



Walter Gabriel Bareiro

**Estudo e Modelagem de Estruturas Treliçadas
utilizadas em Galpões Industriais Considerando
Imperfeições Iniciais e Efeitos de Segunda Ordem**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil do Departamento de
Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadora: Elisa Dominguez Sotelino

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2015



Walter Gabriel Bareiro

**Estudo e Modelagem de Estruturas Treliçadas
utilizadas em Galpões Industriais Considerando
Imperfeições Iniciais e Efeitos de Segunda Ordem**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Civil do Centro
Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela
Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof^a. Elisa Dominguez Sotelino

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Alexandre Landesmann

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do
Centro Técnico da PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de Fevereiro de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Walter Gabriel Bareiro

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Nacional de Misiones UNaM – Argentina em 2011. Principais áreas de interesse: Modelagem de estruturas, projetos, metodologias BIM (Building Information Modeling) e processos construtivos.

Ficha Catalográfica

Bareiro, Walter Gabriel

Estudo e modelagem de estruturas treliçadas utilizadas em galpões industriais considerando imperfeições iniciais e efeitos de segunda ordem / Walter Gabriel Bareiro; Orientador: Elisa Dominguez Sotelino – Rio de Janeiro: PUC – Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

178 f. il; 29,7 cm.

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Normas ABNT. 3. Projeto e Cálculo de Galpões Industriais. 4. Imperfeições iniciais e Efeitos de segunda ordem I. Dominguez Sotelino, Elisa. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

*Para meus pais Julia e Jorge,
meu irmão Robert e família e irmã Carolina.*

Agradecimentos

Primeiramente agradecer a Deus pelas bênçãos recebidas e graças alcançadas, por me acompanhar sempre nos caminhos e desafios da vida.

A PUC-Rio pela oportunidade de continuar estudando, por todo o suporte acadêmico e pelas ótimas instalações prestadas.

À CAPES pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de estudos que possibilitaram a realização desta experiência do mestrado.

A Prof. Elisa por todo o conhecimento transmitido, pela disponibilidade e sugestões que foram de grande ajuda ao longo desta dissertação. A todos os professores do curso de Engenharia Civil da PUC-Rio pela contribuição na minha formação.

A Rita, pela competência e predisposição a atender e ajudar com todos os procedimentos da PUC-Rio.

A minha família pelo incentivo em todo momento para seguir adiante com meus estudos, a meus pais Julia e Jorge, meus irmãos Robert e Carolina, minha cunhada Liliana e a meus sobrinhos Julieta e Isaac amores do tio. A todos meus familiares que sempre ficaram na torcida pelo meu sucesso.

Aos amigos de sempre, que mesmo longe sempre presentes e dando forças. Aos amigos que fiz no Rio, Sebastian, Magno, Helena, Regina, Ricardo, Lorena, Luis, Josélio, Vanesa, Eliot e a todos que de alguma forma fizeram parte disto.

Ao Brasil pela oportunidade, e ao Rio de Janeiro, Cidade Maravilhosa, cheia de encantos mil, cidade pela qual sou apaixonado, que como o Cristo Redentor me recebeu de braços abertos e me proporcionou experiências belíssimas e momentos únicos e inesquecíveis. Minha gratidão de sempre a minha cidade de coração a mais linda do mundo, sou carioca de coração. Obrigado!.

Resumo

Bareiro; Walter Gabriel; Dominguez Sotelino, Elisa (orientador). **Estudo e Modelagem de Estruturas Treliçadas Utilizadas em Galpões Industriais Considerando Imperfeições Iniciais e Efeitos de Segunda Ordem**. Rio de Janeiro, 2015. 178p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os galpões industriais constituem um dos segmentos da construção em aço mais comuns no mercado brasileiro. As características na construção são rapidez de execução, menor volume de material e a esbeltez dos elementos. Nesta dissertação avalia-se o desempenho e a necessidade da consideração das imperfeições iniciais e dos efeitos de segunda ordem nas estruturas treliçadas usuais nos galpões. Através da modelagem de um conjunto de pórticos treliçados realiza-se um estudo paramétrico das diferentes tipologias e busca-se oferecer uma solução prática de pré-dimensionamento. Realiza-se a comparação entre as metodologias de análises de segunda ordem: o método simplificado MAES da ABNT NBR 8800:2008 e a análise avançada efetuada no programa *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*. Os resultados obtidos mostraram a consistência entre as metodologias de análises de 2ª ordem. A partir estudo comparativo entre a análise de 1ª ordem e a análise de 2ª ordem conclui-se sobre a pequena influência dos efeitos de 2ª ordem neste tipo de sistemas treliçados. Comprova-se a pouca sensibilidade à incorporação das imperfeições geométricas iniciais. Obtêm-se os gráficos de consumo aproximado de aço e de deslocamentos máximos. Para as diferentes soluções estruturais observa-se a incidência das tipologias das treliças no desempenho estrutural em relação aos deslocamentos máximos. Apresenta-se um procedimento simplificado de pré-dimensionamento mediante tabelas e ábacos produzidos para as diversas treliças.

Palavras – chave

Treliças; imperfeições iniciais; efeitos de segunda ordem; galpões industriais, pré-dimensionamento.

Abstract

Bareiro, Walter Gabriel; Dominguez Sotelino, Elisa (Advisor). **Study and Modeling of Trusses Structures Used in Industrial Buildings Considering Initial Imperfections and Second Order Effects**. Rio de Janeiro, 2015. 178 p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The industrial buildings are one of the segments of construction in most common steel in Brazil. The features in construction are rapidity of execution, a smaller volume of material and slenderness of the elements. In this dissertation evaluates the performance and the need consideration of initial imperfections and second order effects in the usual trusses structures in the sheds. Through modeling a set of trusses frames is carried out a parametric study of various types and seeks to provide a practical solution of pre-design. It carried out a comparison between the methodologies of second-order analysis: The simplified method MAES of the ABNT NBR 8800:2008 and the advanced analysis made in *Autodesk Robot Structural Analysis Professional* program. The result showed consistency between the methodologies of first and second order analysis. From a comparative study of the analysis of 1st order and 2nd order analysis is concluded on the small influence of 2nd order effects in this type of trusses systems. Proves to little sensitivity to the incorporation of initial geometric imperfections. They obtain the graphs of estimated consumption of steel and maximum displacements. For different structural solutions observes the incidence of types of trusses in the structural performance of maximum displacement. It presents a simplified procedure for preliminary design through tables and abacuses produced for different trusses.

Keywords

Trusses structures; typologies, initial imperfections; second order effects; industrial buildings; pre-design.

Sumário

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | Introdução | 19 |
| 1.1. | Motivação | 20 |
| 1.2. | Objetivos | 21 |
| 1.3. | Organização da Dissertação | 22 |
| 2 | Revisão Bibliográfica | 24 |
| 2.1. | Introdução | 24 |
| 2.2. | Galpões Industriais: Considerações iniciais | 24 |
| 2.3. | Aspectos relevantes da concepção de galpões | 25 |
| 2.4. | Sistemas Estruturais de construções industriais | 25 |
| 2.5. | Componentes dos galpões considerados | 28 |
| 2.6. | Treliças | 29 |
| 2.6.1. | Tipologias de treliças para coberturas | 30 |
| 2.6.2. | Geometria geral | 32 |
| 2.6.3. | Tipos de barras de treliças | 33 |
| 2.6.4. | Tipos de Ligações | 34 |
| 2.7. | Modelos Estruturais para treliças | 37 |
| 2.8. | Sistemas Estruturais | 38 |
| 2.8.1. | Pórticos Principais | 39 |
| 2.9. | Deslocamentos | 40 |
| 2.10. | Estabilização Longitudinal | 41 |
| 2.11. | Vinculação das bases de coluna | 42 |
| 2.12. | Tipos de análise estrutural | 43 |
| 2.13. | Efeitos não lineares | 44 |
| 2.13.1. | Efeitos de não linearidade material | 45 |
| 2.13.2. | Efeitos de não linearidade geométrica | 45 |
| 2.14. | Análise estrutural e dimensionamento segundo a NBR8800:2008 | 48 |
| 2.14.1. | Consideração dos efeitos de segunda ordem na análise global | 48 |
| 2.14.2. | Consideração das imperfeições iniciais na análise | 49 |
| 2.15. | Métodos de análise da estabilidade | 51 |

| | |
|---|-----|
| 2.15.1. Método simplificado MAES | 51 |
| 3 Modelagem e Dimensionamento | 55 |
| 3.1. Introdução | 55 |
| 3.2. Avaliação da análise em duas e três dimensões do modelo. | 55 |
| 3.2.1. Considerações iniciais | 56 |
| 3.2.2. Características da Edificação | 56 |
| 3.2.3. Análises e dimensionamento dos modelos 2D e 3D | 62 |
| 3.2.4. Comparação entre resultados das análises | 64 |
| 3.2.5. Justificativa da escolha do modelo de análise | 67 |
| 3.3. Dimensionamento da estrutura | 68 |
| 3.3.1. Verificações da resistência e da estabilidade | 69 |
| 3.4. Programa de cálculo utilizado para análise e dimensionamento | 70 |
| 3.4.1. Autodesk Robot Structural Analysis Professional | 70 |
| 3.5. Metodologia | 75 |
| 4 Estudo Paramétrico | 76 |
| 4.1. Descrição do estudo | 76 |
| 4.2. Características dos modelos de galpões | 76 |
| 4.2.1. Parâmetros dos galpões | 77 |
| 4.2.2. Definição dos modelos | 78 |
| 4.3. Determinação dos tipos de seções | 81 |
| 4.3.1. Tipos de materiais | 81 |
| 4.4. Indicadores comparativos das tipologias estruturais | 82 |
| 4.5. Carregamentos atuantes | 83 |
| 4.5.1. Combinações de carregamentos | 88 |
| 4.5.2. Vinculações dos elementos | 89 |
| 4.5.3. Tipos de análises e metodologias | 90 |
| 4.5.4. Comparação entre o método MAES e método avançado | 100 |
| 4.5.5. Estudo de Caso | 104 |
| 4.5.6. Dimensionamento pelo programa Robot Structural Analysis | 108 |
| 5 Análises dos Resultados dos Modelos | 119 |
| 5.1. Comparação dos resultados da Análise de 1ª ordem e 2ª Ordem | 119 |

| | |
|--|---------|
| 5.2. Comparação da introdução das imperfeições geométricas | 126 |
| 5.3. Gráficos de avaliação de tipologias | 126 |
| 5.3.1. Consumo aproximado de aço | 127 |
| 5.3.2. Deslocamentos máximos | 129 |
| 5.4. Ábacos de pré-dimensionamento | 132 |
| 5.5. Exemplos de utilização dos ábacos | 149 |
| 5.6. Influência da rigidez dos banzos | 152 |
| 5.7. Escolha do perfil em função da seção equivalente | 153 |
| 6 Conclusões e sugestões | 155 |
| 6.1. Conclusões | 155 |
| 6.2. Sugestões para trabalhos futuros | 158 |
| 7 Referências Bibliográficas | 159 |
| 8 Apêndice A | 163 |
| 8.1. Elementos das Trelças | 163 |
| 8.2. Elementos de colunas | 169 |
| 8.3. Notas de Cálculo | 177 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Edifício industrial com colunas e vigas de alma cheia. CBCA | 26 |
| Figura 2.2 – Edifício industrial com sistema de cobertura treliçado. CBCA | 26 |
| Figura 2.3 – Edifício industrial com coluna de AC e viga de rolamento CBCA | 27 |
| Figura 2.4 – Edifício industrial com coluna treliçada e viga de rolamento CBCA | 27 |
| Figura 2.5 – Edifício industrial com duas meias-águas, geminado. CBCA | 27 |
| Figura 2.6 – Edifício industrial com quatro meias-águas, geminado. CBCA | 28 |
| Figura 2.7 – Partes componentes de um galpão. CBCA | 28 |
| Figura 2.8 – Elementos de uma treliça. Pfeil (2009)..... | 29 |
| Figura 2.9 – Aplicações de sistemas treliçados. Pfeil (2009)..... | 29 |
| Figura 2.10 – Treliças com banzos paralelos. Pfeil (2009)..... | 30 |
| Figura 2.11 – Tipologias de treliças. Bellei (2010)..... | 31 |
| Figura 2.12 – Seções de Barras de Treliças. Bellei (2010). | 34 |
| Figura 2.13 – Ligações parafusadas concêntricas e excêntricas. Pfeil (2009). | 35 |
| Figura 2.14 – Ligações no nó de treliça com chapa <i>gusset</i> . Pfeil. (2009)..... | 36 |
| Figura 2.15 – Ligação soldada entre as hastes formando o nó da treliça. Pfeil (2009)..... | 36 |
| Figura 2.16 – Modelos de análises estruturais para treliças. Pfeil (2009)..... | 37 |
| Figura 2.17 – Esquema Estrutural de um edifício metálico de um piso. Trahair (2008). . | 39 |
| Figura 2.18– Flambagem banzos superior e inferior em distintos planos. Pfeil (2009).... | 41 |
| Figura 2.19 – Contraventamento em “X” e “K”. Alvarez (2005). | 42 |
| Figura 2.20 – a) base rotulada, b) e c) bases engastadas. Hirt (2001)..... | 43 |
| Figura 3.17 –Tipos análises estrutural comporta. carga-deslocamento. Chen (1991)..... | 44 |
| Figura 3.18 – Modelos de comportamento não linear do aço. Simões (2007)..... | 45 |
| Figura 3.19– Modo de deformação com deslocamento simétricos e laterais. (SCI, 2001)46 | |
| Figura 3.20 – Efeitos de 2ª ordem locais e globais. (SCI, 2001)..... | 47 |
| Figura 3.21 – Efeitos de 2ª Ordem globais. SCI (2001)..... | 47 |
| Figura 3.22 – Efeitos de 2ª ordem locais. SCI (2001)..... | 48 |
| Figura 3.23 – Modelo para analise. ABNT NBR 8800:2008..... | 52 |
| Figura 3.1 – Modelo do galpão no programa Robot | 57 |
| Figura 3.2 – Carregamento Permanente F_{Gk} | 58 |
| Figura 3.3 – Sobrecarga de cobertura F_{Gk} | 59 |
| Figura 3.4 – Dimensões em planta do galpão | 60 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.5 – Cargas finais de vento (Hipótese I)..... | 61 |
| Figura 3.6 – Cargas finais de vento (Hipótese II) | 61 |
| Figura 3.7 – Modelo 2D (bidimensional) da estrutura do galpão..... | 63 |
| Figura 3.8 – Modelo 3D (tridimensional) da estrutura do galpão | 63 |
| Figura 3.9 – Diagrama de envolórias dos esforços normais (kN), modelo 2D | 65 |
| Figura 3.10 – Diagrama de envolórias dos esforços normais (kN), modelo 3D | 65 |
| Figura 3.11 – Diagrama de envolórias dos esforços cortantes (kN), modelo 2D..... | 65 |
| Figura 3.12 – Diagrama de envolórias dos esforços cortantes (kN), modelo 3D..... | 65 |
| Figura 3.13 – Diagrama de envolórias momentos fletores (kNm), modelo 2D | 66 |
| Figura 3.14 – Diagrama de envolórias momentos fletores (kNm), modelo 3D | 66 |
| Figura 3.15 – Deslocamentos no modelo 2D | 67 |
| Figura 3.16 – Deslocamentos no modelo 3D | 67 |
| Figura 3.24 – Método utilizado para cálculos não lineares. <i>Robot User's Guide 2013</i> | 72 |
| Figura 3.25 – Seleção do tipo de análise no programa. <i>Robot User's Guide 2013</i> | 74 |
| Figura 4.1 – Modelos de galpões analisado para espaçamento de pórticos de 6m e 9m...77 | |
| Figura 4.2 – Modelos de pórticos treliçados triangular com vão de 15 a 45 m..... | 79 |
| Figura 4.3 – Modelos de pórticos treliçados de banzos paralelos com vão de 15 a 45 m. 80 | |
| Figura 4.4 – Modelos de pórticos treliçados trapezoidais com vão de 15 a 45 m..... | 81 |
| Figura 4.5 – Consumo aproximado de aço galpão de alma cheia. D'Alembert (2012). .. | 82 |
| Figura 4.6 – Cpe para Paredes - vento a 0° e 90° | 86 |
| Figura 4.7 – Cpe para telhados - vento a 0° e 90°..... | 86 |
| Figura 4.8 – Vento 1 (longitudinal 0°) G15 B6..... | 87 |
| Figura 4.9 – Vento 2 (Transversal) G15 B6..... | 87 |
| Figura 4.10 – Carregamentos no Galpão BP..... | 91 |
| Figura 4.11 – Características do Galpão de banzo paralelo | 91 |
| Figura 4.12 – Diagrama de Esforços Normais 1º Ordem COMB1 | 93 |
| Figura 4.13 – Diagrama de Esforços Cortantes 1º Ordem COMB1..... | 94 |
| Figura 4.14 – Diagrama de Momentos Fletores 1º Ordem COMB1 | 94 |
| Figura 4.15 – Estruturas para aplicação do MAES | 95 |
| Figura 4.16 – Diagrama de Esforço Normal Estrutura “nt” COMB1 | 95 |
| Figura 4.17– Diagrama de Momento Fletor Estrutura “nt” COMB1 | 96 |
| Figura 4.18 – Diagrama de Esforço Normal Estrutura “lt” R_{sd1} | 97 |
| Figura 4.19 – Diagrama de Momento Fletor Estrutura “lt” R_{sd1} | 97 |
| Figura 4.20 – Diagrama de Esforço Normal 2º Ordem COMB1 | 99 |
| Figura 4.21 – Diagrama de Esforço Cortante 2º Ordem COMB1..... | 99 |
| Figura 4.22 – Diagrama de Momento Fletor 2º Ordem COMB1 | 100 |
| Figura 4.23 – Gráfico de momentos fletores coluna 1 para cada tipo de análise | 101 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.24 – Gráfico de esforços normais coluna 1 para cada tipo de análise..... | 101 |
| Figura 4.25 – Gráfico de momentos fletores coluna 2 para cada tipo de análise | 101 |
| Figura 4.26 – Gráfico de esforços normais coluna 2 para cada tipo de análise..... | 102 |
| Figura 4.27 – Características do Galpão GT | 102 |
| Figura 4.28 – Características do Galpão GZ | 102 |
| Figura 4.29 – Geometria e grupos de seções dos elementos do Pórtico GP25 B6..... | 105 |
| Figura 4.30 – Cargas devidas Sobrecarga de uso SC1 GP25 B6 | 105 |
| Figura 4.31 – Cargas devidas ao VENTO1 (0° Longitudinal) GP25 B6..... | 106 |
| Figura 4.32 – Diagrama de esforços normais COMB1 (ELU) – GP25 B6..... | 106 |
| Figura 4.33– Diagrama Momentos Fletores COMB1 (ELU) - GP25 B6..... | 107 |
| Figura 4.34– Diagrama de Envoltória Momentos Fletores - GP15 B6 | 107 |
| Figura 4.35 – Deformada do Pórtico. | 109 |
| Figura 4.36 – Deslocamento Horizontal do Pórtico. | 109 |
| Figura 4.37 – Diagrama de envoltória de esforços normais no banzo mais solicitado. .. | 110 |
| Figura 4.38– Verificações da seções do pórtico para estados limite últimos (ELU)..... | 110 |
| Figura 4.39 – Nota de cálculo ELU do elemento banzo da treliça do galpão GP25B6 .. | 111 |
| Figura 4.40– Seção dupla cantoneira L 3x3x0,375 | 112 |
| Figura 4.41 – Seção cantoneira L 3x3x0,3125 | 113 |
| Figura 4.42 – Seção cantoneira L 2x2x0,3125 | 113 |
| Figura 4.43 – Esforços de compressão e tração para a barra do banzo | 113 |
| Figura 4.44– Seção Tipo W 12x72 das Colunas do pórtico GP25 B6 | 115 |
| Figura 4.45 – Envoltória de esforços axiais (coluna)..... | 116 |
| Figura 4.46 – Envoltória de esforços cortantes (coluna)..... | 116 |
| Figura 4.47 – Envoltória de momentos fletores (coluna)..... | 116 |
| Figura 5.1– Gráfico comparativo entre tipos de análises de 1ª e 2ª ordem. COMB1..... | 120 |
| Figura 5.2– Gráfico comparativo entre tipos de análises de 1ª e 2ª ordem. COMB2..... | 120 |
| Figura 5.3 – Gráfico comparativo entre tipos de análises de 1ª e 2ª ordem. COMB3..... | 121 |
| Figura 5.4 – Gráfico comparativo entre tipos de análises de 1ª e 2ª ordem. COMB1..... | 121 |
| Figura 5.5– Gráfico comparativo entre tipos de análises de 1ª e 2ª ordem. COMB2..... | 122 |
| Figura 5.6– Gráfico comparativo entre tipos de análises de 1ª e 2ª ordem. COMB3..... | 122 |
| Figura 5.7– Gráfico comparativo entre tipos de análises de 1ª e 2ª ordem. COMB1..... | 123 |
| Figura 5.8– Gráfico comparativo entre tipos de análises de 1ª e 2ª ordem. COMB2..... | 123 |
| Figura 5.9– Gráfico comparativo entre tipos de análises de 1ª e 2ª ordem. COMB3..... | 124 |
| Figura 5.10 – Variação do CAA para cada tipologia. Para B=6m. | 127 |
| Figura 5.11 – Variação do CAA para cada tipologia. Para B=9m. | 128 |
| Figura 5.12 – Variação do CAA para cada vão em função da tipologia. Para B=6m. | 129 |
| Figura 5.13 – Variação do CAA para cada vão em função da tipologia. Para B=6m. | 129 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.14 – Deslocamentos verticais em função da tipologia. Para B=6m..... | 130 |
| Figura 5.15 – Deslocamentos horizontais em função da tipologia. Para B=6m..... | 130 |
| Figura 5.16– Deslocamentos verticais em função da tipologia. Para B=9m..... | 131 |
| Figura 5.17 – Deslocamentos horizontais em função da tipologia. Para B=9m..... | 131 |
| Figura 5.18 – Ábaco de pré-dimensionamento para galpão com treliça triangular | 133 |
| Figura 5.19 – Ábaco de pré-dimensionamento para galpão com treliça banzo paralelo | 134 |
| Figura 5.20– Ábaco de pré-dimensionamento para galpão com treliça trapezoidal | 135 |
| Figura 5.21– Ábaco de pré-dimensionamento para galpão com treliça triangular | 137 |
| Figura 5.22– Ábaco de pré-dimensionamento para galpão com treliça banzo paralelo . | 138 |
| Figura 5.23– Ábaco de pré-dimensionamento para galpão com treliça trapezoidal | 139 |
| Figura 5.24 – Ábaco de pré-dimensionamento colunas (GT) B=6 m. | 141 |
| Figura 5.25 – Ábaco de pré-dimensionamento colunas (GP) B= 6 m..... | 142 |
| Figura 5.26 – Ábaco de pré-dimensionamento colunas (GZ) B=6 m. | 143 |
| Figura 5.27 – Ábaco de pré-dimensionamento colunas (GT) B=9 m. | 145 |
| Figura 5.28 – Ábaco de pré-dimensionamento colunas (GP) B= 9 m..... | 146 |
| Figura 5.29 – Ábaco de pré-dimensionamento colunas (GZ) B=9 m. | 147 |
| Figura 5.30 – Exemplo 1 de utilização do ábaco de pré-dimensionamento | 150 |
| Figura 5.31 – Exemplo 1 de utilização do ábaco de pré-dimensionamento | 152 |
| Figura 5.32 – Seções Equivalentes Perfil TE e Perfil DL | 154 |

Lista de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1 – Características tipos de treliças. Sechalo (2012). | 31 |
| Tabela 3.1– Análise comparativa entre resultados dos modelos do Galpão 2D e 3D..... | 67 |
| Tabela 3.2 – Metodologias de análises..... | 75 |
| Tabela 4.1 – Força nocional | 83 |
| Tabela 4.2 – Parâmetros meteorológicos | 84 |
| Tabela 4.3 – Valores dos fatores de S_2, V_k e q em função da altura z | 85 |
| Tabela 4.4 – Valores cargas devidas ao vento 0° e 90° nos pórticos para $B=6$ | 88 |
| Tabela 4.5 – Valores cargas devidas ao vento 0° e 90° nos pórticos para $B=6$ | 88 |
| Tabela 4.6 – Deslocamentos nos nós para análise de primeira e segunda ordem | 92 |
| Tabela 4.7 – Calculo do coeficiente B_2 | 93 |
| Tabela 4.8 – Reações estrutura “nt” para as combinações COMB1, COMB2, COMB3 .. | 96 |
| Tabela 4.9 – Cálculo do coeficiente B_1 | 98 |
| Tabela 4.10 – Cálculo do coeficiente B_2 | 98 |
| Tabela 4.11 – Comparação esforços solicitantes Robot vs. MAES | 100 |
| Tabela 4.12 – Classificação da estrutura do pórtico GT quanto à sensibilidade lateral .. | 103 |
| Tabela 4.13 – Classificação da estrutura do pórtico GZ quanto à sensibilidade lateral .. | 103 |
| Tabela 4.14 – Comparação esforços solicitantes Robot vs. MAES. Galpão GT | 103 |
| Tabela 4.15– Comparação esforços solicitantes Robot vs. MAES. Galpão GZ | 104 |
| Tabela 4.16 – Deslocamentos horizontais UX e verticais UY do pórtico..... | 109 |
| Tabela 4.17 – Limites de deformação para os elementos da estrutura..... | 110 |
| Tabela 5.1 – Resultados das análises numérica de 1^a e 2^a ordem, pórticos treliçado | 125 |
| Tabela 5.2 – Resultados das análises numérica de 1^a e 2^a ordem, pórticos treliçados . . | 125 |
| Tabela 5.3 – Resultados de introdução das imperfeições geométricas | 126 |
| Tabela 5.4 – Perfis, esforços máximos e nível de solicitações dos elementos da treliça | 136 |
| Tabela 5.5 – Perfis, esforços máximos e nível de solicitações dos elementos da treliça | 136 |
| Tabela 5.6 – Perfis, esforços máximos e nível de solicitações dos elementos da treliça | 136 |
| Tabela 5.7 – Perfis, esforços máximos e nível de solicitações dos elementos da treliça. | 140 |
| Tabela 5.8– Perfis, esforços máximos e nível de solicitações dos elementos da treliça. | 140 |
| Tabela 5.9 – Perfis, esforços máximos e nível de solicitações dos elementos da treliça. | 140 |
| Tabela 5.10– Perfis, esforços máximos e nível de solicitações das colunas GT B6. | 144 |
| Tabela 5.11 – Perfis, esforços máximos e nível de solicitações das colunas GP B6. | 144 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 5.12 – Perfis, esforços máximos e nível de solicitações das colunas GZ B6. | 144 |
| Tabela 5.13 – Perfis, esforços máximos e nível de solicitações das colunas GT B9. | 148 |
| Tabela 5.14– Perfis, esforços máximos e nível de solicitações das colunas GP B9. | 148 |
| Tabela 5.15– Perfis, esforços máximos e nível de solicitações das colunas GZ B9. | 148 |

Lista de símbolos

| | |
|------------|--|
| a | Distância. |
| b | Largura. |
| bf | Largura da mesa |
| d | Altura total da seção transversal |
| e | Distância; excentricidade |
| f_u | Resistência à ruptura do aço à tração |
| f_y | Resistência ao escoamento do aço |
| h | Altura |
| k | Coefficiente de flambagem de barras comprimidas |
| l | Comprimento |
| n | Número (quantidade) |
| r | Raio de giração |
| t | Espessura |
| t_f | Espessura da mesa |
| t_w | Espessura da alma |
| x | Coordenada; distância |
| y | Coordenada; distância |
| A | Área |
| A_g | Área bruta da seção |
| B | Espaçamento entre pórticos |
| C_w | Constante de empenamento da seção transversal |
| E | Módulo de elasticidade do aço |
| G | Módulo de elasticidade transversal do aço |
| GT | Galpão treliça triangular |
| GP | Galpão treliça banzo paralelo |
| GZ | Galpão treliça trapezoidal |
| H | Altura da coluna |
| I_x | Momento de inércia no eixo X-X |
| I_y | Momento de inércia no eixo Y-Y |
| L | Vão livre do pórtico |
| M | Momento fletor |
| N | Força axial |
| Q | Fator de redução total à flambagem local |
| Q_a, Q_s | Fatores de redução que levam em conta a flambagem local de elementos AA e AL respectivamente |
| S | Rigidez |
| S_d | Solicitação de cálculo |
| S_1 | Fator topográfico |
| S_2 | Fator de rugosidade do terreno |
| S_3 | Fator estatístico |
| V_d | Força cortante |
| V_0 | Velocidade básica do vento |

| | |
|-------------------------------------|--|
| W | Módulo de resistência elástico |
| Z | Módulo de resistência plástico |
| λ | Índice de esbeltez |
| λ_0 | Índice de esbeltez reduzido |
| Z | Módulo de resistência plástico |
| γ_g | Coeficientes de ponderação das ações permanentes |
| γ_q | Coeficientes de ponderação das ações variáveis |
| Ψ_j | Fatores de combinação |
| Δ_{vert} | Deslocamento vertical |
| Δ_{hor} | Deslocamento horizontal |
| $\Delta_{1^{\text{a}}\text{ordem}}$ | Deslocamento análises de primeira ordem |
| $\Delta_{2^{\text{a}}\text{ordem}}$ | Deslocamento análises de segunda ordem |