – Combinação 2 – PP + Vento – (KN.m) ..... | 54 |
| Figura 28: Medidas das barras em metros .....                                    | 59 |
| Figura 29: Carregamentos pontuais peso próprio - (KN) .....                      | 60 |
| Figura 30: Carregamentos pontuais sobrecarga – (KN) .....                        | 61 |
| Figura 31: Carregamento distribuído vento caso A – (KN/ m) .....                 | 61 |
| Figura 32: Carregamento distribuído vento caso B – (KN/ m) .....                 | 61 |
| Figura 33: Padronização dos nós .....  | 62 |
| Figura 34: Perfil composto da coluna .....                                       | 66 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 01: Valores dos coeficientes de ponderação das resistências ( $\gamma_m$ ) .....            | 25 |
| Quadro 02: Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados .....                         | 29 |
| Quadro 03: Parâmetros referentes ao momento fletor resistente .....                                | 34 |
| Quadro 04: Deslocamentos máximos .....   | 36 |
| Quadro 05: Coeficientes para determinação fator - S2 .....   | 45 |
| Quadro 06: Valores mínimos do fator estatístico – S3 .....   | 46 |
| Quadro 07: Cpe – Valores obtidos e retirados do programa visual ventos para paredes .....          | 46 |
| Quadro 08: Valores dos coeficientes para cobertura .....   | 47 |
| Quadro 09: Valores dos coeficientes e valor característico do vento .....                          | 47 |
| Quadro 10: Pórtico a 0° e 90° respectivamente – valores em KN/ m .....                             | 48 |
| Quadro 11: Valores dos carregamentos .....   | 50 |
| Quadro 12: Valores dos coeficientes para cálculo das telhas da cobertura e fechamento lateral..... | 51 |
| Quadro 13: Dados do perfil da terça da cobertura .....   | 52 |
| Quadro 14: Carregamentos considerados para dimensionamento das terças da cobertura .....           | 52 |
| Quadro 15: Dados do perfil da terça da cobertura .....   | 55 |
| Quadro 16: Verificação para FLM .....  | 55 |
| Quadro 17: Verificação para FLA .....  | 56 |
| Quadro 18: Verificação para FLT .....  | 56 |
| Quadro 19: Verificação para FLM .....  | 57 |
| Quadro 20: Verificação para esforço cortante (KN) .....  | 58 |
| Quadro 21: Verificação da flecha máxima .....  | 58 |
| Quadro 22: Comprimento das barras da tesoura .....   | 59 |
| Quadro 23: Peso próprio das barras da tesoura .....  | 60 |
| Quadro 24: Carregamentos e combinação dos carregamentos das barras (N) .....                       | 62 |



|  |    |
|--|----|
| Quadro 25: Dados do perfil da tesoura .....  | 63 |
| Quadro 26: Verificação a compressão do perfil da tesoura (N) .....                             | 64 |
| Quadro 27: Combinações das reações de apoio – (N) .....  | 65 |
| Quadro 28: Valores dos pesos considerados na verificação da coluna (N) .....                   | 65 |
| Quadro 29: Dados do perfil coluna .....  | 65 |
| Quadro 30: Dados calculados para dois perfis “C” .....   | 66 |
| Quadro 31: Carregamento admissível para esforço axial de compressão (N) .....                  | 67 |
| Quadro 32: Esforço axial de compressão (Nd), momento fletor (Md) e esforço cortante (Vd) ..... | 67 |
| Quadro 33: FLA – Flambagem lateral da alma .....   | 68 |
| Quadro 34: FLM – Flambagem lateral da mesa .....   | 68 |
| Quadro 35: FLT – Flambagem lateral com torção .....  | 69 |
| Quadro 36: Verificação dos esforços combinados .....   | 69 |
| Quadro 37: Verificação ao esforço cortante .....   | 69 |
| Quadro 38: Resumo telhas .....   | 71 |
| Quadro 39: Momentos admissíveis das terças para estados limites ultimo .....                   | 72 |
| Quadro 40: Momento das atuantes terças .....   | 72 |
| Quadro 41: Verificação dos esforços combinados .....   | 72 |
| Quadro 42: Resumo esforço cortante .....   | 73 |
| Quadro 43: Resumo verificação das flechas .....  | 73 |
| Quadro 44: Carregamentos atuantes e admissíveis .....  | 74 |
| Quadro 45: Verificação ao esforço normal de compressão .....                                   | 74 |
| Quadro 46: Momentos admissíveis das colunas para estados limites ultimo .....                  | 75 |
| Quadro 47: Carregamento 1 – esforço axial de compressão .....                                  | 75 |
| Quadro 48: Carregamento 2 – esforço axial, momento fletor e esforço cortante .....             | 75 |
| Quadro 49: Verificação dos esforços combinados .....   | 76 |
| Quadro 50: Verificação ao esforço cortante .....   | 76 |
| Quadro 51: Verificação ao esforço combinados da terça da cobertura .....                       | 77 |

|   |    |
|---|----|
| Quadro 52: Verificação da flecha máxima .....                           | 77 |
| Quadro 53: Verificação dos esforços combinados das vigas laterais ..... | 78 |
| Quadro 54: Resumo telhas .....  | 79 |
| Quadro 55: Resumo terças 1 .....  | 80 |
| Quadro 56: Resumo terças 2 .....  | 80 |
| Quadro 57: Resumo treliça .....   | 80 |
| Quadro 58: Resumo colunas .....   | 81 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

$K_z L_z$  = coeficiente de flambagem por torção

$\gamma_{a1}$  = coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade

$\gamma_{r1}$  = coeficiente de ponderação relacionado a ruptura

$\sigma_{cr}$  = tensão normal crítica

$M_{Rd}$  = momento fletor resistente de cálculo

$M_{Sd}$  = momento fletor solicitante de cálculo

$N_c, R_d$  = força axial de compressão resistente de cálculo

$N_c, S_d$  = força axial de compressão solicitante de cálculo

$N_t, R_d$  = força axial de tração resistente de cálculo

$N_t, S_d$  = força axial de tração solicitante de cálculo

$V_{Rd}$  = força cortante resistente de cálculo

$V_{Sd}$  = força cortante solicitante de cálculo

$f_u$  = resistência a ruptura do aço

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço

$\lambda_o$  = índice de esbeltez reduzido

$\lambda_p$  = parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação

$\lambda_r$  = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento

$a$  = distância entre enrijecedores transversais adjacentes

$A_c$  = área dos segmentos ligados

$A_e$  = área líquida efetiva da seção transversal da barra

$A_{ef}$  = área efetiva da seção transversal

$A_g$  = área bruta da seção transversal

$A_n$  = área líquida da barra

$A_w$  = área efetiva de cisalhamento

$b$  = largura dos elementos comprimidos AL

$b_{ef}$  = largura efetiva dos elementos comprimidos AA

$b_f$  = largura da mesa

$b_{fi}$  = largura da mesa inferior

$b_{fs}$  = largura da mesa superior

$c_a$  = coeficiente igual a 0,38 para mesas e almas de seção tubulares, retangulares ou quadradas e 0,34 para os demais casos

$C_b$  = fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme

$C_t$  = coeficiente de redução da área líquida

$C_w$  = constante de empenamento da seção transversal

$d$  = altura externa da seção

$d$  = diâmetro da barra

$D$  = diâmetro externo da seção tubular circular

$E$  = módulo de elasticidade do aço

$e_c$  = excentricidade do plano de ligação em relação ao centro geométrico da seção da porção que resiste ao esforço de tração

$G$  = módulo de elasticidade transversal do aço

$h$  = altura da alma

$I$  = momento de inércia de seção transversal em relação a um dos eixos principais de inércia

$I_y$  = momento de inércia em relação ao eixo  $y$

$J$  = constante de torção da seção transversal

$KL$  = comprimento de flambagem por flexão em relação a um dos eixos principais de inércia

$L$  = comprimento efetivo de ligação

$L_b$  = distância entre duas seções contidas a flambagem lateral com torção (comprimento destravado).

$L_v$  = distância entre as seções de forças cortantes máxima e nula

$M_a$  = valor do momento fletor solicitante de cálculo situado a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda

$M_b$  = valor do momento fletor solicitante de cálculo situado na seção central do comprimento destravado

$M_c$  = valor do momento fletor solicitante de cálculo situado a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda

$M_{cr}$  = momento fletor de flambagem elástica

$M_{max}$  = valor máximo do momento fletor solicitante de cálculo no comprimento destravado

$M_{pl}$  = momento fletor de plastificação

$M_r$  = momento fletor correspondente ao início do escoamento, incluindo a influência das tensões residuais (exceto para flambagem local da mesa)

$N_e$  = força axial de flambagem elástica

$Q$  = fator de redução total associado a flambagem local

$Q_a$  = fator de redução que leva em conta flambagem local dos elementos AA

$Q_s$  = fator de redução que leva em conta flambagem local dos elementos AL

$r_o$  = raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento

$r_x$  = raio de giração em relação ao eixo central x

$r_y$  = raio de giração em relação ao eixo central y

$r_{yc}$  = raio de giração da seção T

$t$  = espessura da parede

$t_d$  = espessura de cálculo da parede da seção transversal, tomada igual a 0,93 vezes a espessura nominal para tubos com costura, e igual a espessura nominal para tubos sem costura

$t_f$  = espessura da mesa

$t_{fi}$  = espessura da mesa inferior

$t_{fs}$  = espessura da mesa superior

$t_w$  = espessura da alma

$V_{pl}$  = força cortante correspondente a plastificação da alma por cisalhamento

$W$  = módulo resistente elástico

$W_c$  = módulo resistente elástico do lado comprimido da seção

$X_o$  = coordenada do centro de cisalhamento na direita do eixo x em relação ao centro geométrico da seção

$Y_o$  = coordenada do centro de cisalhamento na direita do eixo y em relação ao centro geométrico da seção

$Z$  = módulo de resistência plástico

$\lambda$  = parâmetro de esbeltez da seção transversal

$X$  = fator de redução associado a resistência a compressão

## SUMÁRIO

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1      | INTRODUÇÃO.....                                      | 17 |
| 2      | OBJETIVO .....                                       | 18 |
| 2.1    | Objetivo geral .....                                 | 18 |
| 2.2    | Objetivos específicos.....                           | 18 |
| 3      | REFERENCIAL TEÓRICO.....                             | 19 |
| 3.1    | Estruturas metálicas.....                            | 19 |
| 3.2    | Propriedades dos aços estruturais .....              | 20 |
| 3.3    | Propriedades mecânicas do aço estrutural .....       | 21 |
| 3.4    | Propriedades geométricas do aço estrutural .....     | 22 |
| 3.5    | Estados Limites .....                                | 24 |
| 3.5.1  | Estado limite último – ELU .....                     | 24 |
| 3.5.2  | Estados limites de serviço - ELS .....               | 25 |
| 3.6    | Esbeltez.....  | 26 |
| 3.7    | Tração .....   | 26 |
| 3.8    | Compressão .....                                     | 28 |
| 3.9    | Flexão .....   | 29 |
| 3.10   | Momento fletor resistente de cálculo .....           | 30 |
| 3.10.1 | Flambagem local – FLA e FLM .....                    | 31 |
| 3.10.2 | Flambagem Lateral com torção .....                   | 32 |
| 3.11   | Cisalhamento .....                                   | 35 |
| 3.12   | Deslocamento Máximo – Flecha .....                   | 35 |
| 4      | METODOLOGIA.....                                     | 37 |
| 4.1    | O galpão.....  | 37 |
| 4.2    | Verificação quanto à estabilidade da estrutura ..... | 42 |
| 4.2.1  | Dados preliminares do projeto .....                  | 42 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.3 | Cálculo da ação do vento.....                      | 43 |
| 4.4 | Carregamento nas telhas da cobertura.....          | 48 |
| 4.5 | Carregamento nas telhas do fechamento lateral..... | 51 |
| 4.6 | Carregamento das terças.....                       | 51 |
| 4.7 | Verificação do perfil da terça.....                | 54 |
| 4.8 | Cálculo e verificação das tesouras.....            | 59 |
| 4.9 | Cálculo e verificação das colunas.....             | 64 |
| 5   | RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                       | 71 |
| 5.1 | Telhas da cobertura e fechamento lateral.....      | 71 |
| 5.2 | Análise final das terças.....                      | 72 |
| 5.3 | Treliça.....                                       | 74 |
| 5.4 | Coluna.....  | 75 |
| 5.5 | Sugestões.....                                     | 76 |
| 6   | CONCLUSÃO.....                                     | 79 |
|     | REFERÊNCIAS.....                                   | 82 |
|     | ANEXO I.....                                       | 83 |
|     | ANEXO II.....                                      | 84 |
|     | ANEXO III.....                                     | 86 |
|     | ANEXO IV.....                                      | 87 |
|     | ANEXO V.....                                       | 87 |



## 1 INTRODUÇÃO

Toda estrutura, neste caso, de aço, deve ser levado em consideração um auxílio e acompanhamento de um profissional técnico habilitado, buscando sempre a segurança e o bom desempenho estrutural, atribuídos as normas técnicas e bibliografias pertinentes ao tema.

O seguinte trabalho refere-se a uma análise estrutural de um galpão metálico, localizado no município de Pouso Alegre, no estado de Minas Gerais. Sendo assim, foram verificados através de cálculos matemáticos, a credibilidade junto á estabilidade estrutural do galpão, tomando como base a norma ABNT NBR 8800: 2008.

Deste modo, as verificações normativas fazem-se necessárias para o conhecimento das ações atuantes na estrutura e, conseqüentemente realizar se necessário, medidas que possibilitem uma melhoria para a segurança estrutural da edificação.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo fundamental deste trabalho, é verificar se os perfis empregados no galpão metálico atendem e resistem aos carregamentos encontrados, se atendem fundamentalmente a ABNT NBR 8800: 2008, e se caso não atendam, quais as melhorias poderiam serem realizadas para o perfeito funcionamento da estrutura.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Calculo da estrutura, utilizando os perfis de acordo com as tabelas encontradas;
- Verificação da estrutura de acordo com a ABNT NBR 8800: 2008 utilizando os perfis locais;
- Sugestão de melhorias caso algum item não atenda a norma citada.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem por objetivo apresentar algumas informações do aço utilizadas no trabalho, expondo suas propriedades, comportamento e características necessárias para o dimensionamento.

#### 3.1 Estruturas metálicas

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009), por volta dos anos 1780 e 1820 foram registradas as primeiras formas de utilização do aço nas construções, produzidos com elementos de ferro fundido, trabalhando em compressão. No entanto no Brasil, no ano de 1857 foi inaugurada a ponte sobre o rio Paraíba do Sul, no estado do Rio de Janeiro, com vãos de 30m vencidos por arcos atirantados. Ainda segundo Pfeil e Pfeil (2009), um ano antes, em 1856, o aço passou a ser produzido em escala comercial mais acessível, graças ao inglês Henry Bessemer, que inventou um forno que produzia aço de forma mais produtiva em escala industrial.

De forma semelhante, Pinheiro (2005), afirma que a partir de 1812 já havia fabricação de aço no Brasil, entretanto só em 1946 com a implantação das grandes siderúrgicas, que iniciou-se a fabricação em longa escala.

De acordo com Pinheiro (2005), dentre as vantagens da utilização das estruturas metálicas, tem-se como exemplo:

- Fabricação das estruturas com precisão milimétrica;
- Propriedades mecânicas bem definidas por se tratar de um material homogêneo;
- Resistência a choques e vibrações;
- Possibilidades de obras mais rápidas e limpas;
- Reaproveitamento dos materiais não utilizados ou descartados.

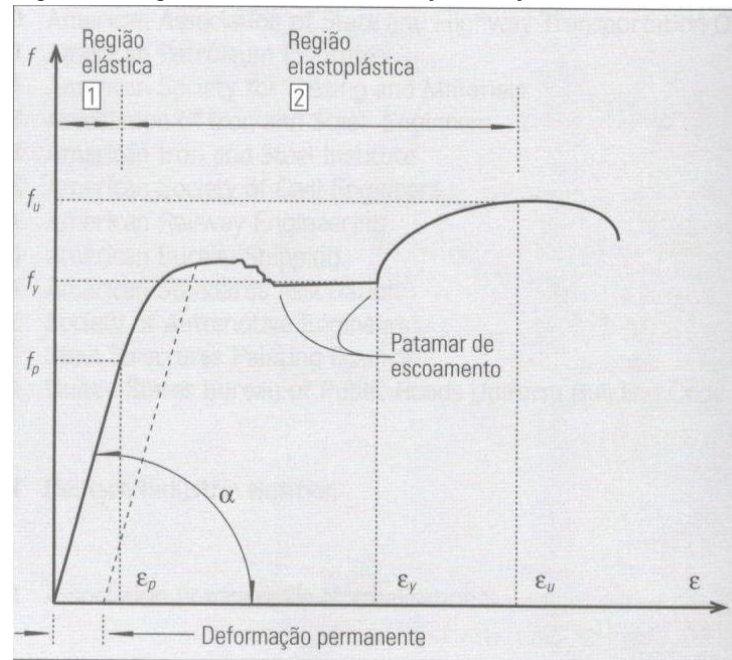
Do mesmo modo, Pinheiro (2005), cita as principais desvantagens:

- Limitação da execução em fábrica;
- Necessidade de tratamento devido à oxidação;
- Mão de obra especializada para a execução.

### 3.2 Propriedades dos aços estruturais

Para Pinheiro (2005), os aços estruturais são fabricados de acordo com suas propriedades mecânicas e/ou químicas, conforme sua necessidade. Sem dúvida alguma, a escolha do aço será determinante para o dimensionamento do perfil constituinte de uma determinada estrutura. Para isto, é importante conhecer o diagrama Tensão x Deformação, diagrama este que ilustra o comportamento de aço dúctil em corpos de prova submetidos ao esforço normal de tração.

Figura 1: Diagrama Tensão x Deformação de aços dúcteis.



Fonte: Pinheiro (2005).

Neste caso temos:

$f$  – Tensão do material; ( $f = N/A$ ) onde,  $N$  – força normal e,  $A$  – área de seção transversal;

$f_u$  – Tensão última;

$f_y$  – Tensão de escoamento;

$f_p$  – Tensão de proporcionalidade;

$\mathcal{E}$  - Deformação específica; ( $\mathcal{E} = \frac{\Delta.L}{L}$ ) onde,  $\Delta.L$  – deformação unitária e,  $L$  – comprimento do corpo de prova;

$\mathcal{E}_u$  – Deformação específica na ocorrência da última tensão;

$\epsilon_y$  – Deformação específica limite quando ocorre a tensão de escoamento;

$\epsilon_p$  – Deformação específica quando ocorre a tensão de proporcionalidade;

$\alpha$  – Ângulo de inclinação da reta da região elástica.

### 3.3 Propriedades mecânicas do aço estrutural

O aço e suas propriedades variam bastante de acordo com as substâncias incorporadas a sua liga. Por exemplo, Segundo Pfeil e Pfeil (2009), o aço pode conter em sua composição de 0,008% a 2,11% de carbono, sendo que o carbono aumenta sua resistência mecânica, no entanto o torna mais frágil. Teores baixos de carbono reduzem resistência a tração, porém aumentam sua ductilidade.

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009), as resistências de ruptura (tração e compressão) de aços estruturais são semelhantes, variando nos limites de 300 MPA até limites superiores a 1200 MPA.

A norma ABNT NBR 8800: 2008 estabelece valores para as características dos aços, relacionados às suas propriedades mecânicas, no objetivo de padronizar considerações a serem levadas em conta pelos projetistas no dimensionamento, são as seguintes constantes:

- a) Módulo de elasticidade,  $E = E_a = 200.000 \text{ MPA}$ ;
- b) Coeficiente de Poisson  $\nu_a = 0,3$ ;
- c) Modulo de elasticidade transversal,  $G = 77.000 \text{ MPA}$ ;
- d) Coeficiente de dilatação térmica,  $\beta_a = 1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;
- e) Massa específica,  $\rho = 7.850 \text{ Kg/m}^3$ .

Do mesmo modo Pfeil e Pfeil (2009), cita algumas das principais propriedades do aço, como ductilidade, fragilidade, resiliência, tenacidade, dureza, fadiga, corrosão e efeito de temperatura. Sendo:

**Ductilidade** – capacidade do material se deformar sob a ação das cargas. Os aços dúcteis sujeitos a tensões elevadas podem sofrer deformações plásticas capazes de redistribuir as tensões;

**Fragilidade** – é a capacidade do aço se tornar frágil pela ação de diversos agentes como, baixas temperaturas ambientes, efeitos térmicos locais, causados por exemplo, por solda elétrica;

**Resiliência** – capacidade de absorção de energia mecânica em regime plástico;

**Tenacidade** – é a energia total, tanto elástica quanto plástica que o material pode absorver por unidade de volume até a sua ruptura.

**Dureza** – é a resistência ao risco de abrasão;

**Efeito de temperatura elevada** – Após o material ultrapassar a temperatura de 100°C, há uma tendência em eliminar o limite de escoamento, tornando-o arredondado em seu diagrama de tensão x deformação;

**Fadiga** – capacidade do material em resistir a tensões inferiores as tensões obtidas em ensaios estáticos. A fadiga ocorre quando as peças trabalham sob esforços repetitivos em grande número.

**Corrosão** – processo de reação do aço com alguns elementos presentes no ambiente, promovendo a perda de seção das peças de aço, podendo haver colapso por falta da mesma.

### **3.4 Propriedades geométricas do aço estrutural**

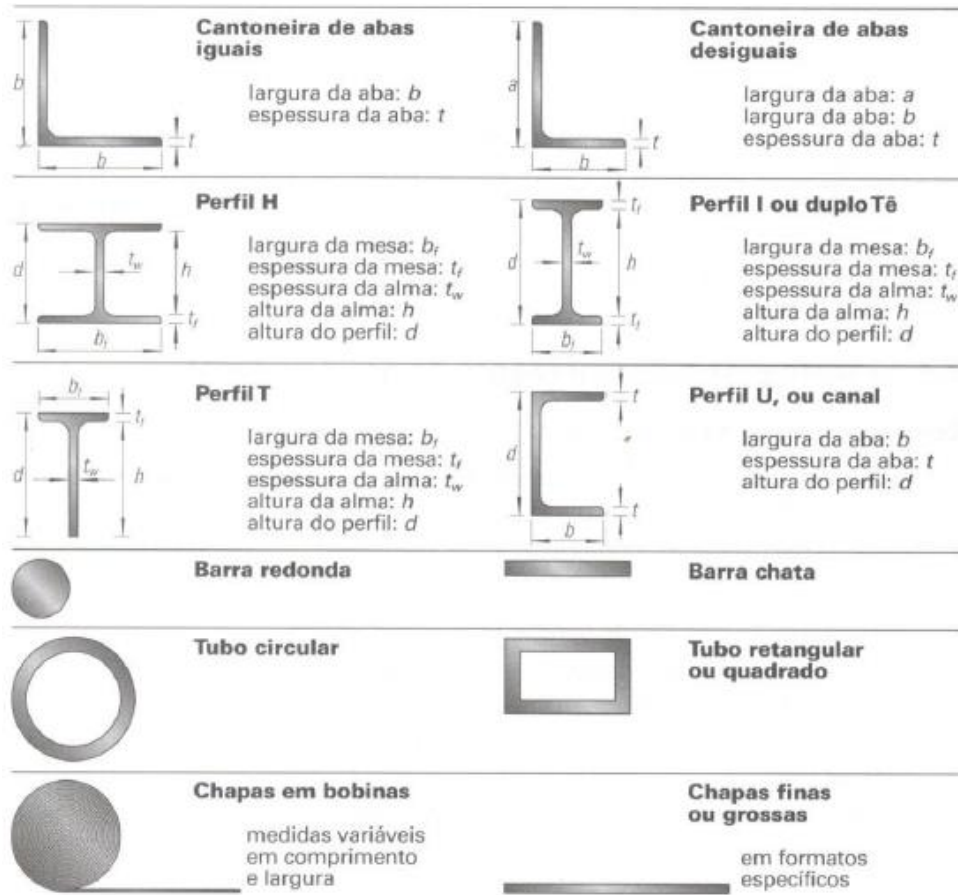
Assim como as propriedades mecânicas, os perfis de aço possuem propriedades geométricas padronizadas, a fim de estabelecer organizadamente a produção das diferentes seções de uma mesma geometria (altura da alma, altura da mesa, espessura etc), de sua seção transversal, além dos comprimentos comerciais, facilitando as considerações a serem avaliadas pelo projetista.

Quanto a sua produção, existem diferentes origens industriais nos quais são produzidos os perfis metálicos, dentre eles estão os perfis siderúrgicos e os perfis metalúrgicos.

Segundo Pinheiro (2005), as peças de origem siderúrgica podem ser basicamente classificadas como:

Perfis, barras e chapas, como mostra a figura 2:

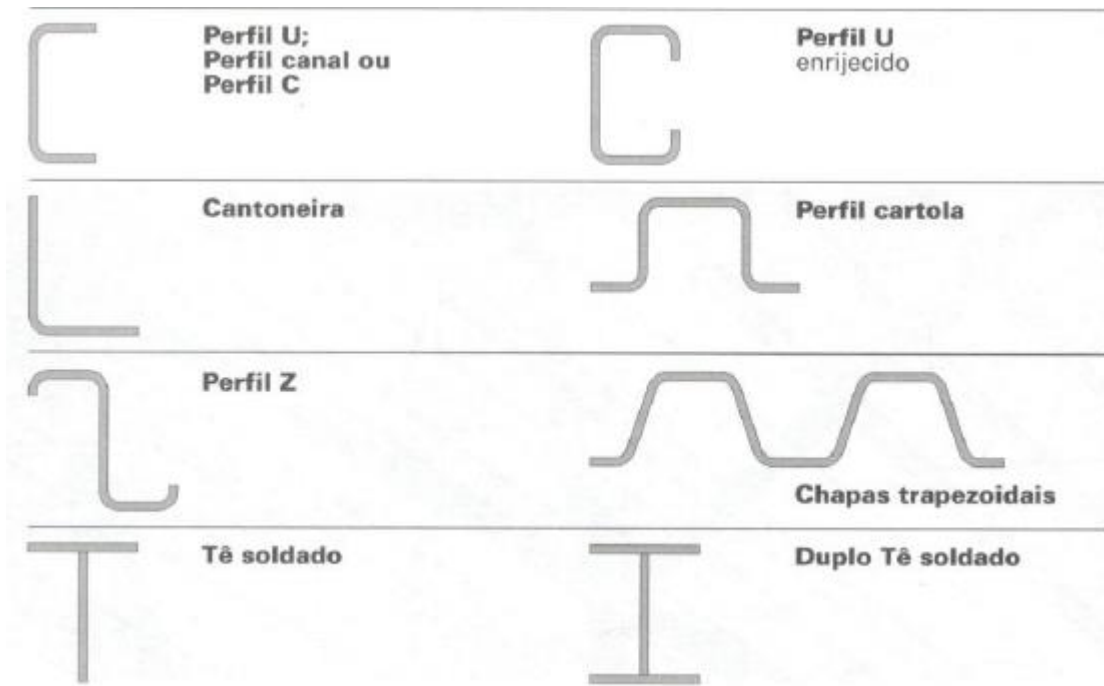
Figura 2 - Seções produzidas pela indústria Siderúrgica



Fonte: Pinheiro (2005).

Já os perfis metalúrgicos, são perfis compostos por chapas dobradas e chapas soldadas, como mostra a figura 03:

Figura 03 – Seções produzidas pela indústria metalúrgica



Fonte: Pinheiro (2005).

### 3.5 Estados Limites

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009), Estado-limite ocorre quando a estrutura em questão não satisfaz seus objetivos, isto é, deixa de garantir o bom desempenho e a segurança estrutural.

#### 3.5.1 Estado limite último – ELU

Para Fakury (2016), estado limite último é a capacidade da estrutura em suportar plenamente os carregamentos a que esta for submetida, a ocorrência do Estado limite último – ELU, esta atrelada ao colapso total ou parcial, associada à falha material, instabilidade do conjunto estrutural e ao movimento de um corpo rígido.

Do mesmo modo, Pfeil e Pfeil (2009), explica que os estados limites últimos associam-se a ocorrência de cargas excessivas, logo há o colapso da estrutura, como por exemplo:

- Perda de equilíbrio como corpo rígido;
- Plastificação total de um elemento estrutural;
- Ruptura de uma ligação ou seção;



- Flambagem em regime elástico ou não;
- Ruptura por fadiga.

A ABNT NBR 8800: 2008, no item 4.8.2, pag. 23, dispõe da tabela com valores dos coeficientes de ponderação das resistências  $\gamma_m$ , do aço estrutural, do concreto e do aço das armaduras, em função da classificação de combinação última das ações.

Quadro 01 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências ( $\gamma_m$ )

| Combinações                    | Aço estrutural<br>$\gamma_{a1}$                              | Aço estrutural<br>$\gamma_{a1}$ | Concreto<br>$\gamma_c$ | Aço das<br>Armaduras<br>$\gamma_s$ |
|--------------------------------|--|---------------------------------|------------------------|------------------------------------|
|                                | Escoamento,<br>flambagem e<br>instabilidade<br>$\gamma_{a1}$ | Ruptura<br>$\gamma_{a1}$        |                        |                                    |
| Normais                        | 1,10   | 1,35                            | 1,4                    | 1,15                               |
| Especiais ou de<br>construções | 1,10   | 1,35                            | 1,2                    | 1,15                               |
| Excepcionais                   | 1,00   | 1,15                            | 1,2                    | 1,00                               |

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 23)

### 3.5.2 Estados limites de serviço - ELS

De acordo com Fakury (2016), estado limite de serviço é a capacidade da estrutura em desempenhar satisfatoriamente as funções para a qual foi planejada. Neste estado-limite à funcionalidade e/ou a estética do ambiente são comprometidos, de modo que patologias como fissuras, rachaduras e trincas, por exemplo, apareçam de forma contundente. No entanto, o autor explica que para que sejam evitadas tais ocorrências, é necessário que haja as verificações previstas na ABNT NBR 8800: 2008, como o cálculo e verificação da flecha máxima admissível.

### 3.6 Esbeltez

Segundo a norma ABNT NBR 8800: 2008, esbeltez ( $\lambda$ ) é a relação entre largura e espessura ( $b / t$ ) em elementos comprimidos dos perfis metálicos. De acordo com os valores de esbeltez ( $\lambda$ ), dos componentes comprimidos em relação a  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$ , as seções podem ser classificadas como:

- a) Compactas - seções cujos valores de  $\lambda$  são inferiores a  $\lambda_p$ ;
- b) Semicompactas – seções em que  $\lambda$  é superior a  $\lambda_p$ , porém inferior a  $\lambda_r$ ;
- c) Esbelta, seções cujos valores de  $\lambda$  são superiores a  $\lambda_r$ .

### 3.7 Tração

Para Pfeil e Pfeil (2009), peças tracionadas são peças sujeitas a esforços de tração axial, ou a tração simples. O autor ainda cita que estas peças são empregadas nas estruturas sob as formas de:

Tirantes ou pendurais;

Contraventamentos de torres;

Travejamentos de vigas ou colunas;

Tirantes de vigas armadas

Barras tracionadas de treliças.

Fakury (2016), sugere que nos edifícios construídos em estruturas metálicas, as barras tracionadas aparecem em sua maior incidência compondo treliças planas, estas que funcionam como vigas de piso e de cobertura, além também de serem bastante usuais em passarelas, neste caso, treliças planas nas duas faces laterais, como mostra a figura 01.

Figura 04 – Treliça plana nas duas faces laterais utilizadas em passarela urbana



Fonte: Cassiano Rolim/ TV Anhanguera

A (NBR ABNT 8800: 2008, p. 43), estabelece para barras prismáticas submetidas à força axial de tração a seguinte condição:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd}$$

Onde:

$N_{t,Sd}$  – força axial de tração solicitante de cálculo;

$N_{t,Rd}$  – força axial de tração resistente de cálculo;

Ainda segundo a norma, o índice de esbeltez das barras submetidas a força de tração, deverá ser limitada a 300, isto é, a relação  $(L / r)$ , sendo “L” o comprimento destravado e, “r” o raio de giração.

### 3.8 Compressão

Segundo Chamberlain (2003), elementos comprimidos possuem tensões distribuídas axialmente constantes, sendo que o colapso é caracterizado por instabilidade ou flambagem atribuídas pela flexão.

Deste modo, Pfeil e Pfeil (2009), explica que ao contrário das forças axiais de tração, esta que há uma tendência em retificar as peças reduzindo o efeito de curvaturas, o esforço de compressão acentua ainda mais o efeito de curvaturas. O autor ainda conclui que para os deslocamentos laterais produzidos, há a ocorrência do fenômeno de flambagem por flexão, este fenômeno que por sua vez reduz a capacidade de carga da peça.

A norma (NBR ABNT 8800: 2008, p. 43), no qual aplica-se para as barras prismáticas submetidas a força normal de compressão a seguinte condição geral:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$$

$N_{c,Sd}$  – Força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$  – Força axial de compressão resistente de cálculo;

A norma ainda estabelece que para perfis que, sejam eles submetidos a esforço axial de compressão, o índice de esbeltez deve ser limitado a 200, tomando como relação ( $K.L / r$ ), sendo “K” coeficiente de flambagem dado no quadro 02, “L” o comprimento de flambagem e “r” é o raio de giração da peça.

Quadro 02 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.

|  | (a)   | (b)  | (c) | (d) | (e) | (f) |
|--|---|------|-----|-----|-----|-----|
| A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem |   |      |     |     |     |     |
| 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: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 125)

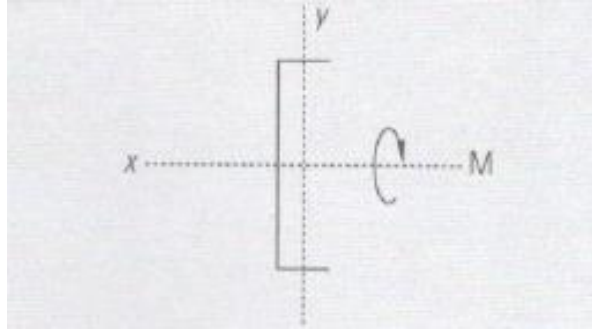
### 3.9 Flexão

O fenômeno da flexão talvez seja o mais complexo e variável no dimensionamento de uma estrutura, pois é necessário saber quais esforços atuam internamente no perfil no momento de utilização.

Para isso Pinheiro (2005), classifica cada tipo de flexão de acordo com seus esforços internos atuantes, são eles:

- a) **Flexão pura** – Neste caso, há somente o momento fletor agindo na barra, sendo que, há ainda dois tipos de flexão pura:
- **Plana** – Onde o plano de atuação do momento fletor esta coincidindo com o plano principal de inércia da peça, figura 05.

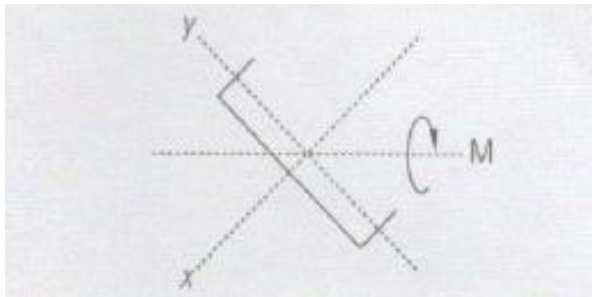
Figura 05 – momento fletor agindo no plano principal de inércia.



Fonte: Pinheiro (2005)

- **Oblíqua** – Onde o plano de atuação do momento fletor é inclinado em relação ao plano principal de inércia, figura 06.

Figura 06 – momento fletor agindo inclinado em relação aos planos principais de inércia.



Fonte: Pinheiro (2005).

- b) Flexão simples** – Neste caso há atuação do momento fletor somado ao esforço cortante.
- c) Flexão composta** – Neste caso o momento fletor pode atuar somado ou não ao esforço cortante, porém sendo combinado com a força normal ou momento torsor ou ambos os esforços.

### 3.10 Momento fletor resistente de cálculo

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, o momento fletor resistente de cálculo –  $M_{Ra}$ , deverá ser determinado utilizando as tabelas encontradas nos anexos G ou H da norma. Para isto, deverá ser analisado os esforços internos solicitantes a fim de se obter as verificações necessárias

com relação aos estados-limites de flambagem. Deste modo, a seguir, serão apresentadas as verificações dos estados-limites descritos na norma.

### 3.10.1 Flambagem local – FLA e FLM

Para Fakury (2016), a verificação de FLM – Flambagem local da mesa comprimida e FLA – Flambagem local da alma, deve ser feita tomando como referência toda a viga, comparando o maior  $M_{sd}$  com o  $M_{Rd}$ , sendo que o momento fletor atuante –  $M_{sd}$ , deve ser inferior ao momento fletor resistente de cálculo -  $M_{Rd}$ .

De acordo com a norma ABNT NBR 8800: 2008, para os estados FLA e FLM o momento fletor de cálculo é dado por:

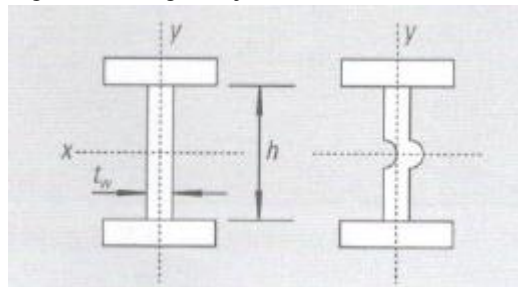
$$M_{Rd} = \frac{M_{p\ell}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[ M_{p\ell} - (M_{p\ell} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right], \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \text{ (não aplicável à FLA - ver Anexo H)}$$

Onde o índice de esbeltez FLA da peça necessita ser verificado de acordo com sua seção transversal, segundo a figura 07:

Figura 07 – Viga I sujeita a FLA



Fonte: Pinheiro (2005)

Dada pela equação:

$$\lambda_a = h / t_w$$

Onde:

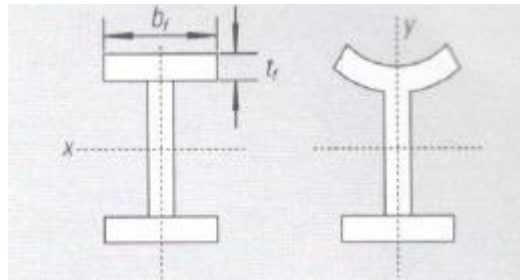
$h$  = altura da alma;

$t_w$  = espessura da alma;

$\lambda_a$  = parâmetro de esbeltez da FLA.

Assim como FLA, peças sujeitas a FLM devem ser verificadas de acordo com seu índice de esbeltez, sua seção transversal dada pela figura 08.

Figura 08 – Viga I Sujeita a FLM



Fonte: Pinheiro (2005)

Dada pela equação:

$$\lambda_m = (b_f / 2) / t_f$$

Onde:

$b_f$  = largura da mesa;

$t_f$  = espessura da mesa;

$\lambda_m$  = parâmetro de esbeltez da FLM.

### 3.10.2 Flambagem Lateral com torção

Segundo Fakury (2016), quando vigas assim como todas as barras de aço, são submetidas ao esforço de momento fletor crescente em relação ao eixo x (eixo de maior inércia), a curvatura (flambagem) e a torção aumentam gradativamente até o colapso.



A norma NBR ABNT 8800: 2008 estabelece para os tipos de seções e eixos de flexão indicados no Quadro 01, para o estado-limite de Flambagem lateral com torção o seguinte momento fletor resistente de cálculo:

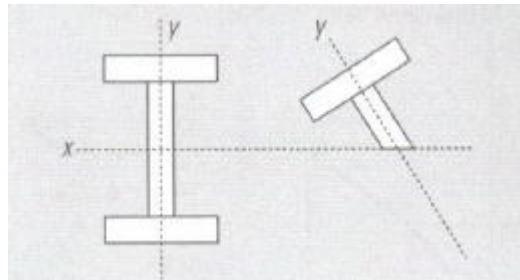
$$M_{Rd} = \frac{M_{p\ell}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p$$

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[ M_{p\ell} - (M_{p\ell} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{p\ell}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{p\ell}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r$$

Para a limitação do fenômeno de Flambagem Lateral com Torção – FLT, a norma ABNT NBR 8800: 2008 estabelece a relação comprimento de flambagem pelo raio de giração da peça.

Figura 09 – Viga I Sujeita a FLT



Fonte: Pinheiro (2005)

Dado pela equação:

$$\lambda_{lt} = L_b / r_y$$

Onde:

$L_b$  = comprimento longitudinal do perfil sem contenção lateral;

$r_y$  = raio de giro, em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão;

$\lambda_m$  = parâmetro de esbeltez da FLM.

O quadro 03 define as correlações para os cálculos de momento fletor de plastificação, momento fletor correspondente ao início do escoamento, ao índice de esbelteza correspondente a plastificação e ao início do escoamento.

Quadro 03 – Parâmetros referentes ao momento fletor resistente

| Tipo de seção e eixo de flexão   | Estados-límites 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                              | $\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$ | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   | 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>$\leq f_y W_1$<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                              | $\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$ | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   | Ver Nota 6                      |
|  | FLA                        | $f_y W$  | Viga de alma esbelta (Anexo H)          | $\frac{h_c}{t_w}$               | $\frac{\frac{h_c}{h_y} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{cr}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r$ | $5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$     |
| 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                              | $\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$ | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   | 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                        | $f_y W$  | $\frac{2,00 C_1 E}{\lambda} \sqrt{J A}$ | $\frac{L_b}{r_y}$               | $\frac{0,13 E}{M_{pe}} \sqrt{J A}$  | $\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{J A}$ |
| 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                     | $\frac{2,00 C_1 E}{\lambda} \sqrt{J A}$ | $\frac{L_b}{r_y}$               | $\frac{0,13 E}{M_{pe}} \sqrt{J A}$  | $\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{J A}$ |
|  | FLM                        | $f_y W_{ef}$<br>Ver Nota 4                             | $\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$<br>Ver Nota 4  | $\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$ | $1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   | $1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$     |
|  | FLA                        | $f_y W$  | -                                       | $\frac{h}{t_w}$                 | Ver Nota 10   | $5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$     |

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 134)

### 3.11 Cisalhamento

Para o dimensionamento do perfil a força cortante, a norma ABNT NBR 8800: 2008 estabelece a seguinte condição:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

Onde:

$V_{Sd}$  – é a força cortante solicitante de cálculo;

$V_{Rd}$  – é a força cortante resistente de cálculo, dada por:

$$V_{Rd} = V_{Rk} / \gamma_{a1}$$

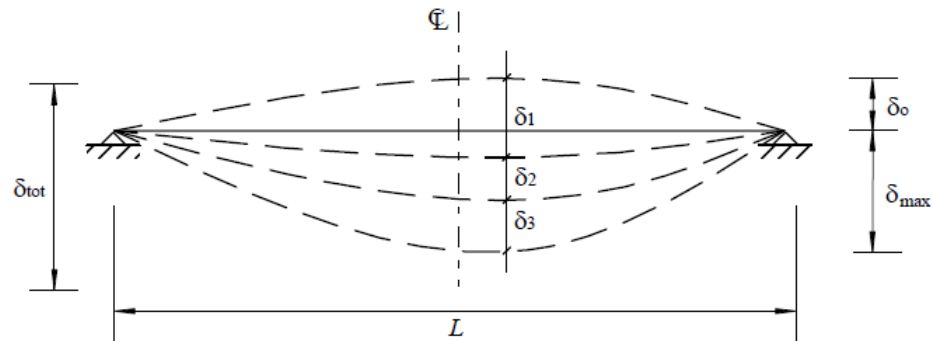
$V_{Rk}$  – é a força cortante resistente nominal;

$\gamma_{a1}$  – é o coeficiente de ponderação resistente para os estados-limites referentes ao escoamento e a instabilidade, com valor igual a 1,10.

### 3.12 Deslocamento Máximo – Flecha

De acordo com a ABNT NBR 8800: 2008, define  $\zeta_0$  como sendo a contra flecha,  $\zeta_1$  é a contra flecha devido as forças permanentes de baixa duração,  $\zeta_2$  é a contra flecha devido a carregamentos permanentes de longa duração e  $\zeta_3$  é o deslocamento devido a ações variáveis,  $\zeta_{max}$  é o deslocamento máximo da viga.

Figura 10 – Deslocamentos verticais a serem considerados



Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 116)

Os valores máximos para os deslocamentos são dados no quadro 04:

Quadro 04 – Deslocamentos máximos

| Descrição  | $\delta^a$    |
|--|---------------|
| - Travessas de fechamento  | $L/180^b$     |
|  | $L/120^{c,d}$ |
| - Terças de cobertura <sup>q)</sup>  | $L/180^e$     |
|  | $L/120^f$     |
| - Vigas de cobertura <sup>q)</sup>   | $L/250^h$     |
| - Vigas de piso  | $L/350^h$     |
| - Vigas que suportam pilares   | $L/500^h$     |
| Vigas de rolamento: <sup>j)</sup>  |               |
| - Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN                                      | $L/600^i$     |
| - Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN, exceto pontes siderúrgicas | $L/800^i$     |
| - Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN                | $L/1000^i$    |
| - Deslocamento horizontal, exceto para pontes rolantes siderúrgicas  | $L/400$       |
| - Deslocamento horizontal para pontes rolantes siderúrgicas  | $L/600$       |
| Galpões em geral e edifícios de um pavimento:  |               |
| - Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base  | $H/300$       |
| - Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base  | $H/400^{k,l}$ |
| Edifícios de dois ou mais pavimentos:  |               |
| - Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base  | $H/400$       |
| - Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos   | $h/500^m$     |

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 117)

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os cálculos e verificações propostas pelo trabalho, sendo o objeto de estudo um galpão construído em estrutura metálica com vedação em blocos de concreto.

### 4.1 O galpão

Localizado no município de Pouso Alegre, o Galpão Metálico foi construído frente a uma residência e, atualmente vem sendo desenvolvido as atividades do setor de serralheria em suas acomodações. O terreno possui área de 200m<sup>2</sup>, e em sua vista de fachada é possível observar a entrada a esquerda para a residência, logo a sua direita o acesso a oficina.

Figura 11: Fachada galpão metálico



Fonte: O autor

Inicialmente foram feitas algumas avaliações técnicas no local, como conhecer os materiais utilizados em sua construção, locação dos cômodos, distancia entre as tesouras, seção dos perfis empregados ao longo da estrutura, comprimento dos vãos etc.

De um modo geral, visualmente o galpão possui um bom aspecto físico de execução. Ao começar pela cobertura que, embora simples, é composta por telhas trapezoidais, sendo chapas galvanizadas com espessura de 0,65mm apoiadas nas terças.

Figura 12: Elementos estruturais do galpão

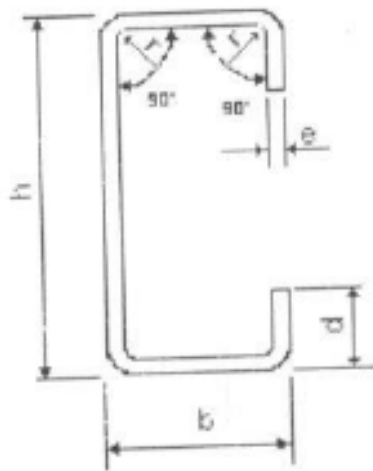


Fonte: O autor

Assim como as telhas da cobertura, as telhas do fechamento lateral são de chapa galvanizada de 0,65mm, utilizadas a partir dos 3m de altura.

As terças da cobertura assim como o fechamento lateral, possuem seção transversal de perfil “C” ou “U” enrijecidas, com chapas de espessura 3,04mm, apoiadas nas tesouras.

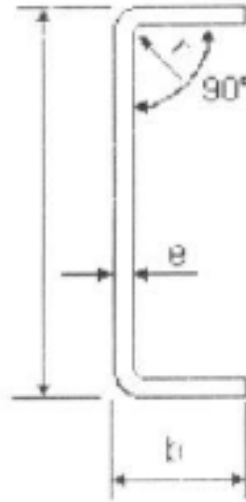
Figura 13: Seção transversal  
Perfil C enrijecido



Fonte: Pinheiro (2005)

Embora todas as tesouras sejam constituídas também por peças com seção transversal em perfil “C” ou “U”, não há mais a utilização da chapa dobrada (d), para assim enrijecer a peça. A distância entre as tesouras são de 3,45m, distribuídas igualmente entre todas.

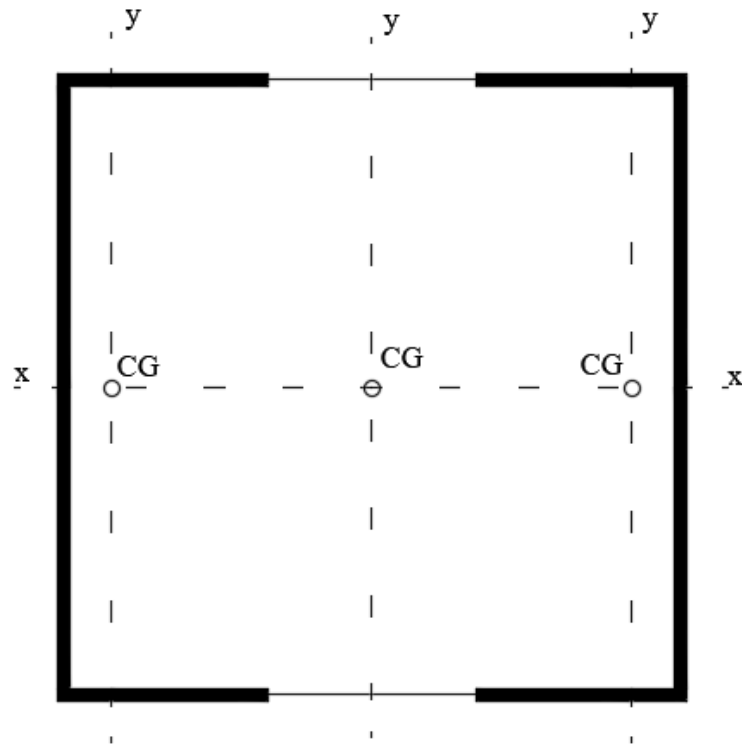
Figura 14: Seção transversal perfil C



Fonte: Pinheiro (2005)

Para apoiar as tesouras foram utilizados dois perfis “C” trabalhando em conjunto como uma só seção transversal, como mostra a figura 15:

Figura 15: Dois perfis “C” em conjunto



Fonte: O autor, adaptado Autocad

Em sua vista lateral é possível observar os perfis “C” sendo ligados e travados lateralmente por perfis cantoneira.



Figura 16: Pilar P8 visto lateralmente.



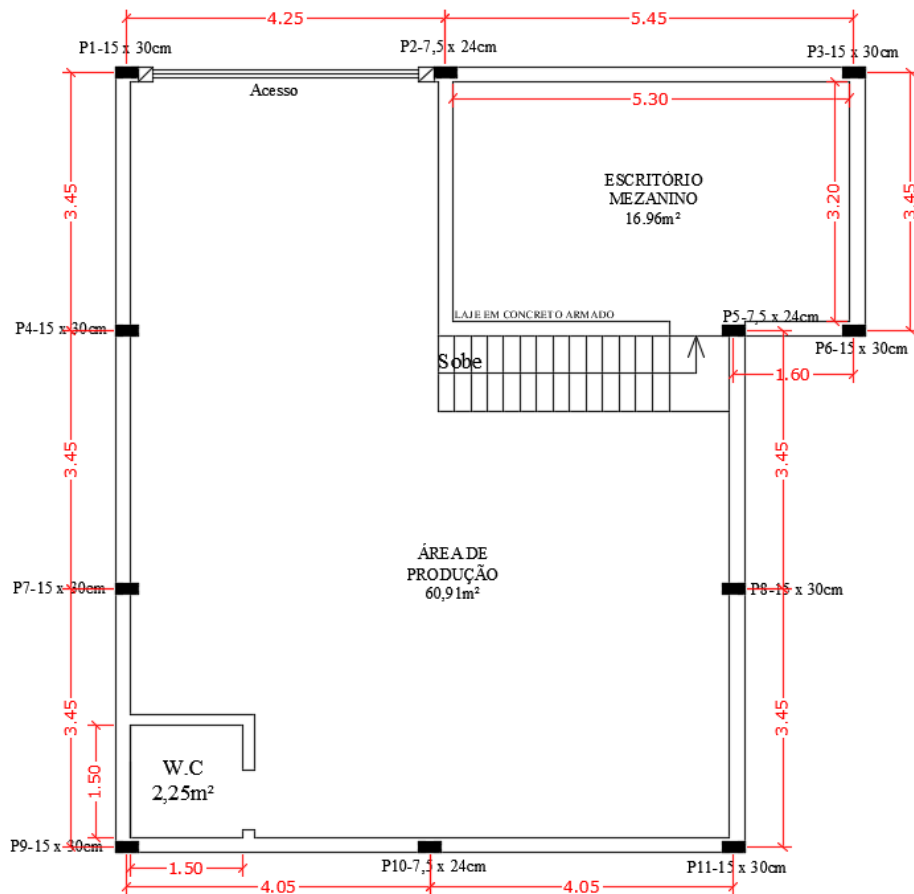
Fonte: O autor

É importante enfatizar que ao longo da estrutura foram utilizados duas medidas diferentes para a mesma seção transversal dos pilares, de modo que, os pilares P2, P5 e P10 possuem alma da seção transversal de 75mm, enquanto os demais pilares possuem alma de altura 150mm.

Um detalhe importante a ser considerado, é o fato de que os pilares citados acima não foram utilizados para suportar plenamente os carregamentos oriundos da cobertura, contudo para o fechamento lateral. O pilar P2 ainda é utilizado para auxiliar na fixação do portão e suportar os carregamentos oriundos do mezanino junto ao Pilar P5.

O galpão ainda possui alvenaria em bloco de concreto em todo seu perímetro, inclusive nas repartições internas, como no banheiro e na separação entre o acesso a garagem residencial e o acesso à oficina.

Figura 17: Planta baixa arquitetônica do galpão e locação dos pilares



Fonte: O autor, adaptado Autocad

## 4.2 Verificação quanto à estabilidade da estrutura

Os cálculos previstos segundo a norma ABNT NBR 8800:2008, para o dimensionamento dos perfis empregados na estrutura, foram desenvolvidos entre os meses de fevereiro a julho do ano de 2018.

### 4.2.1 Dados preliminares do projeto

- Cidade de Pouso Alegre, Bairro Morumbi.
- Todos os perfis e seções dos elementos estruturais componentes da estrutura do galpão são da série ASTM – A36;
- Cobertura em telha de aço galvanizado no formato trapezoidal;

- Declividade da cobertura 15°;
- As colunas são de dupla seção de perfil “C”.
- Os fechamentos laterais são feitos em alvenaria com 3m de altura, como o pé direito total é de 5,9m o fechamento lateral em telha de aço galvanizada é de 2,9m.
- Maior dimensão de 10,35m e o lado com menor dimensão possui 10,0m de comprimento.

### 4.3 Cálculo da ação do vento

O cálculo da ação do vento foi verificado de acordo com a ABNT NBR 6123: 1988 – Forças devidas ao vento em edificações, e para isto, foram necessárias conhecer as dimensões externas do galpão, assim como sua altura. Os cálculos ainda contaram com a ajuda do programa visual ventos, que neste caso, forneceu uma precisão maior nos dados adotados e nos modelos de cálculos abordados.

Para calcular a ação do vento na estrutura, é preciso conhecer a pressão dinâmica ocorrida basicamente em três alturas pré-estabelecidas, sendo elas: 3,0m, 5,0m e 10,0m, dada a equação:

$$q_{\text{vento}} = 0,613 \times V_k^2 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Onde:

$$V_k = V_o \times S_1 \times S_2 \times S_3$$

Onde:

$V_o$  – Valor obtido a partir do gráfico de isopletras;

$S_1$  – Fator topográfico;

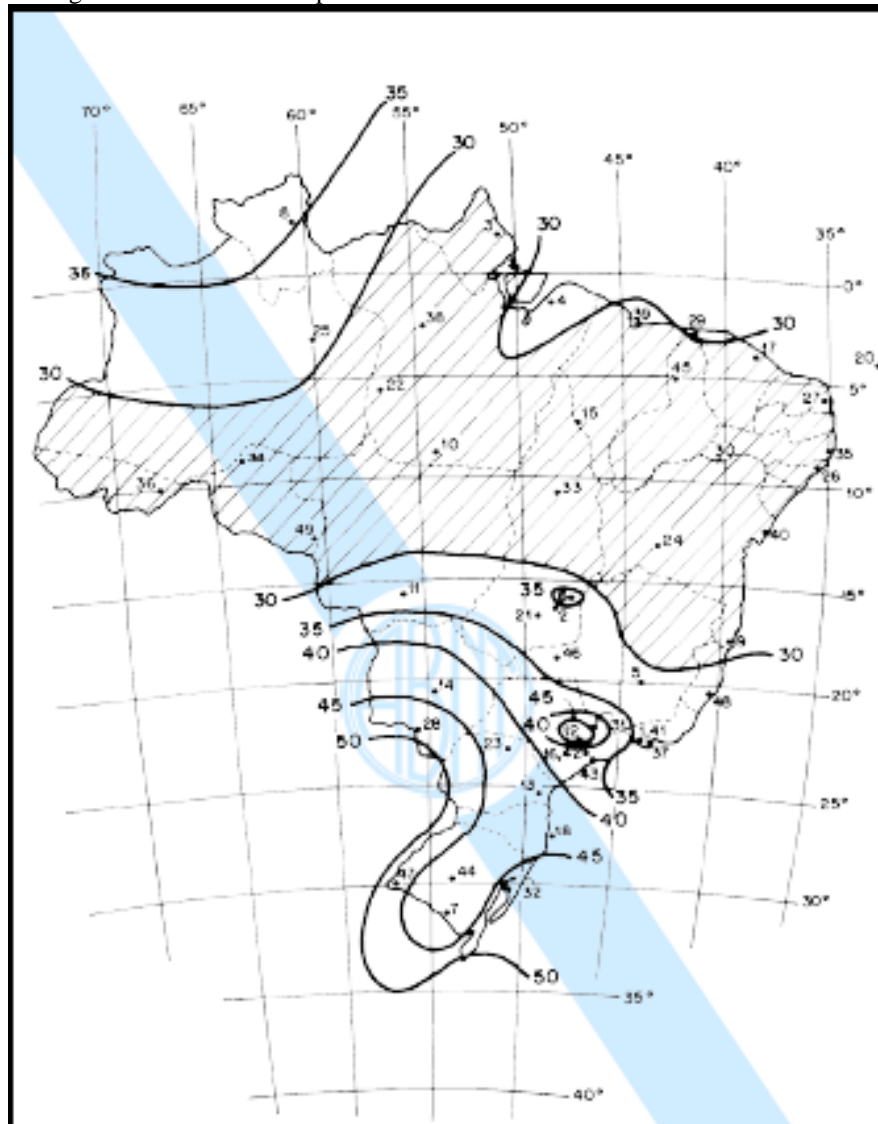
$S_2$  – Rugosidade;

$S_3$  – Fator estatístico

Como o galpão possui 5,9m de altura de pé direito, para efeito de dimensionamento, será utilizado nos 0,9m excedentes dos 5,0m inteiros, os valores de 10,0m de altura.

Deste modo, foi encontrado um valor aproximado de 35m/s utilizando o gráfico de isopletras, tomando como base a ação do vento no município de Pouso Alegre – MG.

Figura 18: Gráfico de Isopletas – Fator Vo



Fonte: ABNT NBR 6123: 1988, pag 06.

Prosseguindo o dimensionamento, temos o fator S1, que para as características do galpão adotou-se o valor de 1,0, por se tratar de um local plano.

O fator S2 é encontrado em função de 3 características, são elas:

- Rugosidade do terreno – 5 categorias;
- Dimensões da edificação – 3 classes;
- Altura da atuação do vento, como já dito, 3,0m, 5,0m e 10,0m.

A equação geral para a determinação dos três fatores S2 é dada por:

$$S2 = b \times Fr \times (Z/10)^p$$

Onde:

b, Fr e p são dispostos no quadro 05, pag 09 da ABNT NBR 6123: 1988;

Z – Altura

Quadro 05: Coeficientes para determinação fator S2.

| Categoria | $z_p$<br>(m) | Parâmetro | Classes |       |       |
|-----------|--------------|-----------|---------|-------|-------|
|           |              |           | A       | B     | C     |
| I         | 250          | b         | 1,10    | 1,11  | 1,12  |
|           |              | p         | 0,06    | 0,065 | 0,07  |
| II        | 300          | b         | 1,00    | 1,00  | 1,00  |
|           |              | $F_r$     | 1,00    | 0,98  | 0,95  |
|           |              | p         | 0,085   | 0,09  | 0,10  |
| III       | 350          | b         | 0,94    | 0,94  | 0,93  |
|           |              | p         | 0,10    | 0,105 | 0,115 |
| IV        | 420          | b         | 0,86    | 0,85  | 0,84  |
|           |              | p         | 0,12    | 0,125 | 0,135 |
| V         | 500          | b         | 0,74    | 0,73  | 0,71  |
|           |              | p         | 0,15    | 0,16  | 0,175 |

Fonte: ABNT NBR 6123: 1988, pag 09.

Por ultimo, antes do calculo da pressão dinâmica, é necessário conhecer a ultima variável S3, onde é determinado o fator estatístico.

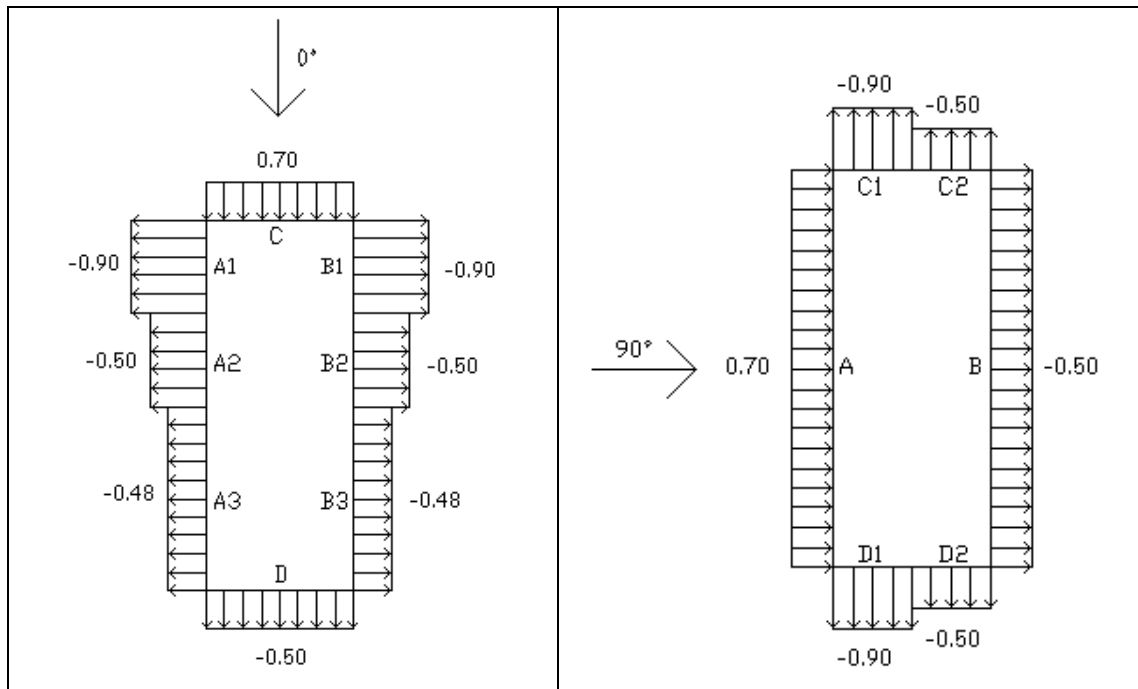
Quadro 06: Valores mínimos do fator estatístico –  $S_3$ 

| 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, pag 10.

Após a obtenção de todas as variáveis, chegou-se a fase dos coeficientes de pressão externos -  $C_{pe}$ , ou seja, são conhecidos os valores em razão do ângulo de atuação do vento na edificação de acordo com a ABNT NBR 6123: 1988.

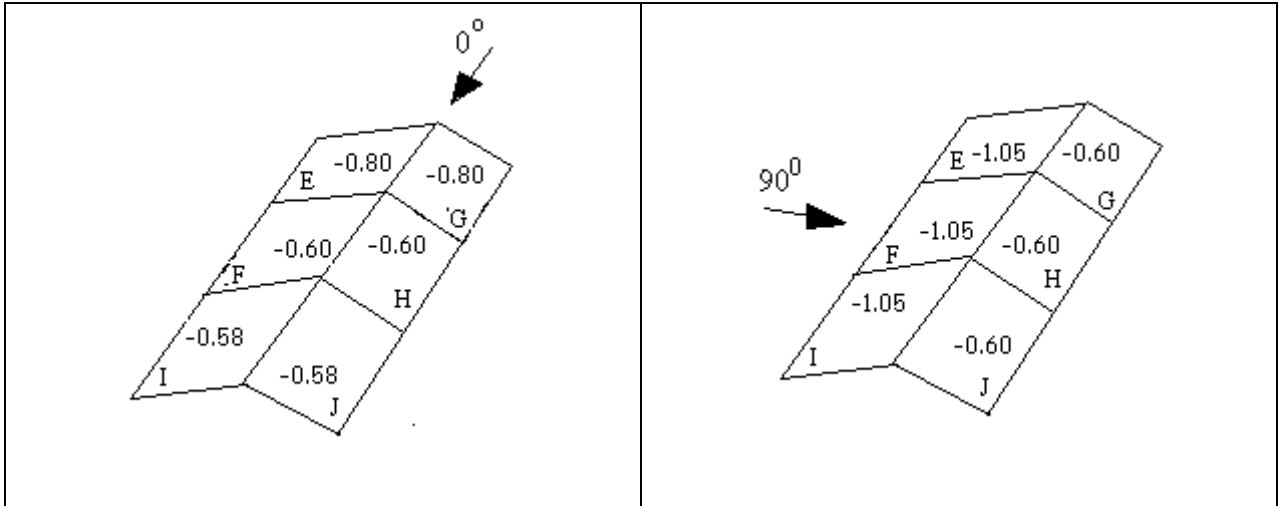
Para a atuação do vento no ângulo de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , ou seja, o vento atuando diretamente a partir da vista frontal e lateral temos os seguintes valores para as paredes do galpão.

Quadro 07 :  $C_{pe}$  – Valores obtidos e retirados do programa visual ventos para paredes.

Fonte: Relatório Visual ventos, adaptado autor.

Do mesmo modo, com o auxílio do programa visual ventos, foi possível determinar os coeficientes externos para a cobertura.

Quadro 08 : Cpe – Valores dos coeficientes para cobertura.



Fonte: Relatório Visual ventos, adaptado autor.

Os valores dos coeficientes imediatamente antes de serem calculados os carregamentos distribuídos nos pórticos são:

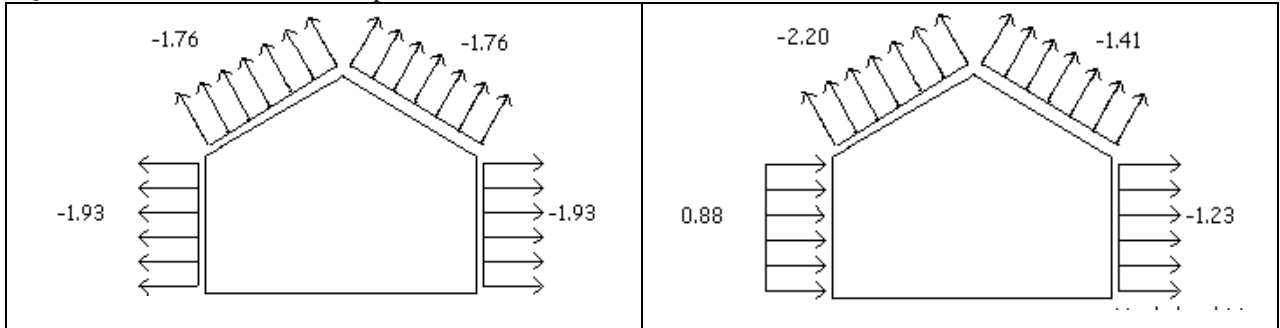
Quadro 09: Valores dos coeficientes e valor característico do vento

| <b>Cpe – coeficiente de pressão externo médio:</b> | <b>Cpi - Coeficiente de pressão interno:</b> | <b>Pressão Dinâmica do Vento:</b> |
|--|--|-----------------------------------|
| 1,1  | Cpi 1 – 0,20<br>Cpi 2 – -0,30                | q = 0,51 KN/m <sup>2</sup>        |

Fonte: Relatório Visual ventos, adaptado autor.

Para efeito de cálculo serão apresentados os dois piores casos encontrados, ou seja, onde os valores dos carregamentos distribuídos nos pórticos são elevados em consideração ao galpão em estudo. Iremos tratar como vento 1 o pórtico com vento na direção de 0°, sendo o Cpi = 0,20. Já para o vento 2, irá ser considerado o pórtico com vento na direção de 90° com Cpi = 0,20. Dado o quadro 10 os respectivos pórticos:

Quadro 10: Portico a 0° e 90° respectivamente – valores em KN/m.

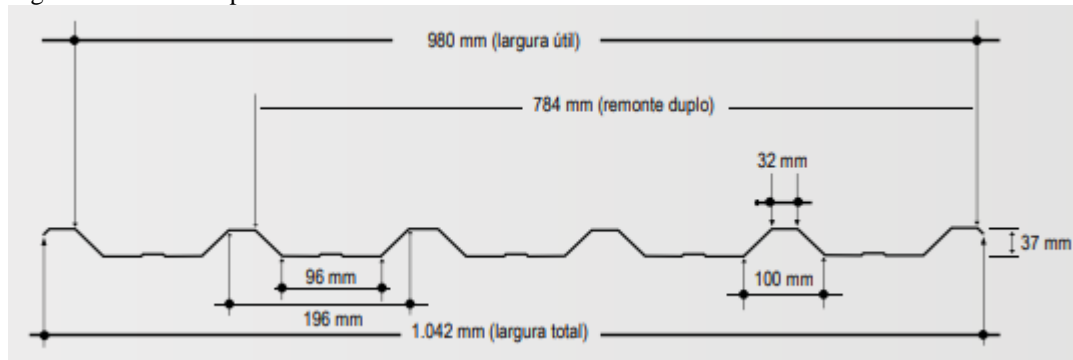


Fonte: Relatório Visual ventos, adaptado autor.

#### 4.4 Carregamento nas telhas da cobertura

Para o dimensionamento das telhas da cobertura foi utilizado o Catálogo de Telhas Ananda, o qual há uma variedade de telhas disponíveis no mercado. Para o nosso trabalho foi utilizada a telha mais próxima do encontrado in loco, como mostra a imagem a seguir:

Figura 19: Telha Trapezoidal modelo – AT 40/980



Fonte: Catálogo de telhas Ananda, adaptado autor.

Conhecidas as dimensões das telhas, serão então definidos os carregamentos a que a telha suporta, deste modo o quadro a seguir fornece os carregamentos ( $\text{Kg}/\text{m}^2$ ) em função do número de apoios. Nota-se que quanto maior o vão entre os apoios, menor será a capacidade da telha para suportar a sobrecarga.



Figura 20: Valores de sobrecarga em função do número de apoios e comprimento do vão.

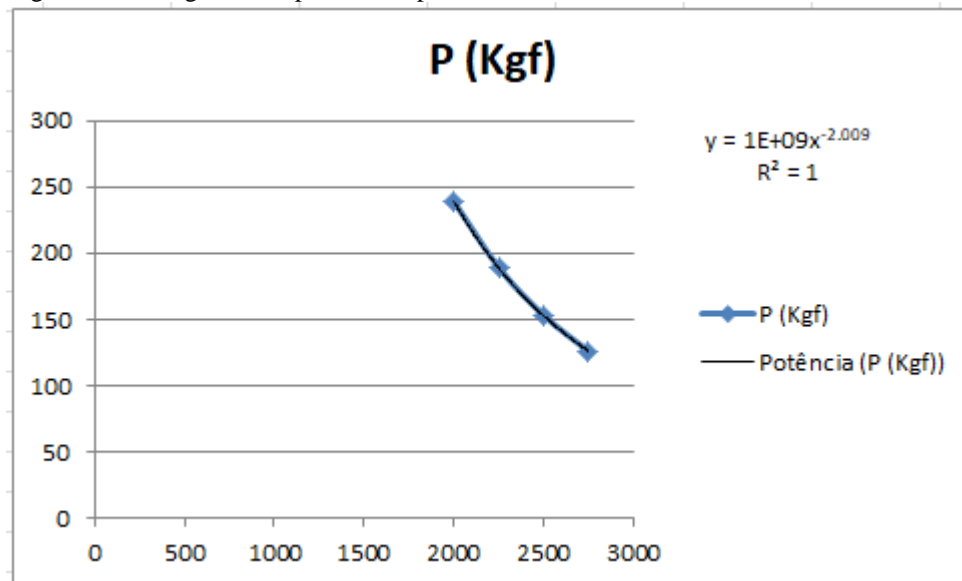
| ESPESSURA (mm) | Nº DE APOIOS | DISTÂNCIA ENTRE APOIOS (mm) |     |       |     |       |     |       |     |
|----------------|--------------|-----------------------------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
|                |              | 2.000                       |     | 2.250 |     | 2.500 |     | 2.750 |     |
|                |              | F                           | C   | F     | C   | F     | C   | F     | C   |
| 0,43           |              | 128                         | 128 | 101   | -   | -     | -   | -     | -   |
|                |              | 128                         | 128 | 101   | -   | -     | -   | -     | -   |
|                |              | 161                         | 161 | 127   | 127 | 103   | 103 | -     | -   |
| 0,50           |              | 149                         | 149 | 118   | -   | -     | -   | -     | -   |
|                |              | 149                         | 149 | 118   | -   | -     | -   | -     | -   |
|                |              | 186                         | 186 | 147   | 147 | 119   | 119 | -     | -   |
| 0,65           |              | 191                         | 191 | 151   | 138 | 122   | 100 | -     | -   |
|                |              | 191                         | 191 | 151   | 151 | 122   | 122 | 101   | 101 |
|                |              | 239                         | 239 | 189   | 189 | 153   | 153 | 126   | 126 |

Fonte: Catálogo de telhas Ananda, adaptado autor.

De acordo com a tabela utilizada, considerando a espessura da telha de 0,65mm e os quatro apoios existentes na estrutura, obtemos o valor da sobrecarga limite admissível pela telha, encontrando um valor de 239 Kg/m<sup>2</sup> ou 2390 N/m<sup>2</sup>. Porém, o vão que ocorre entre as telhas na estrutura possui 1,7m, logo não há na tabela um carregamento para esse comprimento. Neste caso, com ajuda do software excel, através das opções gráficas de dispersão, foi possível determinar qual a equação equivalente mais próxima para tal situação, de modo que o carregamento admissível para o vão de 1,7m, seja o mais próximo da realidade. Utilizando para o eixo das ordenadas os valores dos carregamentos atuantes e para o eixo das abscissas os valores dos vão dispostos na tabela.

A seguir a figura 21 apresenta a equação que mais se aproxima do carregamento admissível para o vão desejado, sendo que, R<sup>2</sup> deverá ser o mais próximo de 1(um).

Figura 21: Carregamento aproximado para vão de 1,7 metros.



Fonte : O autor

Desta maneira, a linha de tendência para função potencial é  $Y = 1 \times 10^9 \times X^{-2.009}$ ;

Onde:

Y – Carga a ser encontrada;

X – Vão considerado.

Atribuindo para o valor de “X” o valor de 1700mm do vão das telhas, encontramos um valor de 323,61 Kg/ m<sup>2</sup>, ou seja, o valor admissível que a telha suporta em função do vão de 1,7m de comprimento.

Após encontrar o carregamento admissível para as telhas da cobertura, é possível e necessário conhecer os carregamentos atuantes, para isto tem-se o quadro a seguir:

Quadro 11: Valores dos carregamentos

|                           |                          |
|---------------------------|--------------------------|
| PESO PRÓPRIO (PP)         | 20,05 N/m <sup>2</sup>   |
| SOBRECARGA (SC)           | 250 N/m <sup>2</sup>     |
| TOTAL                     | 270,05 N/m <sup>2</sup>  |
| VENTO SUÇÇÃO              | -1020 N/m <sup>2</sup>   |
| COMBINAÇÃO – PP + SC      | 270,05 N/m <sup>2</sup>  |
| COMBINAÇÃO – PP + VENTO 1 | -999,05 N/m <sup>2</sup> |

Fonte : O autor.

Deste modo, há de se considerar que o carregamento de 3236,1 N/m<sup>2</sup> é superior a pior condição ou combinação a que as telhas da cobertura estão sendo submetidas de -999,05 N/m<sup>2</sup>.

#### 4.5 Carregamento nas telhas do fechamento lateral

Do mesmo modo, considerando um vão de 1,45m de uma altura total de 2,9m e utilizando a mesma equação do item 4.2.3, foi encontrado o valor admissível de 2334,7 N/m<sup>2</sup>.

Para o fechamento lateral assim como para a cobertura, foi utilizada a pior condição da pressão dinâmica do vento, entretanto o valor do coeficiente médio para fechamento lateral será de -1,3, conforme mostra o quadro 12:

Quadro 12: Valores dos coeficientes para cálculo das telhas da cobertura e fechamento lateral.

| COEFICIENTES PARA CÁLCULO DAS TELHAS |         |         |           |
|--------------------------------------|---------|---------|-----------|
|                                      | LATERAL | FRONTAL | COBERTURA |
| C <sub>pe</sub>                      | -1.1    | 0.7     | -1.8      |
| C <sub>pi</sub>                      | -0.2    | 0.3     | -0.2      |
| TOTAL                                | -1.3    | 1       | -2        |

Fonte: O autor

Assim é possível determinar o carregamento atuante nas telhas laterais, multiplicando o valor do coeficiente em questão pela pressão dinâmica do vento, é dado:

$$\text{Vento} = -1,3 \times 0,51 \times 1000$$

$$\text{Vento} = -663 \text{ N/m}^2 \text{ (sucção)}$$

Como o valor de -663 N/m<sup>2</sup> é inferior ao admissível de 2334,7 N/m<sup>2</sup>, as telhas do fechamento lateral atendem a favor da segurança.

#### 4.6 Carregamento das terças

Para o cálculo das terças serão considerados todos os cálculos anteriores, em vista de que as terças deverão suportar além de seu peso próprio, também o peso dos carregamentos das telhas e a sobrecarga considerada.

Desta maneira é dada as informações abaixo do perfil de aço utilizado como terço da cobertura na estrutura:

Quadro 13: Dados do perfil da terço da cobertura

| Dimensões da terço |    |    |       | S               | P    | Jx              | Wx              | ix  | ey   | Jy              | Wy              | ly   |
|--------------------|----|----|-------|-----------------|------|-----------------|-----------------|-----|------|-----------------|-----------------|------|
| h                  | B  | d  | e = r | cm <sup>2</sup> | kg/m | cm <sup>4</sup> | cm <sup>3</sup> | cm  | cm   | cm <sup>4</sup> | cm <sup>3</sup> | cm   |
| mm                 | mm | mm | mm    |                 |      |                 |                 |     |      |                 |                 |      |
| 75                 | 40 | 15 | 3.04  | 4.9             | 3.85 | 41.1            | 10.9            | 2.9 | 1.48 | 10.38           | 4.13            | 1.46 |

Fonte : O autor

Observada a informação na Coluna “P” ou seja, o peso por metro linear do perfil, é possível estimar o carregamento do peso próprio da peça. Neste caso serão descritos no quadro 14 os carregamentos que a terço deverá suportar:

Quadro 14: Carregamentos considerados para dimensionamento das terços da cobertura

|                         |   |
|-------------------------|---|
| PESO PRÓPRIO TERÇOS     | $22,56 \text{ N/m}^2 \times 1,7\text{m} = \mathbf{38,35 \text{ N/m}}$   |
| PESO PRÓPRIO DAS TELHAS | $20,05 \text{ N/m}^2 \times 1,7\text{m} = \mathbf{34,08 \text{ N/m}}$   |
| TOTAL                   | <b>72,71 N/m</b>  |
| SOBRECARGA              | $250 \text{ N/m}^2 \times 1,7\text{m} = \mathbf{426,66 \text{ N/m}}$    |
| VENTO SUÇÃO             | $-1020 \text{ N/m}^2 \times 1,7\text{m} = \mathbf{-1740,8 \text{ N/m}}$ |

Fonte : O autor

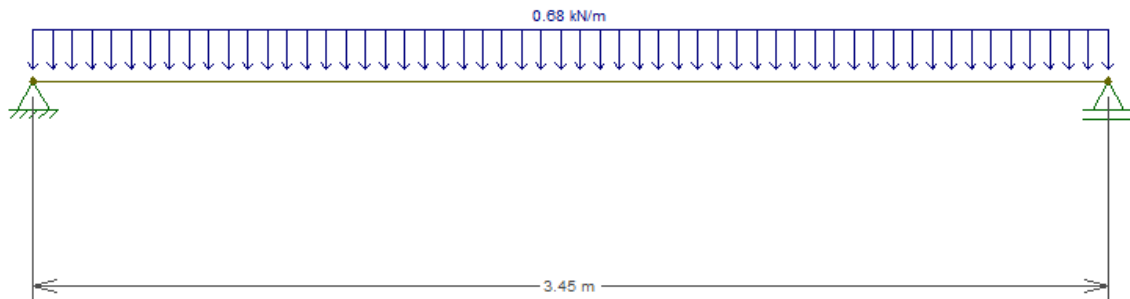
Para facilitar e melhorar a precisão dos cálculos, foi utilizado o software ftool, que possibilita lançar os carregamentos encontrados na planilha para uma visualização do comportamento da estrutura, assim como determinar o esforço cortante máximo e o momento fletor máximo.

As terços possuem comprimento entre as tesouras de 3,45m e possuem distância paralelas entre elas de 1,7m, deste modo, chega-se a uma área de influencia de 5,88m<sup>2</sup>. Logo o comprimento de uma água do banzo superior das treliças possui 5,12m de comprimento divididos em três vãos.

Os carregamentos foram divididos em duas combinações, sendo chamado de carregamento 1 o peso próprio dos elementos que a terço deverá suportar, mais o peso do próprio perfil da terço somados a sobrecarga encontrada. O carregamento dois é o mesmo valor do peso

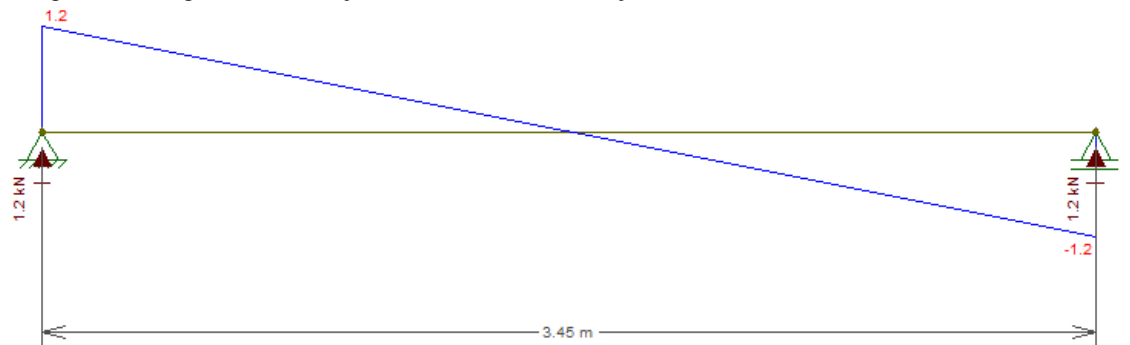
próprio anterior somado ao valor negativo do vento de sucção, mostrados a seguir respectivamente:

Figura 22: COMBINAÇÃO 1 – PESO PRÓPRIO + SOBRECARGA (KN/m)



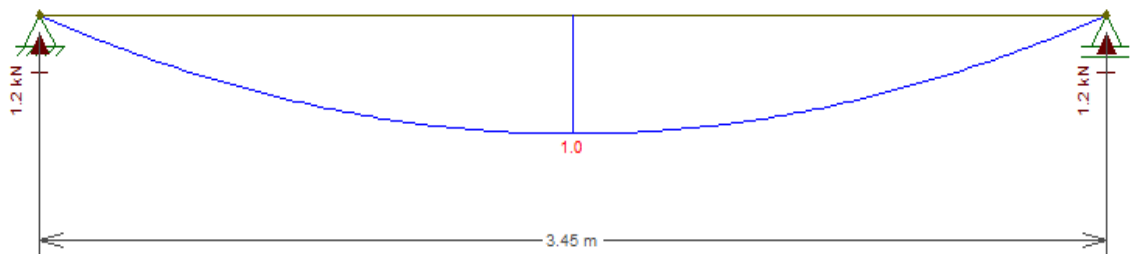
Fonte : O autor

Figura 23: Diagrama de esforço cortante – COMBINAÇÃO 1 – PP + SC (KN)



Fonte : O autor

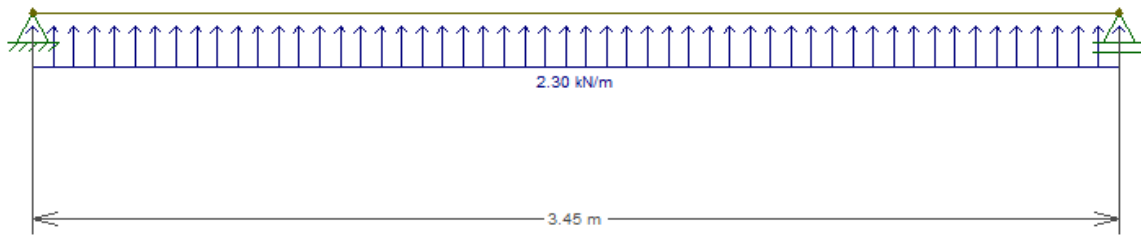
Figura 24: Diagrama de momento fletor – COMBINAÇÃO 1 – PP + SC (KN.m)



Fonte : O autor.

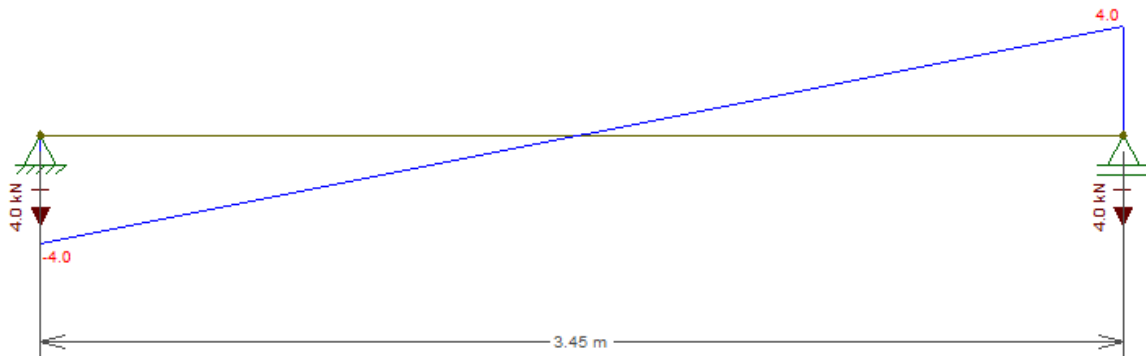
Do mesmo modo, temos o carregamento 2 (dois), considerando o peso próprio dos componentes somado ao vento de sucção, temos:

Figura 25: COMBINAÇÃO 2 – PESO PRÓPRIO + VENTO (KN/m)



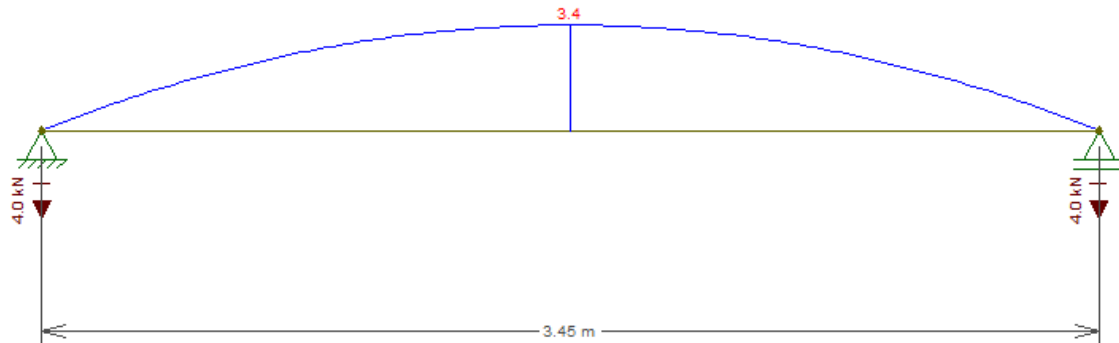
Fonte : O autor

Figura 26: Diagrama de esforço cortante – COMBINAÇÃO 2 – PP + VENTO (KN)



Fonte : O autor

Figura 27: Diagrama de momento fletor – COMBINAÇÃO 2 – PP + SC (KN.m)



Fonte : O autor

#### 4.7 Verificação do perfil da terça

Uma vez conhecidos os esforços internos e o perfil empregado na estrutura, é possível determinar se o perfil irá atender aos requisitos dispostos na norma ABNT NBR 8800: 2008. Sendo assim, a seguir, será descrito o roteiro para determinação dos esforços suportados pelo perfil. Dado novamente o quadro 15:

Quadro 15: Dados do perfil da terça da cobertura

| Dimensões da terça |    |    |       | S               | P    | I <sub>x</sub>  | W <sub>x</sub>  | r <sub>x</sub> | e <sub>y</sub> | I <sub>y</sub>  | W <sub>y</sub>  | r <sub>y</sub> |
|--------------------|----|----|-------|-----------------|------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| h                  | B  | d  | e = r | cm <sup>2</sup> | kg/m | cm <sup>4</sup> | cm <sup>3</sup> | cm             | cm             | cm <sup>4</sup> | cm <sup>3</sup> | cm             |
| mm                 | mm | mm | mm    |                 |      |                 |                 |                |                |                 |                 |                |
| 75                 | 40 | 15 | 3.04  | 4.9             | 3.85 | 41.1            | 10.9            | 2.9            | 1.48           | 10.38           | 4.13            | 1.46           |

Fonte : O autor

Logo no início da verificação, é determinado um valor médio para adotar-se o perfil mais próximo da necessidade real da estrutura em função do vão, deste modo temos:

$$L/60 < d < L/40,$$

ou seja,

$3450/60 = 57,5 > d > 3450/40 = 86,25$ , como a altura da terça utilizada é de 75mm, o perfil esta dentro do limite de pré-dimensionamento.

Logo em seguida é determinado os valores para os estados limites de FLM, FLA e FLT, respectivamente:

Para o Eixo X,

Quadro 16: Verificação para FLM

| FLM - Verificação eixo X |             |
|--------------------------|-------------|
| $\lambda$                | 13.15789474 |
|                          |             |
| $\lambda_p$              | 10.74802307 |
|                          |             |
| $\lambda_r$              | 28.05912126 |
| Kc                       | 0.805315673 |
| $\theta$ Tensão res.     | 75          |
| Wc (cm <sup>3</sup> )    | 20.55       |
|                          |             |
| Mcr (KN/cm)              | 1638.01584  |
| Mcr (N.m)                | 16380.1584  |

Fonte : O autor

Quadro 17: Verificação para FLA

| FLA - Verificação eixo X |             |
|--------------------------|-------------|
| $\lambda$                | 22.67105263 |
|                          |             |
| $\lambda_p$              | 106.3488599 |
|                          |             |
| $\lambda_r$              |             |
|                          |             |
| <b>Mpl (KN.cm)</b>       | 305.2       |
| <b>Mpl (N.m)</b>         | 3052        |

Fonte: O autor

Quadro 18: Verificação para FLT

| FLT - Verificação eixo X                                     |             |
|--|-------------|
| $\lambda$  | 236.3013699 |
|  |             |
| $\lambda_p$  | 49.7803174  |
|  |             |
| $\lambda_r$  | 215.3239972 |
| <b><math>\beta_1</math></b>                                  | 0.065775862 |
| <b><math>\theta</math> Tensão res.<br/>(N/m<sup>2</sup>)</b> | 75          |
| <b>J (cm<sup>4</sup>)</b>                                    | 0.145009576 |
| <b>C<sub>w</sub></b>   | 74.74460257 |
| <b>C<sub>b</sub></b>   | 1           |
| <b>M<sub>cr</sub> (KN.cm)</b>                                | 145.9702698 |
| <b>M<sub>cr</sub> (N.m)</b>                                  | 1459.702698 |

Fonte: O autor

Sendo assim, os valores de 16.380,16N.m, 3052,0N.m e 1459,7N.m são os valores correspondentes aos estados limites relativos a flexão do perfil para o eixo “X”.

Já para o eixo “Y”, os valores serão verificados somente para FLM, pois se tratando de flexão composta, o estado limite para FLA só é tratado para a alma do perfil, quanto a FLT, não há comprimento para ser considerado, logo não irá haver flambagem lateral com torção.



Quadro 19: Verificação para FLM

| FLM - Verificação eixo Y   |             |
|----------------------------|-------------|
| $\lambda$                  | 24.67105263 |
|                            |             |
| $\lambda_p$                | 10.74802307 |
|                            |             |
| $\lambda_r$                | 28.05912126 |
| <b>Mcr (KN/cm)</b>         | 117.6714445 |
| <b>Wc (cm<sup>3</sup>)</b> | 5.19        |
| <b>Mcr (N.m)</b>           | 1176.714445 |

Fonte: O autor

Após o conhecimento dos carregamentos suportados pelo perfil, é feita a verificação dos esforços combinados, dada a seguinte relação:

$$(M_{sdx} / M_{Rdx}) + (M_{sdy} / M_{Rdy}) < 1$$

Onde:

M<sub>sd</sub> – Momento fletor máximo atuante;

M<sub>Rd</sub> – Momento fletor admissível da peça.

Inserindo os valores correspondentes, a verificação ficará da seguinte maneira:

#### **Para combinação 1 – Peso Próprio + Sobrecarga**

$$(669,22 / 3052 \times 0,9) + (1004,74 / 1176,71 \times 0,9) = 1,046 > 1$$

#### **Para combinação 2 – Peso próprio + Vento**

$$(39,2 / 3052 \times 0,9) + (3479,67 / 1176,71 \times 0,9) = 3,27 > 1$$

Nota-se que os valores utilizados para M<sub>Rd</sub> são os menores;

Para as duas combinações acima, nenhum dos valores foi menor que 1, ou seja, a peça não atende para esta verificação dos esforços combinados.

Em seguida há a verificação ao esforço cortante, utilizando o maior valor encontrado que, neste caso, relacionado à combinação 2 - PP + VENTO, sendo o valor do esforço cortante máximo de 4,0 KN, temos o quadro 20:

Quadro 20: Verificação para esforço cortante (KN).

| Verificação força cortante |             |
|----------------------------|-------------|
| Vy max. (KN) y             | 4           |
| $\lambda$                  | 22.67105263 |
| $\lambda_p$                | 69.57010852 |
| Kv                         | 5           |
| Vpl (KN)                   | 34.2        |
| VRd (KN)                   | 31.09090909 |
| Como VRd > Vy              | OK          |

Fonte: O autor

Já nesta verificação é possível aprovar a peça, uma vez que o esforço atuante no perfil é inferior ao esforço máximo que a peça pode ser submetida. Neste caso:

$$V_{sd} = 4 \text{ KN} < V_{Rd} = 31,09 \text{ KN}$$

V<sub>sd</sub> – Esforço cortante atuante;

V<sub>Rd</sub> – Esforço cortante admissível.

Para a última verificação, é calculada a flecha atuante, para este caso temos o quadro 21:

Quadro 21: Verificação da flecha máxima

| FLECHA MAXIMA                   |             |
|---------------------------------|-------------|
| Sentido descendente PP + SC     |             |
| $\xi$                           | 1.082487535 |
| Sentido ascendente PP + VENTO 1 |             |
| $\xi$                           | -3.74891163 |

Fonte: O autor

Para a combinação 1 – Peso próprio + Sobrecarga, temos a equação da flecha máxima descendente:

$$\text{Flecha máxima admissível} = 345 / 180 = 1,91\text{cm.}$$

Neste caso,

$$1,08\text{cm} < 1,91\text{cm}$$

Para a combinação 2 – Peso próprio + Vento, temos a equação da flecha máxima ascendente:

$$\text{Flecha máxima admissível} = 345 / 120 = 2,87\text{cm}$$

Neste caso,

$$3,74\text{cm} > 2,87\text{cm}$$

Deste modo, a primeira combinação atende a verificação para flecha máxima descendente, porém a segunda combinação não atende a verificação, uma vez que a flecha atuante é superior à flecha máxima admissível ascendente.

#### 4.8 Cálculo e verificação das tesouras

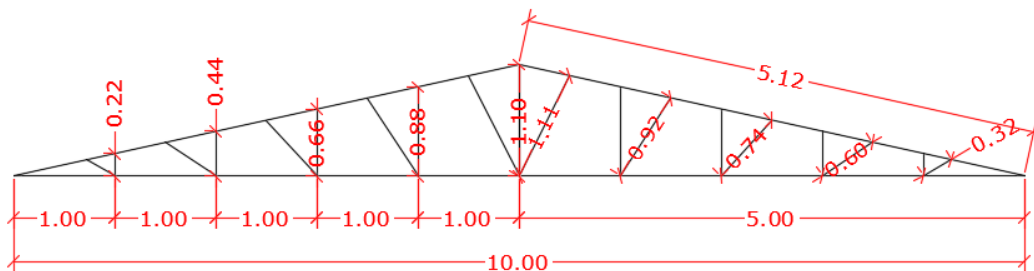
Para o cálculo das tesouras, assim como as terças, foi considerado os resultado anteriores, uma vez que as terças estão apoiadas nas tesouras.

Como já informado, as tesouras possuem distancia entre as mesmas de 3,45m, totalizando quatro tesouras ao longo da estrutura.

Utilizando o Software AutoCad, foi possível desenhar a treliça de modo organizado e preciso, possibilitando uma precisão maior aos cálculos.

As medidas das barras da tesoura são apresentadas na figura 28:

Figura 28: Medidas das barras em metros.



Fonte: O autor

Logo após, é possível estabelecer o peso da tesoura, somando primeiramente o comprimento das barras, mostrados no quadro 22:

Quadro 22: Comprimentos das barras da tesoura.

|                  |        |
|------------------|--------|
| L banzo superior | 10,24m |
| L banzo inferior | 10m    |
| L montantes      | 5,5m   |
| L diagonais      | 7,36m  |

|         |       |
|---------|-------|
| L total | 33,1m |
|---------|-------|

Fonte: O autor.

Como perfil utilizado é do tipo “C” – 7,3cm<sup>2</sup> x 5,3Kg/m, multiplicando o comprimento total pelo peso por metro, é possível determinar o peso próprio da treliça, somando então aos pesos das verificações anteriores, chegando nos valores de:

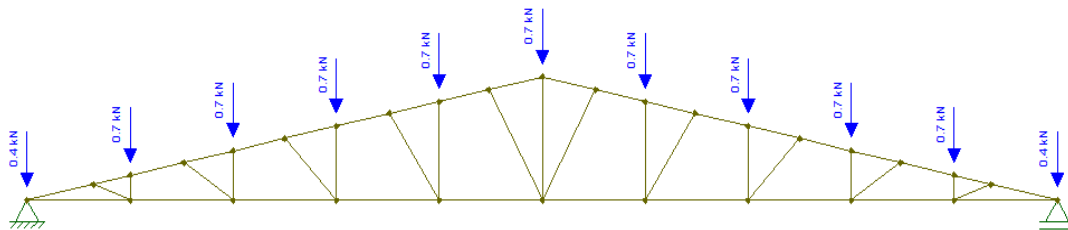
Quadro 23: Peso próprio das barras da tesoura.

|                         |  |
|-------------------------|--|
| Peso próprio das telhas | <b>34,21 N/ m</b>                                  |
| Peso próprio das terças | <b>38,5 N/ m</b>                                   |
| Peso próprio da tesoura | 53 N/ m <sup>2</sup> x 33,1m = <b>1896,63 N/ m</b> |
| <b>TOTAL</b>            | <b>1969,34 N/ m</b>                                |
| Sobrecarga              | <b>426,66 N/ m</b>                                 |

Fonte: O autor.

Multiplicando os valores (N/ m) pelo comprimento de 3,45m do vão entre as terças, obtemos o carregamento pontual da treliça, mostrado a seguir na figura 29:

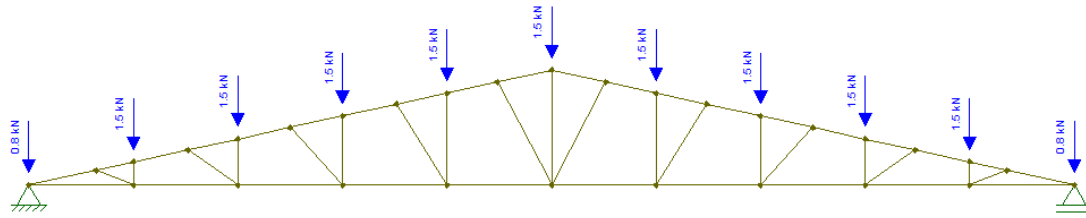
Figura 29: Carregamentos pontuais peso próprio (KN).



Fonte: O autor

Do mesmo modo, os carregamentos pontuais para a sobrecarga foram lançados na tesoura, mostrados na figura 30:

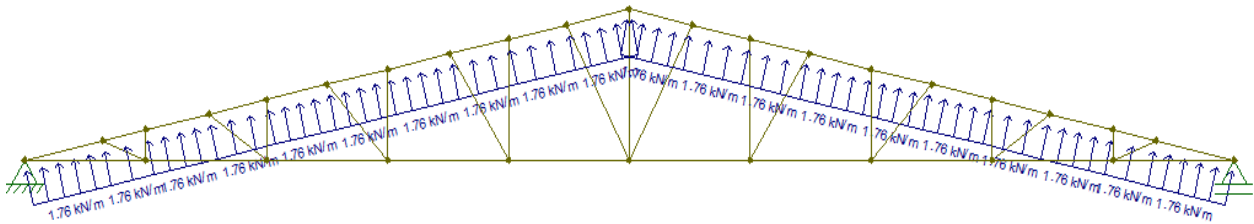
Figura 30: Carregamentos pontuais sobrecarga (KN).



Fonte: O autor

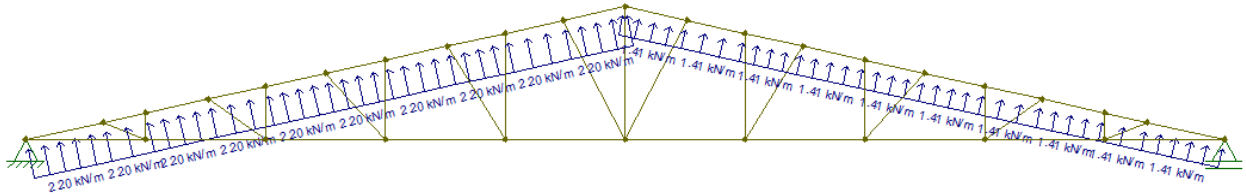
Para a consideração do carregamento devido ao vento, foram lançados as duas considerações mostradas anteriormente no cálculo dos ventos, sendo elas o caso A e caso B, mostradas a seguir:

Figura 31 Carregamento distribuído vento caso A - (KN/ m).



Fonte: O autor

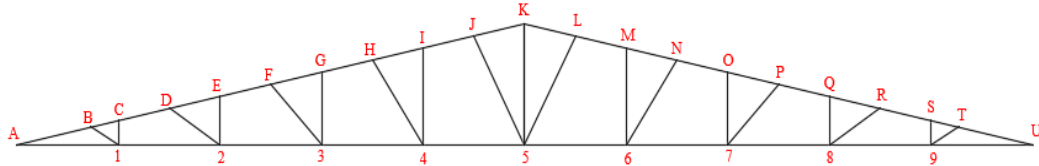
Figura 32: Carregamento distribuído vento caso B - (KN/ m).



Fonte: O autor

Para uma melhor orientação e praticidade nos cálculos, foram padronizados os nós das tesouras, utilizando ordem alfabética da esquerda para a direita no banço superior, no entanto, no banço inferior, utilizou-se números de 1 a 9, contados também da esquerda para a direita.

Figura 33: Padronização dos nós.



Fonte: O autor

Após o lançamento dos carregamentos, é possível com a ajuda do software Ftool determinar os esforços normais atuantes nas barras da treliça, de modo que haverá barras tracionadas e comprimidas. Os carregamentos das barras foram lançados em planilha com ajuda do software Excel, organizando-os e logo em seguida executando a combinação das cargas.

Quadro 24: Carregamento e combinação dos carregamentos nas barras - (N)

| POSIÇÃO        | BARRA  | PP (N) | SC (N) | VENTO 1 (N) | VENTO 2 (N) | PP + SC | PP + VENTO 1 | PP + VENTO 2 | MÁX. TRAÇÃO | MÁX. DE COMPRESSÃO | ESFORÇO/ CÁLCULO |
|----------------|--------|--------|--------|-------------|-------------|---------|--------------|--------------|-------------|--------------------|------------------|
| Banzo superior | AB     | -14600 | -31400 | 38700       | 43600       | -46000  | 24100        | 29000        | 44900       | -46000             |                  |
|                | BC     | -14500 | -31000 | 36700       | 41000       | -45500  | 22200        | 26500        |             |                    |                  |
|                | CD     | -13700 | -29500 | 35500       | 39500       | -43200  | 21800        | 25800        |             |                    |                  |
|                | DE     | -12900 | -27600 | 32800       | 36200       | -40500  | 19900        | 23300        |             |                    |                  |
|                | EF     | -12200 | -26200 | 31600       | 34600       | -38400  | 19400        | 22400        |             |                    |                  |
|                | FG     | -11300 | -24100 | 28900       | 31300       | -35400  | 17600        | 20000        |             |                    |                  |
|                | GH     | -10600 | -22600 | 27500       | 29500       | -33200  | 16900        | 18900        |             |                    |                  |
|                | HI     | -9700  | -20700 | 25100       | 26500       | -30400  | 15400        | 16800        |             |                    |                  |
|                | IJ     | -8900  | -19100 | 23500       | 24500       | -28000  | 14600        | 15600        |             |                    |                  |
|                | JK     | -8300  | -17700 | 21700       | 22200       | -26000  | 13400        | 13900        |             |                    |                  |
|                | KL     | -8300  | -17700 | 21700       | 22200       | -26000  | 13400        | 13900        |             |                    |                  |
|                | LM     | -8900  | -19100 | 23500       | 24500       | -28000  | 14600        | 15600        |             |                    |                  |
|                | MN     | -9700  | -20700 | 25100       | 26500       | -30400  | 15400        | 16800        |             |                    |                  |
|                | NO     | -10600 | -22600 | 27500       | 29500       | -33200  | 16900        | 18900        |             |                    |                  |
|                | OP     | -11300 | -24100 | 28900       | 31300       | -35400  | 17600        | 20000        |             |                    |                  |
|                | PQ     | -12200 | -26200 | 31600       | 34600       | -38400  | 19400        | 22400        |             |                    |                  |
| QR             | -12900 | -27600 | 32800  | 36200       | -40500      | 19900   | 23300        |              |             |                    |                  |
| RS             | -13700 | -29500 | 35500  | 39500       | -43200      | 21800   | 25800        |              |             |                    |                  |
| ST             | -14500 | -31000 | 36700  | 41000       | -45500      | 22200   | 26500        |              |             |                    |                  |
| TU             | -14600 | -31400 | 38700  | 43600       | -46000      | 24100   | 29000        |              |             |                    |                  |
| Banzo inferior | A1     | 14300  | 30600  | -37700      | -43300      | 44900   | -23400       | -29000       |             |                    |                  |
|                | 1.2    | 13500  | 29000  | -34300      | -39100      | 42500   | -20800       | -25600       |             |                    |                  |
|                | 2.3    | 12100  | 25900  | -30300      | -34100      | 38000   | -18200       | -22000       |             |                    |                  |
|                | 3.4    | 10600  | 22600  | -26100      | -28800      | 33200   | -15500       | -18200       |             |                    |                  |
|                | 4.5    | 9000   | 19300  | -22000      | -23600      | 28300   | -13000       | -14600       |             |                    |                  |
|                | 5.6    | 9000   | 19300  | -22000      | -22300      | 28300   | -13000       | -13300       |             |                    |                  |
|                | 6.7    | 10600  | 22600  | -26100      | -25600      | 33200   | -15500       | -15000       |             |                    |                  |
|                | 7.8    | 12100  | 25900  | -30300      | -29000      | 38000   | -18200       | -16900       |             |                    |                  |
|                | 8.9    | 13500  | 29000  | -34200      | -32200      | 42500   | -20700       | -18700       |             |                    |                  |
| 9U             | 14300  | 30600  | -37700 | -34900      | 44900       | -23400  | -20600       |              |             |                    |                  |
| Montante       | C1     | 0      | 0      | -700        | -900        | 0       | -700         | -900         |             |                    |                  |
|                | E2     | 500    | 1100   | -1800       | -2300       | 1600    | -1300        | -1800        |             |                    |                  |
|                | G3     | 1100   | 2300   | -3200       | -4000       | 3400    | -2100        | -2900        |             |                    |                  |
|                | I4     | 1600   | 3500   | -4600       | -5800       | 5100    | -3000        | -4200        |             |                    |                  |
|                | K5     | 4000   | 8600   | -11100      | -11400      | 12600   | -7100        | -7400        |             |                    |                  |
|                | M6     | 1600   | 3500   | -4600       | -4700       | 5100    | -3000        | -3100        |             |                    |                  |
|                | O7     | 1100   | 2300   | -3200       | -3800       | 3400    | -2100        | -2700        |             |                    |                  |
|                | Q8     | 500    | 1100   | -1800       | -2900       | 1600    | -1300        | -2400        |             |                    |                  |
| S9             | 0      | 0      | -700   | -1900       | 0           | -700    | -1900        |              |             |                    |                  |

|           |      |       |       |      |      |       |      |      |  |  |  |
|-----------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|--|--|--|
| Diagonais | B1   | -200  | -500  | 2400 | 3000 | -700  | 2200 | 2800 |  |  |  |
|           | D2   | -1200 | -2500 | 3700 | 4600 | -3700 | 2500 | 3400 |  |  |  |
|           | F3   | -1700 | -3500 | 4700 | 5900 | -5200 | 3000 | 4200 |  |  |  |
|           | H4   | -2100 | -4600 | 5900 | 7400 | -6700 | 3800 | 5300 |  |  |  |
|           | J5   | -2000 | -4400 | 5800 | 7100 | -6400 | 3800 | 5100 |  |  |  |
|           | L5   | -2000 | -4400 | 5800 | 4700 | -6400 | 3800 | 2700 |  |  |  |
|           | N6   | -2100 | -4600 | 5900 | 4700 | -6700 | 3800 | 2600 |  |  |  |
|           | P7   | -1700 | -3500 | 4700 | 3600 | -5200 | 3000 | 1900 |  |  |  |
|           | R8   | -1200 | -2500 | 3700 | 2900 | -3700 | 2500 | 1700 |  |  |  |
| T9        | -200 | -500  | 2400  | 1900 | -700 | 2200  | 1700 |      |  |  |  |

Fonte: O autor

Conhecendo os carregamentos atuantes nas barras, é possível então executar a verificação. Como toda a tesoura foi executada com a mesma seção transversal, foi possível utilizar apenas o maior carregamento para determinar se o perfil utilizado atende aos requisitos da norma ABNT NBR 8800: 2008.

Tomando como maiores carregamentos os seguintes valores:

- Máximo esforço de tração = 44.900 N
- Máximo esforço compressão = -46.000 N

A partir destes valores é possível comparar se os valores suportados pela peça serão maiores que os atuantes.

O perfil utilizado para toda tesoura é “C” – 7,3cm<sup>2</sup> x 5,73Kg/m, cujas propriedades mecânicas são mostradas no quadro 25:

Quadro 25: Dados do perfil da tesoura.

| Dimensões coluna |    |       | S               | P    | I <sub>x</sub>  | W <sub>x</sub>  | r <sub>x</sub> | e <sub>y</sub> | I <sub>y</sub>  | W <sub>y</sub>  | r <sub>y</sub> |
|------------------|----|-------|-----------------|------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| h                | B  | e = r | cm <sup>2</sup> | kg/m | cm <sup>4</sup> | cm <sup>3</sup> | cm             | cm             | cm <sup>4</sup> | cm <sup>3</sup> | cm             |
| mm               | mm | mm    |                 |      |                 |                 |                |                |                 |                 |                |
| 127              | 50 | 3,42  | 7,3             | 5,73 | 171,5           | 27              | 4,84           | 1,26           | 17,02           | 4,55            | 1,52           |
| 12,7             | 5  | 0,342 |                 |      |                 |                 |                |                |                 |                 |                |

Fonte: O autor

Baseando-se no maior carregamento encontrado, a favor da segurança, o carregamento comparado foi de -46.000 N. O comprimento útil utilizado para considerar o efeito da força axial de flambagem elástica, ou seja, estado limite para uma peça sujeita a compressão, foi de 66 centímetros. Este comprimento é variável dependendo de nó para nó, no entanto para efeito de cálculo este foi o maior comprimento entre os nós das treliças encontrado.

Dado o dimensionamento temos o quadro 26:

Quadro 26: Verificação à compressão do perfil da tesoura - (N).

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| $\lambda$            | 52.631579 |
| b/t                  | 35.134503 |
| Q                    | 1         |
| $N_{ex}$ (KN)        | 5284.1294 |
| $\lambda_0$          | 0.0025566 |
| $\chi$               | 0.9978622 |
| $N_c, R_d$ (N)       | 130078.46 |
| $N_c, R_d$ (N) / 1,1 | 118253.15 |

Fonte: O autor

Onde:

$N_d$  = Esforço atuante na peça;

$N_c, R_d$  = Esforço admissível da peça.

$$N_d = -46.000 \text{ N} \times 1,4 = -64.400 \text{ N}$$

$$N_c, R_d = 118.253,15 \text{ N}$$

Como  $N_d < N_c, R_d$  o perfil atende a verificação proposta.

#### 4.9 Cálculo e verificação das colunas

A ultima peça a ser verificada são os pilares ou colunas, estes que por sua vez suportam os carregamentos das tesouras.

Utilizando o software Ftool, determinou-se as reações de apoio das combinações tratadas anteriormente, e com o auxílio do software Excel, foi possível organizar os carregamentos referentes às reações de apoio, conforme mostra o quadro 27:



Quadro 27: Combinações das reações de apoio - (N).

| Apoio | Reação     | Carregamento unitário (N) |      |         |         | Carregamento combinado (N) |             |             |                |               |
|-------|------------|---------------------------|------|---------|---------|----------------------------|-------------|-------------|----------------|---------------|
|       |            | PP                        | SC   | Vento 1 | Vento 2 | PP+SC                      | PP+ vento 1 | PP+ vento 2 | PP+SC+ vento 1 | PP+SC+vento 2 |
| A     | Horizontal |                           |      |         | 900     |                            | 0           | 900         | 0              | 900           |
|       | Vertical   | 3500                      | 7500 | -8800   | -10000  | 11000                      | -5300       | -6500       | 2200           | 1000          |
| B     | Horizontal |                           |      |         |         | 0                          | 0           | 0           | 0              | 0             |
|       | Vertical   | 3600                      | 7600 | -8800   | -8100   | 11200                      | -5200       | -4500       | 2400           | 3100          |

Fonte: O autor

Nota-se um destaque para a coluna de PP + SC na ultima linha da tabela acima, ou seja, o valor de 11.200 N é o maior valor encontrado para as combinações das reações de apoio que conseqüentemente serão transferidas no topo do pilar. O quadro a seguir mostra os valores somados para a consideração final dos carregamentos suportados pelos pilares:

Quadro 28: Valores dos pesos considerados na verificação da coluna (N).

|                               |             |
|-------------------------------|-------------|
| Peso próprio do pilar         | 876,17 N    |
| (1) Peso próprio + sobrecarga | 11.200 N    |
| N total Total                 | 12.076,17 N |
| Nd x 1,4                      | 16.906,64 N |

(1) Maior carregamento referente à reação de apoio

Fonte: O autor

Após o conhecimento das forças atuantes, é possível então determinar o carregamento admissível dos perfis da coluna, no entanto, antes, é necessário determinar os parâmetros do perfil duplo como, momento de inércia, área da seção, módulo de resistência etc. A seguir o quadro 29 irá informar os dados do perfil (unitário) utilizado:

Quadro 29: Dados do perfil coluna.

| Dimensões coluna |    |       | S               | P    | Ix              | Wx              | rx   | ey   | Iy              | Wy              | ry   |
|------------------|----|-------|-----------------|------|-----------------|-----------------|------|------|-----------------|-----------------|------|
| h                | B  | e = r | cm <sup>2</sup> | kg/m | cm <sup>4</sup> | cm <sup>3</sup> | cm   | cm   | cm <sup>4</sup> | cm <sup>3</sup> | cm   |
| mm               | mm | mm    |                 |      |                 |                 |      |      |                 |                 |      |
| 150              | 50 | 3.8   | 8.93            | 7.01 | 279.7           | 37.2            | 5.59 | 1.17 | 19.62           | 5.12            | 1.48 |
| 15               | 5  | 0.38  |                 |      |                 |                 |      |      |                 |                 |      |

Fonte: O autor

A coluna é composta por dois perfis trabalhando simultaneamente como um só, como mostrado a seguir

Figura 34: Perfil composto da coluna



Fonte: O autor

Deste modo temos os parâmetros calculados para os dois perfis trabalhando simultaneamente:

Quadro 30: Dados calculados para dois perfis "C".

| A (cm <sup>2</sup> ) | I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> ) | W <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> ) | r <sub>x</sub> (cm) | d (cm) | I <sub>y</sub> | W <sub>y</sub> | r <sub>y</sub> |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|--------|----------------|----------------|----------------|
| 17.86                | 559.4                             | 745.8666667                       | 5.59655149          | 9.62   | 2212.243       | 602.791        | 11.12950082    |

Fonte: O autor

Para as verificações quanto à estabilidade do pilar, são necessários as verificações para os carregamentos atuantes na coluna. Deste modo, o carregamento 1 (um) leva em consideração o esforço axial de compressão, utilizando o maior esforço devido a reação de apoio.

Quadro 31: Carregamento admissível para esforço axial de compressão (N).

| CARREGAMENTO 1                        |             |
|---------------------------------------|-------------|
| <b>P perfil (N)</b>                   | 876.1700625 |
| <b>P Reação de apoio (N)</b>          | 11200       |
| <b>Total (N)</b>                      | 12076.17006 |
| <b>ND <math>\gamma</math> 1,4 (N)</b> | 16906.63809 |
| $\lambda$                             | 73.79544363 |
| b/t                                   | 37.47368421 |
| b/t lim                               | 42.14356416 |
| Q                                     | 1           |
| <b>Nex (KN)</b>                       | 158.4447067 |
| $\lambda_0$                           | 0.094301369 |
| X                                     | 0.924095607 |
| <b>Nc, Rd (N)</b>                     | 147360.2459 |

Fonte: O autor

Diferentemente, o carregamento 2 (dois) considera o segundo maior esforço axial de compressão de 11.000 N, porém é considerado também juntamente o momento fletor devido ao carregamento do vento 2(dois) do apoio “A” além do esforço cortante máximo devido ao esforço proveniente também do vento 2(dois).

Quadro 32: Esforço axial de compressão (Nd), Momento fletor (Md) e Esforço cortante (Vd).

| CARREGAMENTO 2                          |          |
|---|----------|
| <b>P perfil (N)</b>                     | 876.1701 |
| <b>P Reação de apoio (N)</b>            | 11000    |
| <b>Normal (N)</b>                       | 11876.17 |
| <b>Nd <math>\gamma</math> 1,4 (N)</b>   | 16626.64 |
| <b>M (N.m)</b>                          | 5310     |
| <b>Md <math>\gamma</math> 1,4 (N.m)</b> | 7434     |
| <b>V (N)</b>                            | 900      |
| <b>Vd <math>\gamma</math> 1,4 (N)</b>   | 1260     |

Fonte: O autor

Do mesmo modo, é necessário a verificação dos estados limites a flexão, sendo flambagem lateral da mesa, flambagem lateral da alma e flambagem lateral com torção respectivamente:

Quadro 33: FLA - Flambagem lateral da alma

| FLA - Verificação eixo X               |            |
|--|------------|
| $\lambda$                              | 39.4736842 |
|  |            |
| $\lambda_p$                            | 106.34886  |
|  |            |
| $\lambda_r$                            |            |
|  |            |
| <b>Mpl (KN.cm)</b>                     | 2083.2     |
| <b><math>\gamma_{1,1}</math> (N.m)</b> | 18938.1818 |

Fonte: O autor

Quadro 34: FLM - Flambagem lateral da mesa

| FLM - Verificação eixo X               |          |
|--|----------|
| $\lambda$                              | 13.15789 |
|  |          |
| $\lambda_p$                            | 10.74802 |
|  |          |
| $\lambda_r$                            | 28.05912 |
| <b>Kc</b>                              | 0.636658 |
| <b><math>\theta</math> Tensão res.</b> | 75       |
| <b>Wc (cm<sup>3</sup>)</b>             | 111.88   |
|  |          |
| <b>Mcr (KN.cm)</b>                     | 8917.821 |
| <b>Mcr (KN.cm) x 2</b>                 | 17835.64 |
| <b><math>\gamma_{1,1}</math> (N.m)</b> | 162142.2 |

Fonte: O autor

Para a verificação do estado limite para FLT – Flambagem lateral com torção, foi utilizado o comprimento de flambagem de 5,9m, sendo que, como há as vigas de fechamento lateral, estas funcionam como travamento intermediário logo acima da alvenaria, porém como medida de verificação a favor da segurança, o travamento das vigas foi desprezado, utilizando assim todo comprimento da coluna.

Quadro 35: FLT - Flambagem lateral com torção.

| FLT - Verificação eixo X                 |             |
|--|-------------|
| $\lambda$                                | 105.4220623 |
|  |             |
| $\lambda_p$                              | 49.7803174  |
|  |             |
| $\lambda_r$                              | 129.5286894 |
| $\beta_1$                                | 0.224482759 |
| $\theta$ Tensão res. (N/m <sup>2</sup> ) | 75          |
| J (cm <sup>4</sup> )                     | 0.4568094   |
| C <sub>w</sub>                           | 753.2381793 |
| C <sub>b</sub>                           | 1           |
| M <sub>cr</sub> (KN.cm)                  | 418.5123141 |
| $\gamma_{1,1}$ (N.m)                     | 3804.657401 |

Fonte: O autor

Após a determinação dos esforços admissíveis, é então feita a verificação segundo a ABNT NBR 8800: 2008, onde o valor final da verificação deverá ser inferior a 1.

Quadro 36: Verificação dos esforços combinados.

| Verificação dos esforços combinados |            |   |   |    |
|-------------------------------------|------------|---|---|----|
| COMBINAÇÃO                          | 0.15867852 | < | 1 | OK |

Fonte: O autor

Por último, há a verificação ao esforço cortante, este proveniente do vento 2(dois), sendo que,  $V_y$  max – esforço cortante atuante deverá ser inferior a  $V_{Rd}$  – esforço cortante máximo admissível.

Quadro 37: Verificação ao esforço cortante

| Verificação força cortante            |             |
|---------------------------------------|-------------|
| $V_y$ max. (KN) y                     | 0.9         |
| $\lambda$                             | 37.47368421 |
| $\lambda_p$                           | 69.57010852 |
| K <sub>v</sub>                        | 5           |
| V <sub>pl</sub> (KN)                  | 171         |
| V <sub>Rd</sub> (KN)                  | 155.4545455 |
| Como V <sub>Rd</sub> > V <sub>y</sub> | OK          |

Fonte: O autor

Como  $V_y \text{ max} - \text{Esforço cortante máximo} < V_{Rd} - \text{Esforço cortante máximo admissível}$ , a coluna atende para esta verificação.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão listadas as verificações executadas nos tópicos anteriores, sendo dispostos em tabelas os valores e as informações adquiridas, no intuito de resumir e esclarecer os pontos pertinentes ao trabalho.

### 5.1 Telhas da cobertura e fechamento lateral

Mediante aos resultados encontrados, temos que, algumas verificações não atendem aos requisitos da norma ABNT NBR 8800: 2008, esta que por sua vez é o objeto central do trabalho. Apesar de nem todas as condições atenderem, nota-se que não há risco eminente de ruptura da estrutura, uma vez que as condições exigidas devem atender a fatores de segurança impostos e exigidos previamente pela norma.

A seguir será apresentado um quadro resumo de todos os carregamentos atuantes e as respectivas verificações tratadas nos capítulos anteriores:

Quadro 38: Resumo telhas

| <b>ITEM</b>                  | <b>CARREGAMENTO ATUANTE</b> | <b>CARREGAMENTO ADMISSÍVEL</b> | <b>FATOR DE SEGURANÇA</b> |
|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Telhas da cobertura          | -999,05 N/m <sup>2</sup>    | 3236,1 N/m <sup>2</sup>        | 3,24                      |
| Telhas do fechamento lateral | -663,0 N/m <sup>2</sup>     | 2334,7 N/m <sup>2</sup>        | 3,52                      |

Fonte: O autor

Como os carregamentos atuantes são inferiores aos admissíveis, as telhas empregadas estão a favor da segurança. Nota-se que os fatores de segurança de 3,24 e 3,52, possuem uma folga considerável em relação aos esforços atuantes.

É de suma importância informar ao leitor que a ABNT NBR 8800: 2008, não trata em seu texto sobre telhas da cobertura e telhas de fechamento, no entanto, para uma qualidade aprimorada do trabalhado e levando em conta também que as telhas fazem parte da estrutura, as telhas foram analisadas e estudadas como todas as outras demais repartições da estrutura.

## 5.2 Análise final das terças

As terças foram verificadas respectivamente a flexão, esforço cortante e determinação das flechas máximas. Com intuito de organizar os dados, as tabela a seguir descrevem os valores encontrados e em seguida faz-se uma análise sobre as condições encontradas.

Quadro 39: Momentos admissíveis das terças para estados limite ultimo

| <b>ITEM</b>            | <b>Mcr (N.m)</b> |
|------------------------|------------------|
| <b>FLM<sub>x</sub></b> | 16.380,15        |
| <b>FLA<sub>x</sub></b> | 3052,0           |
| <b>FLT<sub>x</sub></b> | 1459,7           |
| <b>FLM<sub>y</sub></b> | 1176,71          |

Fonte: O autor

Do mesmo modo a tabela x identifica os esforços atuantes considerados na verificação dos esforços.

Quadro 40: Momentos atuantes das terças

|                                    |               |
|------------------------------------|---------------|
| <b>COMBINAÇÃO 1 – PP + SC - X</b>  | 669,22 (N.m)  |
| <b>COMBINAÇÃO 1 – PP + SC - Y</b>  | 1004,74 (N.m) |
| <b>COMBINAÇÃO 2 – PP + VEN - X</b> | 39,2 (N.m)    |
| <b>COMBINAÇÃO 2 – PP + VEN - Y</b> | 3479,67 (N.m) |

Fonte: O autor

Concluindo, para a verificação à flexão dos esforços combinados temos:

Quadro 41: Verificação dos esforços combinados

| <b>COMBINAÇÃO 1</b> | <b>COMBINAÇÃO 2</b> |
|---------------------|---------------------|
| 1,046 > 1           | 3,27 > 1            |

Fonte: O autor

De acordo com a ABNT NBR 8800: 2008, as combinações 1 e 2 a flexão, isto é, os valores encontrados devem ser inferiores a 1, como todas as duas condições são superiores, nenhuma das verificações atendem a norma.



Já para o esforço cortante temos as seguintes condições:

Quadro 42: Resumo esforço cortante

|   |          |
|---|----------|
| <b>V<sub>y</sub> – Esforço cortante atuante</b>     | 4000 N   |
| <b>VR<sub>d</sub> – Esforço cortante admissível</b> | 31.090 N |
| <b>V<sub>y</sub> &lt; VR<sub>d</sub></b>            | OK       |
| <b>FATOR DE SEGURANÇA</b>                           | 7,77     |

Fonte: O autor

Observa-se que o coeficiente de segurança encontrado para a verificação ao esforço cortante é um valor considerável, no entanto isso também é um indicativo que para este tipo de carregamento a peça utilizada não está sendo utilizada a sua eficiência máxima.

Por ultimo, é feito a verificação a flecha máxima, para este caso temos:

Quadro 43: Resumo verificação das flechas

| <b>ITEM</b>         | <b>ESFORÇO ATUANTE (cm)</b> |   | <b>ESFORÇO ADMISSÍVEL (cm)</b> | <b>FATOR DE SEGURANÇA</b> |
|---------------------|-----------------------------|---|--------------------------------|---------------------------|
| Descendente PP + SC | 1,082                       | < | 1,91                           | 1,76                      |
| Ascendente PP + VEN | -3,74                       | > | 2,87                           | (1) 0,76                  |

(1) Não há fator de segurança

Fonte: O autor

Nota-se que, para a flecha ascendente a condição não atende a ABNT NBR 8800: 2008, no entanto este excesso de deformação só irá ocorrer em tempestades com uma pequena probabilidade de ocorrência, porém não causa riscos de queda ou ruptura da estrutura.

### 5.3 Treliça

Para a verificação das barras componentes da treliça, foram verificadas apenas para esforço normal de tração e compressão. Como o maior esforço atuante foi o de compressão, este foi o valor utilizado para a verificação geral, chegando aos valores dispostos no quadro 44:

Quadro 44: Carregamento atuante e carregamento admissível

|  |             |
|--|-------------|
| <b>ESFORÇO ATUANTE DE COMPRESSÃO –<br/>N</b>         | 46.000 N    |
| <b>ESFORÇO ADMISSÍVEL DE<br/>COMPRESSÃO – Nc, Rd</b> | 130.167,4 N |
| <b>ESFORÇO ATUANTE DE COMPRESSÃO x<br/>1,4 - Nd</b>  | 64.400 N    |
| <b>ESFORÇO ADMISSÍVEL MINORADO / 1,1</b>             | 118.334 N   |

Fonte: O autor

Utilizando os dois últimos resultados, sendo o carregamento atuante multiplicado pelo valor de de 1,4 e o valor do carregamento admissível dividido por 1,1 temos então:

Quadro 45: Verificação ao esforço normal de compressão

| <b>CONDIÇÃO PARA VERIFICAÇÃO</b> | <b>FATOR DE SEGURANÇA</b> |
|----------------------------------|---------------------------|
| 64.400 < 118.334                 | 1,83                      |

Fonte: O autor

Como o valor atuante é menor que o valor admissível, nota-se que para esta verificação a treliça passa na verificação ao esforço normal.

Importante enfatizar que, algumas das bibliografias consultadas e citadas no trabalho executam a verificação ao esforço normal em todas as barras, isto é, para banzo superior, banzo inferior, montantes e diagonais, porém como a treliça estudada possui um único perfil, esta condição pode se aplicar somente a pior condição, que neste caso como já demonstrado é utilizado um comprimento de 66cm para a barra AB, sendo esta a barra como os maiores esforços axiais.

## 5.4 Coluna

As colunas assim como as terças foram verificadas a flexão e esforço cortante. Para flexão os valores atuantes são mostrados no quadro 46:

Quadro 46: Momentos admissíveis das colunas para estados limite ultimo

| <b>ITEM</b>            | <b>Mcr (N.m)</b> |
|------------------------|------------------|
| <b>FLM<sub>x</sub></b> | 162.142,2        |
| <b>FLA<sub>x</sub></b> | 18.938,18        |
| <b>FLT<sub>x</sub></b> | 3804,65          |

Fonte: O autor

Em seguida são dispostos os valores dos carregamentos atuantes entre esforços normais e a flexão, onde é dado para o carregamento 1 (um) esforço axial atuante e esforço admissível, já para o carregamento 2 (dois), é encontrado um segundo valor para esforço axial, no entanto, no carregamento 2 (dois) é determinado o momento fletor e esforço cortante, como mostram os quadros 47 e 48 respectivamente:

Quadro 47: Carregamento 1, esforço axial de compressão

| <b>ITEM</b>    | <b>Esforço atuante - Nd</b> | <b>Esforço admissível - Nc, Rd</b> | <b>Fator de segurança</b> |
|----------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Carregamento 1 | 16.906,64 N                 | 147.360,24 N                       | 8,71                      |

Fonte: O autor

Quadro 48: Carregamento 2, esforço axial, momento fletor e esforço cortante.

| <b>Esforço normal - N</b> | <b>Momento fletor - Md</b> | <b>Esforço cortante - Vd</b> |
|---------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 16.626, 64 N              | 7.434 N.m                  | 1260 N                       |

Fonte: O autor

Após o conhecimento dos esforços atuantes é possível fazer a verificação dos esforços combinados para a coluna, neste caso temos o seguinte resultado dado pelo quadro 49:

Quadro 49: Verificação dos esforços combinados

|                     |       |   |   |
|---------------------|-------|---|---|
| <b>Combinação 1</b> | 0,158 | < | 1 |
|---------------------|-------|---|---|

Fonte: O autor

Como o valor da combinação 1 foi  $< 1$ , a verificação atende a ABNT NBR 8800: 2008.

Por fim, é necessário isoladamente verificar se o perfil da coluna suporta aos esforços cortantes, para isto é dado o quadro 50:

Quadro 50: Verificação ao esforço cortante

| <b>Esforço cortante atuante -<br/>V<sub>y</sub></b> | <b>Esforço cortante admissível<br/>- VR<sub>d</sub></b> | <b>Fator de segurança</b> |
|---|---|---------------------------|
| 900 N   | 155.454,54 N  | 172,72                    |

Fonte: O autor

Notadamente para esforço cortante, que neste caso proveniente da ação do vento, muito inferior ao esforço que a peça de fato poderá suportar.

Em todo caso para o elemento das colunas, estas passam e atendem as premissas da ABNT NBR 8800: 2008.

## 5.5 Sugestões

Tendo em vista que, o objeto central do trabalho é verificar através dos cálculos se a estrutura atende fundamentalmente a ABNT NBR 8800: 2008, podemos considerar que algumas das verificações não atendem as condições exigidas. Neste caso algumas modificações quanto a estrutura poderiam terem sido executadas e, ao final a estrutura bem como todos os elementos serem capazes seguramente de resistirem aos esforços.

O ponto fundamental para que todos os elementos atendam a ABNT NBR 8800: 2008, é reduzir matematicamente os esforços solicitantes, uma vez que, a estrutura encontra-se inteiramente executada.

É importante salientar que, as próximas verificações feitas não expressam em hipótese alguma a troca ou substituição de algum elemento estrutural, mas sim a adição de algum

elemento que posso auxiliar na resistência da estrutura e finalmente atender as condições propostas por norma.

Buscando uma solução viável diante das condições expressas, foi simulado que, entre os vãos entre treliças sejam dispostos tirantes para a redução do comprimento, agindo assim como uma espécie de travamento ou até mesmo apoio. Deste modo as terças e as vigas de fechamento lateral, estas que, conforme os cálculos mostrados anteriormente não atenderam as condições, foram considerados estes elementos de travamento imediatamente no centro do perfil em sua face longitudinal, reduzindo conseqüentemente os esforços atuantes.

Utilizando então um comprimento atualizado de 1,725m ou seja, metade do vão real, as verificações sofrem uma mudança significativa, como mostra o quadro 51:

Quadro 51: Verificação dos esforços combinados terça cobertura

| Verificação dos esforços |             |   |   |    |
|--------------------------|-------------|---|---|----|
| Combinação 1 PP + SC     | 0.261685377 | < | 1 | OK |
| Combinação 2 PP + VENT 1 | -0.81785051 | < | 1 | OK |

Fonte: O autor

Do mesmo modo, as flechas também passaram a atender as condições normativas, e reduziram seus deslocamentos o suficiente para serem inferiores aos admissíveis:

Quadro 52: Verificação das flechas máximas

| FLECHA MAXIMA                   |             |   |   |          |
|---------------------------------|-------------|---|---|----------|
| Sentido descendente PP + SC     |             |   |   |          |
| ξ                               | 0.067655471 | < | ξ | 0.958333 |
| Sentido ascendente PP + VENTO 1 |             |   |   |          |
| ξ                               | -0.23430698 | < | ξ | 1.4375   |

Fonte: O autor

Assim como as terças da cobertura, as vigas de fechamento lateral também não atenderam a combinação dos carregamentos, sendo o resultado final superior a 1 (um), diante disto, foi simulado travamentos em seu perfil longitudinal, reduzindo o comprimento da perfil, sendo assim, os valores foram atualizados conforme mostra o quadro 53:

Quadro 53: Verificação dos esforços combinados vigas laterais

| Verificação do esforço combinado |   |   |    |
|----------------------------------|---|---|----|
| -0.353092528                     | < | 1 | OK |

Fonte: O autor

## 6 CONCLUSÃO

Ao longo do trabalho foi calculado e verificado as condições a que se passam os elementos estruturais do galpão metálico proposto. Notou-se uma grande variedade de equações e informações em torno das verificações, na busca contínua da maior proximidade com a realidade do imóvel.

Como já informado, o galpão opera atualmente sem maiores problemas, e muito provavelmente no que se diz respeito à estrutura, não haverá. A norma ABNT NBR 8800: 2008, norma que regulamenta as estruturas construídas em aço no Brasil, impõe medidas de segurança com coeficientes que elevam a qualidade e a confiabilidade das estruturas de aço, no entanto, quando não atendida, não significa que a construção não irá suportar ou que irá entrar em colapso definitivo, significa que o padrão estabelecido pela mesma poderá em algum momento ser superado por deformações excessivas ou ainda carregamentos excessivos.

Quanto aos elementos verificados que não atenderam as condições é necessário assim como citado anteriormente que, sejam tomadas as medidas cabíveis para a adequação a ABNT NBR 8800: 2008.

Quanto ao aspecto geral do trabalho, há de se considerar que este foi bem sucedido, uma vez que as informações foram levantadas e, o mais importante, os valores encontrados mostraram-se coerentes quando comparados com as bibliografias citadas e comparadas durante o trabalho.

Para finalizar, será resumido na tabela a seguir todas as verificações demonstradas durante todo o trabalho no intuito de facilitar o entendimento do leitor:

Quadro 54: Resumo telhas

| <b>ITEM</b>                  | <b>CARREGAMENTO ATUANTE</b> | <b>CARREGAMENTO ADMISSÍVEL</b> | <b>FATOR DE SEGURANÇA</b> |
|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Telhas da cobertura          | -999,05 N/m <sup>2</sup>    | 3236,1 N/m <sup>2</sup>        | 3,24                      |
| Telhas do fechamento lateral | -663,0 N/m <sup>2</sup>     | 2334,7 N/m <sup>2</sup>        | 3,52                      |

Fonte: O autor

Quadro 55: Resumo terças 1

|   |                     |
|---|---------------------|
| <b>ITEM</b>   | <b>Mcr (N.m)</b>    |
| <b>FLM<sub>x</sub></b>                              | 16.380,15           |
| <b>FLA<sub>x</sub></b>                              | 3052,0              |
| <b>FLT<sub>x</sub></b>                              | 1459,7              |
| <b>FLM<sub>y</sub></b>                              | 1176,71             |
| <b>COMBINAÇÃO 1 – PP + SC - X</b>                   | 669,22 (N.m)        |
| <b>COMBINAÇÃO 1 – PP + SC - Y</b>                   | 1004,74 (N.m)       |
| <b>COMBINAÇÃO 2 – PP + VEN - X</b>                  | 39,2 (N.m)          |
| <b>COMBINAÇÃO 2 – PP + VEN - Y</b>                  | 3479,67 (N.m)       |
| <b>COMBINAÇÃO 1</b>                                 | <b>COMBINAÇÃO 2</b> |
| 1,046 > 1   | 3,27 > 1            |
| <b>V<sub>y</sub> – Esforço cortante atuante</b>     | 4000 N              |
| <b>VR<sub>d</sub> – Esforço cortante admissível</b> | 31.090 N            |
| <b>V<sub>y</sub> &lt; VR<sub>d</sub></b>            | OK                  |
| <b>FATOR DE SEGURANÇA</b>                           | 7,77                |

Fonte: O autor

Quadro 56: Resumo terças 2

| <b>ITEM</b>            | <b>ESFORÇO ATUANTE (cm)</b> |   | <b>ESFORÇO ADMISSÍVEL (cm)</b> | <b>FATOR DE SEGURANÇA</b> |
|------------------------|-----------------------------|---|--------------------------------|---------------------------|
| Descendente PP + SC    | 1,082                       | < | 1,91                           | 1,76                      |
| Ascendente PP +<br>VEN | -3,74                       | > | 2,87                           | (1) 0,76                  |

Fonte: O autor

Quadro 57: Resumo treliça

|  |             |
|--|-------------|
| <b>ESFORÇO ATUANTE DE COMPRESSÃO – N</b>                               | 46.000 N    |
| <b>ESFORÇO ADMISSÍVEL DE COMPRESSÃO – N<sub>c</sub>, R<sub>d</sub></b> | 130.167,4 N |
| <b>ESFORÇO ATUANTE DE COMPRESSÃO x 1,4 - N<sub>d</sub></b>             | 64.400 N    |



|  |                           |
|--|---------------------------|
| <b>ESFORÇO ADMISSÍVEL MINORADO / 1,1</b> | 118.334 N                 |
| <b>CONDIÇÃO PARA VERIFICAÇÃO</b>         | <b>FATOR DE SEGURANÇA</b> |
| 64.400 < 118.334                         | 1,83                      |
| <b>CONDIÇÃO PARA VERIFICAÇÃO</b>         | <b>FATOR DE SEGURANÇA</b> |
| 64.400 < 118.334                         | 1,83                      |

Fonte: O autor

Quadro 58: Resumo Coluna

|  |  |  |                               |
|--|--|--|-------------------------------|
| <b>ITEM</b>                              |  | <b>Mcr (N.m)</b>                       |                               |
| <b>FLM<sub>x</sub></b>                   |  | 162.142,2                              |                               |
| <b>FLA<sub>x</sub></b>                   |  | 18.938,18                              |                               |
| <b>FLT<sub>x</sub></b>                   |  | 3804,65                                |                               |
| <b>ITEM</b>                              | <b>Esforço atuante - Nd</b>                  | <b>Esforço admissível -<br/>Nc, Rd</b> | <b>Fator de<br/>segurança</b> |
| Carregamento 1                           | 16.906,64 N                                  | 147.360,24 N                           | 8,71                          |
| <b>Esforço normal - N</b>                | <b>Momento fletor - Md</b>                   | <b>Esforço cortante - Vd</b>           |                               |
| 16.626, 64 N                             | 7.434 N.m                                    | 1260 N                                 |                               |
| <b>Combinação 1</b>                      | 0,158  | <                                      | 1                             |
| <b>Esforço cortante atuante -<br/>Vy</b> | <b>Esforço cortante admissível<br/>- VRd</b> | <b>Fator de segurança</b>              |                               |
| 900 N                                    | 155.454,54 N                                 | 172,72                                 |                               |

Fonte: O autor

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123: 1988** – Forças devidas ao vento em edificações.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800: 2008** - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

CHAMBERLAIN, P.; FICANHA, R.; FABEANE, R. **Projeto e cálculo de estruturas de aço**. Edifício Industrial Detalhado. 8. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Aço**. Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800: 2008. 8. Ed. Rio de Janeiro: LCT, 2009.

FAKURY, R.; CASTRO E SILVA, A.; CALDAS, R. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. 1. Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

PINHEIRO, A. **Estruturas metálicas**. Cálculos, detalhes, exercícios e projetos. 2. Ed. São Paulo: Blucher, 2005.

PORTAL G1 – Disponível em: <http://g1.globo.com/goias/transito/noticia/2014/04/trecho-da-br-153-e-interditado-para-instalacao-de-passarela-em-goiania.html>>. Acesso em: 20 julho de 2018.

## ANEXO I

## FORÇAS ATUANTES – PLANILHA EXCEL

| DADOS                              |              | DADOS                          |              | COEFICIENTES PARA CÁLCULO DAS TELHAS       |                               |           |      |
|------------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------|--|-------------------------------|-----------|------|
| Ângulo de inclinação               | 15           | Vão das terças (m)             | 3.45         | LATERAL                                    | FRONTAL                       | COBERTURA |      |
| Peso distribuído das terças        | 38.5         | Afastamento entre              | 1.706666667  | Cpe  | -1.1                          | 0.7       | -1.8 |
| Peso próprio das terças (N/m²)     | 22.55859375  | Área de influencia (m²)        | 5.888        | Cpi  | -0.2                          | 0.3       | -0.2 |
| Peso próprio das telhas (N/m²)     | 20.05        | L telhado (m)                  | 5.12         | TOTAL                                      | -1.3                          | 1         | -2   |
|                                    |              |                                |              | Carregamento nas telhas da cobertura       |                               |           |      |
|                                    |              |                                |              | PP (N/m²)                                  |                               | 20.05     |      |
| Vk (N/m²)                          | 510          |                                |              | SC (N/m²)                                  |                               | 250       |      |
| Sobrecarga (N/m²)                  | 250          |                                |              | TOTAL (N/m²)                               |                               | 270.05    |      |
|                                    |              |                                |              | VENTO SUCCÃO (N/m²)                        |                               | -1020     |      |
| CARREGAMENTOS TERÇA                |              | DECOMPOSIÇÃO DAS FORÇAS        |              | Combinação de carregamentos                |                               |           |      |
| PP telhas + PP terças (N/m)        | 72.71866667  | PP+SC                          | qx (N/m)     | 129.2504351                                | PP + SC (N/m²)                | 270.05    |      |
| Sobrecarga (N/m)                   | 426.6666667  |                                | qy (N/m)     | 482.3691907                                | PP + VEN 1 (N/m²)             | -999.95   |      |
| Vento (N/m)                        | -1740.8      |                                | qx (N/m)     | 18.82097587                                | carregamento suportado (N/m²) | 2390      |      |
|                                    |              | PP+VENTO                       | qy (N/m)     | -1670.559162                               | carregamento suportado (N/m²) | 2966      |      |
|                                    |              |                                |              |  |                               |           |      |
| COMBINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS x 1,4 |              | ESFORÇOS INTERNOS SOLICITANTES |              | Carregamento das telhas fechamento lateral |                               |           |      |
|                                    |              |                                |              | Vão (m)                                    |                               | 1.45      |      |
| 1 - (PP+SC) - x - (N/m)            | 180.9506092  | M1 - x (N.m)                   | 269.2205782  | VENTO PRESSÃO (N/m²)                       |                               | -663      |      |
| 1 - (PP+SC) - y - (N/m)            | 675.316867   | M1 - y (N.m)                   | 1004.744876  | carregamento suportado (N/m²)              |                               | 1910      |      |
| 2 - (PP+VEN) - x - (N/m)           | 26.34936621  | M2 - x (N.m)                   | 39.20291642  | carregamento suportado (N/m²)              |                               | 2390      |      |
| 2 - (PP+VEN) - y - (N/m)           | -2338.782827 | M2 - y (N.m)                   | -3479.670324 |  |                               |           |      |

## ANEXO II

## VERIFICAÇÃO DAS TERÇAS – PLANILHA EXCEL

| Dimensões da terça                |    |             |       | S                                 | P                                   | I <sub>x</sub>       | W <sub>x</sub>  | r <sub>x</sub> | e <sub>y</sub> | I <sub>y</sub>  | W <sub>y</sub>         | r <sub>y</sub> |  |
|-----------------------------------|----|-------------|-------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|------------------------|----------------|--|
| h                                 | B  | d           | e = r | cm <sup>2</sup>                   | kg/m                                | cm <sup>4</sup>      | cm <sup>3</sup> | cm             | cm             | cm <sup>4</sup> | cm <sup>3</sup>        | cm             |  |
| mm                                | mm | mm          | mm    |                                   |                                     |                      |                 |                |                |                 |                        |                |  |
| 75                                | 40 | 15          | 3.04  | 4.9                               | 3.85                                | 41.1                 | 10.9            | 2.9            | 1.48           | 10.38           | 4.13                   | 1.46           |  |
| L/d - L/60 < d < L/40             |    |             |       | E (Mpa)                           | ρ <sub>a</sub> (Kg/m <sup>3</sup> ) | F <sub>y</sub> (Mpa) |                 |                |                |                 | Vão das terças - X (m) | 3.45           |  |
| L (mm)                            |    | 3450        |       | 200000                            | 7850                                | 250                  |                 |                |                |                 | Vão das terças - Y (m) |                |  |
| d (m)                             |    | 57.5        |       |                                   |                                     |                      |                 |                |                |                 |                        |                |  |
| d (m)                             |    | 86.25       |       |                                   |                                     |                      |                 |                |                |                 |                        |                |  |
| d (m)                             |    | 75          |       |                                   |                                     |                      |                 |                |                |                 |                        |                |  |
| FLM - Verificação eixo X          |    |             |       | FLM - Verificação eixo Y          |                                     |                      |                 |                |                |                 |                        |                |  |
| λ                                 |    | 13.15789474 |       | λ                                 |                                     | 24.67105263          |                 |                |                |                 |                        |                |  |
| λ <sub>p</sub>                    |    | 10.74802307 |       | λ <sub>p</sub>                    |                                     | 10.74802307          |                 |                |                |                 |                        |                |  |
| λ <sub>r</sub>                    |    | 28.05912126 |       | λ <sub>r</sub>                    |                                     | 28.05912126          |                 |                |                |                 |                        |                |  |
| K <sub>c</sub>                    |    | 0.805315673 |       | M <sub>cr</sub> (KN/cm)           |                                     | 117.6714445          |                 |                |                |                 |                        |                |  |
| θ Tensão res.                     |    | 75          |       | W <sub>c</sub> (cm <sup>3</sup> ) |                                     | 5.19                 |                 |                |                |                 |                        |                |  |
| W <sub>c</sub> (cm <sup>3</sup> ) |    | 20.55       |       | M <sub>cr</sub> (N.m)             |                                     | 1176.714445          |                 |                |                |                 |                        |                |  |
| M <sub>cr</sub> (KN/cm)           |    | 1638.01584  |       |                                   |                                     |                      |                 |                |                |                 |                        |                |  |
| M <sub>cr</sub> (N.m)             |    | 16380.1584  |       |                                   |                                     |                      |                 |                |                |                 |                        |                |  |

## VERIFICAÇÃO DAS TERÇAS – PLANILHA EXCEL

|  |             |                                   |             |   |                  |
|--|-------------|-----------------------------------|-------------|---|------------------|
| <b>FLA - Verificação eixo X</b>          |             |                                   |             |   |                  |
| $\lambda$                                | 22.67105263 |                                   |             |   |                  |
|  |             |                                   |             |   |                  |
| $\lambda_p$                              | 106.3488599 |                                   |             |   |                  |
|  |             |                                   |             |   |                  |
| $\lambda_r$                              |             | <b>Verificação dos esforços</b>   |             |   |                  |
|  |             | Combinação 1 PP + SC              | 1.046741509 | > | 1 N OK           |
| Mpl (KN.cm)                              | 305.2       | Combinação 2 PP + VENT 1          | -3.27140204 | > | 1 N OK           |
| Mpl (N.m)                                | 3052        |                                   |             |   |                  |
|  |             |                                   |             |   |                  |
| <b>FLT - Verificação eixo X</b>          |             | <b>Verificação força cortante</b> |             |   |                  |
| $\lambda$                                | 236.3013699 | Vy max. (KN) y                    | 4           |   |                  |
|  |             | $\lambda$                         | 22.67105263 |   |                  |
| $\lambda_p$                              | 49.7803174  | $\lambda_p$                       | 69.57010852 |   |                  |
|  |             | Kv                                | 5           |   |                  |
| $\lambda_r$                              | 215.3239972 | Vpl (KN)                          | 34.2        |   |                  |
| $\beta_1$                                | 0.065775862 | VRd (KN)                          | 31.09090909 |   |                  |
| $\theta$ Tensão res. (N/m <sup>2</sup> ) | 75          | Como VRd > Vy                     | OK          |   |                  |
| J (cm <sup>4</sup> )                     | 0.145009576 |                                   |             |   |                  |
| Cw                                       | 74.74460257 | <b>FLECHA MAXIMA</b>              |             |   |                  |
| Cb                                       | 1           | Sentido descendente PP + SC       |             |   |                  |
| Mcr (KN.cm)                              | 145.9702698 | $\zeta$                           | 1.082487535 | < | $\zeta$ 1.916667 |
| Mcr (N.m)                                | 1459.702698 | Sentido ascendente PP + VENTO 1   |             |   |                  |
|  |             | $\zeta$                           | -3.74891163 | > | $\zeta$ 2.875    |

## ANEXO III

## VERIFICAÇÃO DAS VIGAS LATERAIS

| Dimensões da terça             |             |    |       | S                                | P    | I <sub>x</sub>  | W <sub>x</sub>  | r <sub>x</sub> | e <sub>y</sub> | I <sub>y</sub>  | W <sub>y</sub>  | r <sub>y</sub> |
|--------------------------------|-------------|----|-------|----------------------------------|------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| h                              | B           | d  | e = r | cm <sup>2</sup>                  | kg/m | cm <sup>4</sup> | cm <sup>3</sup> | cm             | cm             | cm <sup>4</sup> | cm <sup>3</sup> | cm             |
| mm                             | mm          | mm | mm    |                                  |      |                 |                 |                |                |                 |                 |                |
| 75                             | 40          | 15 | 3.04  | 4.9                              | 3.85 | 41.1            | 10.9            | 2.9            | 1.48           | 10.38           | 4.13            | 1.46           |
| PP VIGAS (N/m)                 |             |    |       | Ly (m)                           | 1.45 |                 |                 |                |                |                 |                 |                |
| PP TELHAS (N/m)                |             |    |       | Lx (m)                           | 3.45 |                 |                 |                |                |                 |                 |                |
| Y - PP total (N/m)             |             |    |       |                                  |      |                 |                 |                |                |                 |                 |                |
| X - Vento (N/m)                |             |    |       |                                  |      |                 |                 |                |                |                 |                 |                |
| Esforços Internos Solicitantes |             |    |       | Verificação do esforço combinado |      |                 |                 |                |                |                 |                 |                |
| Mx (N.m)                       | -2871.47813 |    |       | -1.440070102                     | >    | 1               | N OK            |                |                |                 |                 |                |
| My (N.m)                       | 17.75889766 |    |       |                                  |      |                 |                 |                |                |                 |                 |                |
| Vx (N)                         | -3329.25    |    |       | Verificação do cisalhamento      |      |                 |                 |                |                |                 |                 |                |
| Vy (N)                         | 48.9900625  |    |       | 31.09090909                      | >    | 3.32961043      |                 |                |                |                 |                 |                |
| V (N)                          | 3329.610426 |    |       |                                  |      |                 |                 |                |                |                 |                 |                |

## ANEXO IV

## VERIFICAÇÃO DAS TESOURAS – PLANILHA EXCEL

| Dimensões coluna |            |       | S               | P                       | Ix              | Wx              | rx   | ey   | ly              | Wy              | ry   |
|------------------|------------|-------|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------------|------|------|-----------------|-----------------|------|
| h                | B          | e = r | cm <sup>2</sup> | kg/m                    | cm <sup>4</sup> | cm <sup>3</sup> | cm   | cm   | cm <sup>4</sup> | cm <sup>3</sup> | cm   |
| mm               | mm         | mm    |                 |                         |                 |                 |      |      |                 |                 |      |
| 127              | 50         | 3.42  | 7.3             | 5.73                    | 171.5           | 27              | 4.84 | 1.26 | 17.02           | 4.55            | 1.52 |
| 12.7             | 5          | 0.342 |                 |                         |                 |                 |      |      |                 |                 |      |
| Banzo superior   |            |       |                 |                         |                 |                 |      |      |                 |                 |      |
| Compressão (N)   | Tração (N) | L (m) | E (Mpa)         | ρa (Kg/m <sup>3</sup> ) | Fy (Mpa)        |                 |      |      |                 |                 |      |
| -46000           | 44900      | 0.66  | 200000          | 7850                    | 250             |                 |      |      |                 |                 |      |
| λ                | 43.421053  | <     | 200             |                         |                 |                 |      |      |                 |                 |      |
| b/t              | 35.134503  | <     | b/t lim         | 42.1436                 |                 |                 |      |      |                 |                 |      |
| Q                | 1          |       |                 |                         |                 |                 |      |      |                 |                 |      |
| Nex (KN)         | 7763.6428  |       |                 |                         |                 |                 |      |      |                 |                 |      |
| λ0               | 0.0017401  |       |                 |                         |                 |                 |      |      |                 |                 |      |
| X                | 0.9985444  |       |                 |                         |                 |                 |      |      |                 |                 |      |
| Nc, Rd (N)       | 130167.4   |       |                 |                         |                 |                 |      |      |                 |                 |      |
| Nc, Rd (N) / 1,1 | 118334     | >     | -64400          | OK                      |                 |                 |      |      |                 |                 |      |

## ANEXO V

## VERIFICAÇÃO DAS COLUNAS – PLANILHA EXCEL

| CARREGAMENTO 1        |             | CARREGAMENTO 2        |          |                          |            |                          |          |
|-----------------------|-------------|-----------------------|----------|--------------------------|------------|--------------------------|----------|
| P perfil (N)          | 876.1700625 | P perfil (N)          | 876.1701 | FLA - Verificação eixo X |            | FLM - Verificação eixo X |          |
| P Reação de apoio (N) | 11200       | P Reação de apoio (N) | 11000    | λ                        | 39.4736842 | λ                        | 13.15789 |
| Total (N)             | 12076.17006 | Normal (N)            | 11876.17 | λp                       | 106.34886  | λp                       | 10.74802 |
| ND γ 1,4 (N)          | 16906.63809 | Nd γ 1,4 (N)          | 16626.64 | λr                       |            | λr                       | 28.05912 |
| λ                     | 73.79544363 | M (N.m)               | 5310     | Kc                       |            | Kc                       | 0.636658 |
| b/t                   | 37.47368421 | Md γ 1,4 (N.m)        | 7434     | Mpl (KN.cm)              | 2083.2     | θ Tensão res.            | 75       |
| b/t lim               | 42.14356416 | V (N)                 | 900      | γ 1,1 (N.m)              | 18938.1818 | Wc (cm <sup>3</sup> )    | 111.88   |
| Q                     | 1           | Vd γ 1,4 (N)          | 1260     |                          |            | Mcr (KN.cm)              | 8917.821 |
| Nex (KN)              | 158.4447067 |                       |          |                          |            | Mcr (KN.cm) x 2          | 17835.64 |
| λ0                    | 0.094301369 |                       |          |                          |            | γ 1,1 (N.m)              | 162142.2 |
| X                     | 0.924095607 |                       |          |                          |            |                          |          |
| Nc, Rd (N)            | 147360.2459 |                       |          |                          |            |                          |          |

VERIFICAÇÃO DAS COLUNAS – PLANILHA EXCEL

| FLT - Verificação eixo X              |             |
|---------------------------------------|-------------|
| $\lambda$                             | 105.4220623 |
| $\lambda_p$                           | 49.7803174  |
| $\lambda_r$                           | 129.5286894 |
| $\beta_1$                             | 0.224482759 |
| $\theta$ Tensão res.                  | 75          |
| J (cm <sup>4</sup> )                  | 0.4568094   |
| C <sub>w</sub>                        | 753.2381793 |
| C <sub>b</sub>                        | 1           |
| M <sub>cr</sub> (KN.cm)               | 418.5123141 |
| $\gamma_{1,1}$ (N.m)                  | 3804.657401 |
| Verificação força cortante            |             |
| V <sub>y</sub> max. (KN) $\gamma$     | 0.9         |
| $\lambda$                             | 37.47368421 |
| $\lambda_p$                           | 69.57010852 |
| K <sub>v</sub>                        | 5           |
| V <sub>pl</sub> (KN)                  | 171         |
| VR <sub>d</sub> (KN)                  | 155.4545455 |
| Como VR <sub>d</sub> > V <sub>y</sub> | OK          |