



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ESCOLA DE MINAS / UFOP**



# **AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS PARA GALPÕES COMPOSTOS POR PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO**

**AUTOR:** Gilcimar Saraiva Nogueira

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula

**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. José Luiz Rangel Paes

*Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.*

Ouro Preto, setembro de 2009

N778a Nogueira, Gilcimar Saraiva.  
Avaliação de soluções estruturais para galpões compostos por perfis de aço formados a frio [manuscrito] / Gilcimar Saraiva Nogueira - 2009.

xvii, 161f.: il., color.; graf.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula.  
Co-orientador: Prof. Dr. José Luiz Rangel Paes.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.  
Área de concentração: Construção Metálica.

1. Estruturas metálicas - Teses. 2. Aço - Estruturas - Teses.  
3. Edifícios industriais - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto.  
II. Título.

CDU: 624.014.2

Catlogação: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)

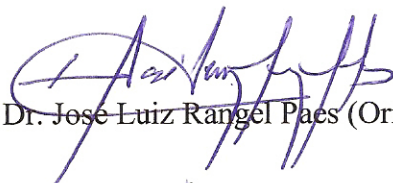
# AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS PARA GALPÕES COMPOSTOS POR PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO

**AUTOR: GILCIMAR SARAIVA NOGUEIRA**

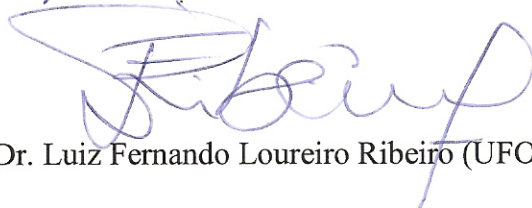
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 17 de setembro de 2009, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula (Orientador / UFOP)



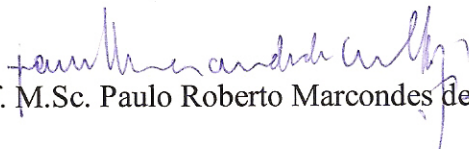
Prof. Dr. Jose Luiz Rangel Paes (Orientador / UFV)



Prof. Dr. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro (UFOP)



Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues (UFMG)



Prof. M.Sc. Paulo Roberto Marcondes de Carvalho (UFRGS)

Aos meus pais, José Nogueira e Margarida, aos meus irmãos Gilson, Gilmar, Gilciano, Josimar e Cristina e minha esposa Raquel, com amor e gratidão.

# Agradecimentos

A Deus, por vencer mais essa etapa na minha vida e por estar sempre me guiando, pois sem ele, não há sentido em viver.

Aos meus pais José Nogueira e Margarida, aos meus irmãos Gilson, Gilmar, Gilciano, Josimar e Cristina pelo amor e apoio irrestrito em todos os momentos.

A minha esposa Raquel, que sempre esteve ao meu lado me apoiando com muita paciência, compreensão e amor.

A todos os meus amigos do mestrado, em especial Bruno, Fábio e Helena, pelos grandes momentos, companheirismo e aprendizado conquistado neste período.

Aos meus amigos, em especial ao Márcio Gonçalves por ter sido fundamental e parceiro para o término deste trabalho.

Ao Prof. Geraldo Donizetti de Paula, por ter sido um grande amigo e orientador.

Ao grande amigo Prof. José Luiz Rangel Paes, pela orientação ao longo de todo o trabalho, pelos conselhos, incentivos e aprendizado.

À Universidade Federal de Viçosa e Universidade Federal de Ouro Preto, pelas oportunidades e formação profissional.

À empresa Stabile Engenharia Ltda pelo apoio e parceria neste trabalho.

À empresa Medabil S. A. por ter me dado a primeira oportunidade de trabalho e estar contribuindo para minha formação técnica e humana.

# Resumo

A tipologia estrutural de um projeto de um galpão de uso geral é comumente definida através da experiência dos projetistas e calculistas de estrutura metálica. O processo de decisão entre os diferentes tipos de sistemas estruturais não é uma matéria amplamente discutida nos projetos de engenharia civil. As competitividades das estruturas de galpões de uso geral exigem respostas rápidas e econômicas frente ao mercado consumidor. O objetivo deste trabalho foi avaliar, comparativamente, o desempenho de alguns sistemas estruturais comumente empregados para galpões de uso geral compostos por vigas de cobertura em perfis formados a frio. Para se avaliar o desempenho de alguns sistemas estruturais, foram considerados pórticos transversais com as seguintes tipologias: pórtico de alma cheia, pórtico com treliça em arco, pórtico com treliça de banzos paralelos, pórtico com treliça trapezoidal e pórtico com treliça triangular, com vãos livres de 16, 20, 24, 28 e 32 metros, distância entre pórticos de 6, 7.5 e 9 metros e velocidade básica do vento igual a 30, 35 e 40 m/s. Os galpões foram modelados, analisados e calculados no software mCalc2008. Para avaliar a eficiência do sistema estrutural utilizou-se como parâmetro de avaliação a taxa de consumo de aço e a resposta estrutural dos sistemas. Conclui-se sobre o ponto de vista estrutural, dentre as tipologias e os parâmetros considerados nas análises, que os pórticos treliçados são mais eficientes que os pórticos em alma cheia. Das tipologias em pórticos treliçados, a treliça em arco é o mais eficiente para pequenos vãos, baixa ação do vento e baixo espaçamento entre os pórticos transversais. Para maiores vãos, a treliça trapezoidal e a treliça de banzos paralelos apresentam melhor desempenho.

**Palavras-chave:** Perfis formados a frio, galpões de uso geral, sistemas estruturais

# Abstract

The structural typology of industrial hangars projects is commonly defined by means of the designer`s experience. The decision process among the variety of structural systems is not a subject widely discussed on civil engineering projects. In projects of industrial hangars, the experience of the designer is crucial for the decision of the most appropriate structural typology. Despite the variety of the structural solutions, the high competitiveness of this type of structures requires quick and economic responses in front of the consumer market. The objective of this study is to evaluate comparatively the performance of some usual structural systems for industrial sheds, made of cold formed profiles. For the development of this study, there were considered frames with cross sections of the following types: frames with I-shaped cross sections, frames with arch truss, frames with trusses of parallel chords, frames with trapezoidal truss and frames with triangular truss. The free spans studied were of 16, 20, 24, 28 and 32 meters; the distance between frames, 6, 7.5 and 9 meters, as well as the basic wind speeds of 30, 35 and 40 m/s. The sheds were modeled, analyzed and calculated in by software mCalc 2008. The study used the rate of consumption of steel and the structural response as a parameter of evaluation of efficiency of the different structural systems presented. Therefore, from the structural behavior point of view, considering all the typologies and parameters evaluated, the frames with trussed cross sections are more efficient than the frames with I-shaped cross sections. Among the typologies of trussed cross sections studied, the arch truss is the most efficient for small free spans, low wind loads and small distances between frames. For lager free spans, the trapezoidal truss and the parallel uprights truss have presented the best performance.

**Key words:** cold formed profiles, industrial hangars, structural systems

# Índice

<b>RESUMO</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Objetivos .....	4
1.2. Motivação para Desenvolvimento do Trabalho .....	5
1.3. Estrutura do Trabalho .....	6
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>7</b>
2.1. Galpões de Uso Geral .....	7
2.2. Ação do Vento em Edificações .....	9
2.3. Sistemas Estruturais de Galpões de Uso Geral .....	10
2.3.1. Pórticos Planos .....	10
2.3.2. Vinculação das Bases de Coluna .....	13
2.3.3. Estruturas de Estabilização Longitudinal .....	15
2.4. Considerações Sobre o Uso e Dimensionamento de Perfis Formados a Frio .....	16
2.4.1. O Uso de Perfis Formados a Frio .....	16
2.4.2. Algumas Considerações sobre os Métodos de Dimensionamento de Perfis Formados a Frio .....	18
2.4.2.1. .....	Co
mportamento Estrutural de Perfis de Seção Aberta .....	18
2.4.2.2. .....	Mét
odo da Largura Efetiva .....	19
2.4.2.3. .....	Mét
odo da Resistência Direta (MRD) .....	22
2.5. Parâmetros para Avaliação do Sistema Estrutural .....	29
<b>3. SELEÇÃO DE PARÂMETROS PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO</b> .....	<b>39</b>
3.1. Variação de Parâmetros .....	40
3.2. Definição dos Modelos .....	45



3.2.1. Pórtico de Alma Cheia .....	46
3.2.2. Pórtico com Treliça em Arco .....	47
3.2.3. Pórtico com Treliça de Banzos Paralelos .....	48
3.2.4. Pórtico com Treliça Trapezoidal .....	49
3.2.5. Pórtico com Treliça Triangular .....	51
3.3. Considerações sobre a Fabricação de Estruturas Treliçadas com PFF Tipo U.....	52
<b>4. ANÁLISE ESTRUTURAL E DIMENSIONAMENTO DOS MODELOS .....</b>	<b>56</b>
4.1. Ações.....	56
4.2. Combinações de Ações .....	65
4.3. Análise Estrutural.....	66
4.3.1. Estratégias de Análise Estrutural.....	66
4.3.2. Programas Computacionais Utilizados na Análise Estrutural.....	67
4.4. Dimensionamento dos Modelos.....	67
4.4.1. Bases para Dimensionamento .....	67
4.4.2. Deslocamentos dos Pórticos Transversais.....	68
4.4.3. Programas Computacionais Utilizados no Dimensionamento .....	69
4.5. Resultados da Análise e Dimensionamento dos Modelos .....	70
4.5.1. Análise Estrutural do Modelo G-BP-V24-L6-V35 .....	72
4.5.2. Dimensionamento do Modelo G-BP-V24-L6-V35 .....	79
4.5.3. Dimensionamento das Terças de Cobertura G-BP-V24-L6-V35.....	83
4.5.4. Representação dos Resultados.....	84
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>86</b>
5.1. Comparativo da Taxa de Consumo de Aço .....	87
5.1.1. Variação da Taxa de Consumo de Aço para uma Única Tipologia .....	87
5.1.1.1. .... Tax	
a de Consumo de Aço para Pórticos de Alma Cheia (AC).....	87
5.1.1.2. .... Tax	
a de Consumo de Aço para Pórticos de Treliça em Arco (TA).....	90
5.1.1.3. .... Tax	
a de Consumo de Aço para Pórticos de Banzos Paralelos (BP) .....	91
5.1.1.4. .... Tax	
a de Consumo de Aço para Pórticos de Treliça Trapezoidal (TP) .....	93

5.1.1.5. ....	Tax
a de Consumo de Aço para Pórticos de Treliça Triangular (TT) .....	95
5.1.2. Variação da Taxa de Consumo de Aço para Diversas Tipologias .....	97
5.1.3. Variação da Taxa de Consumo de Aço para Diferentes Tipos de Vinculação das Bases .....	107
5.2. Comparativo dos Deslocamentos dos Modelos Analisados .....	111
5.2.1. Sobreposição dos Deslocamentos Horizontais.....	111
5.2.2. Sobreposição dos Deslocamentos Verticais .....	117
5.2.3. Avaliação dos Deslocamentos Horizontais e Verticais para Bases Engastadas e Rotuladas .....	123
5.3. Comparativo da Taxa de Consumo de Aço com os Resultados da Literatura.....	124
5.3.1. Consumo de Aço para Galpão em Pórtico de Alma Cheia .....	125
5.3.2. Consumo de Aço para Galpão em Pórtico Treliçado .....	127
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>132</b>
6.1. Conclusões .....	132
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros .....	135
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>136</b>
<b>Bibliografia Complementar.....</b>	<b>139</b>
<b>Apêndice A.....</b>	<b>141</b>
<b>Apêndice B.....</b>	<b>146</b>
<b>Apêndice C.....</b>	<b>152</b>
<b>Apêndice D.....</b>	<b>156</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1 - Ponte sobre o Rio Paraíba do Sul (Fonte: PINHO e BELLEI, 2007).....	2
Figura 1.2 - Vista geral de um conjunto de galpões de uso geral (Fonte: Medabil S. A.)....	3
Figura 1.3 - Galpões formados por pórticos de alma cheia.....	3
Figura 1.4 - Galpões formados por pórticos treliçados .....	4
Figura 2.1 - Posto de combustível em Contagem – MG destruído pela ação do vento (Fonte: www.globo.com.br - 2007).....	9
Figura 2.2 - Pórtico de alma cheia.....	11
Figura 2.3 - Vigas treliçadas de cobertura.....	11
Figura 2.4 - Vista geral de um galpão empregando perfis de seções variáveis.....	14
Figura 2.5 - Sistemas de estabilização longitudinal de um galpão de uso geral .....	15
Figura 2.6 - Larguras efetivas de perfis formados a frio .....	19
Figura 2.7 - Análise de estabilidade elástica via CUFSM de um perfil U (Fonte: MAIA, 2008) .....	23
Figura 2.8 - Análise de estabilidade elástica via CUFSM de um perfil L (Fonte: MAIA, 2008) .....	24
Figura 2.9 - Análise de estabilidade elástica via CUFSM de um perfil Le (Fonte: MAIA, 2008) .....	24
Figura 2.10 - Esquema unifilar da treliça em mm (Fonte: PRAVIA, 2005) .....	27
Figura 2.11 - (a) Viga simplesmente apoiada com carregamento uniformemente distribuído e (b) diagrama do momento fletor (Fonte: GRIGOLETTI, 2008)..	28
Figura 2.12 - Taxa de consumo de aço para galpão leves comum (Fonte: MIC/STI, 1986) .....	30
Figura 2.13 - Taxa de consumo de aço para galpões médios (Fonte: MIC/STI, 1986) .....	30
Figura 2.14 - Consumo de aço, em kg/m <sup>2</sup> , para galpão em pórtico de perfis em alma cheia com pé direito (H) de 6 m e distância entre pórticos(B) de 6 m (Fonte: D'ALAMBERT, 2004).....	32
Figura 2.15 - Consumo de aço, em kg/m <sup>2</sup> , para galpão em pórtico em alma cheia com pé direito (H) de 6 m e distância entre pórticos(B) de 9 m (Fonte: D'ALAMBERT, 2004). .....	32

Figura 2.16 - Taxa de consumo aço para as tipologias de pórticos transversais consideradas, em função do vão livre e variação da composição das vigas treliçadas (Fonte: CHAVES, 2007) .....	34
Figura 2.17 - Deslocamentos verticais para as diversas tipologias dos pórticos treliçados formados por perfil TE eletro-soldado (Fonte: CHAVES, 2007).....	35
Figura 2.18 - Deslocamentos verticais para as diversas tipologias dos pórticos treliçados formados por cantoneira dupla (Fonte: CHAVES, 2007).....	36
Figura 2.19 - Deslocamentos horizontais para as diversas tipologias, considerando-se pórticos treliçados formados por perfil TE eletro-soldado (Fonte: CHAVES, 2007).....	37
Figura 2.20 - Deslocamentos horizontais para as diversas tipologias, considerando-se pórticos treliçados formados por cantoneira dupla (Fonte: CHAVES, 2007).....	38
Figura 3.1 - Variação do espaçamento entre os pórticos transversais .....	42
Figura 3.2 - Regiões consideradas no estudados.....	43
Figura 3.3 - Variação da geometria para os pórticos de alma cheia (AC) (dimensões em milímetros) .....	47
Figura 3.4 - Variação da geometria para os pórticos com treliça em arco (TA) (dimensões em milímetros) .....	48
Figura 3.5 - Variação da geometria para os pórticos com treliça de banzos paralelos (BP) (dimensões em milímetros) .....	49
Figura 3.6 - Variação da geometria para os pórticos com treliça trapezoidal (TP)(dimensões em milímetros).....	50
Figura 3.7 - Variação da geometria para os pórticos com treliça triangular (TT) (dimensões em milímetros) .....	51
Figura 3.8 - Possibilidades de seções transversais de vigas treliçadas.....	52
Figura 3.9 - Exemplo de aplicação de treliça empregando perfis formados a frio tipo U nos banzos, diagonais e montantes (Fonte: álbum do autor).....	53
Figura 3.10 - Exemplo de projeto de treliça empregando perfis formados a frio tipo U nos banzos, diagonais e montantes .....	54

Figura 3.11 - Bancada de gabarito para produção de treliças (Fonte: álbum do autor) .....	54
Figura 4.1 - Atuação da ação permanente .....	57
Figura 4.2 - Atuação da sobrecarga.....	59
Figura 4.3 - Atuação do vento longitudinal para galpões em duas águas (Vento 0°) .....	60
Figura 4.4 - Atuação do vento transversal para galpões em duas águas (Vento 90°) .....	60
Figura 4.5 - Atuação do vento longitudinal para galpões em arco (Vento 0°).....	60
Figura 4.6 - Atuação do vento transversal para galpões em arco (Vento 90°).....	60
Figura 4.7 - Deslocamento vertical típico de um pórtico com treliça trapezoidal (BP).....	69
Figura 4.8 - Deslocamento horizontal típico de um pórtico com treliça trapezoidal (BP)....	69
Figura 4.9 - Visão tridimensional do modelo G-BP-V24-L6-V35 .....	71
Figura 4.10 - Pórtico transversal com treliça de banzos paralelos referente ao modelo G-BP-V24-L6-V35 .....	71
Figura 4.11 - Ações devidas ao peso próprio de cobertura (G) em kN/m do modelo G-BP-V24-L6-V35 .....	73
Figura 4.12 - Ações devidas à sobrecarga de cobertura (Q) em kN/m do modelo G-BP-V24-L6-V35 .....	73
Figura 4.13 - Ações devidas ao vento longitudinal (V0°) em kN/m do modelo G-BP-V24-L6-V35 .....	73
Figura 4.14 - Ações devidas ao vento transversal (V90°) em kN/m do modelo G-BP-V24-L6-V35 .....	74
Figura 4.15 - Diagrama de esforços axiais devida à COMB1 (1,25G + 1,5Q) .....	75
Figura 4.16 - Diagrama de esforços axiais devida à COMB2 (G + 1,4V0°).....	75
Figura 4.17 - Diagrama de esforços axiais devida à COMB3 (G + 1,4V90°).....	76
Figura 4.18 - Diagrama de esforços cortante devida à COMB1 (1,25G + 1,5Q) .....	76
Figura 4.19 - Diagrama de esforços cortante devida à COMB2 (G + 1,4V0°) .....	77
Figura 4.20 - Diagrama de esforços cortante devida à COMB3 (G + 1,4V90°) .....	77
Figura 4.21 - Diagrama de momentos fletores devida à COMB1 (1,25G + 1,5Q) .....	78
Figura 4.22 - Diagrama de momentos fletores devida à COMB2 (G + 1,4V0°).....	78
Figura 4.23 - Diagrama de momentos fletores devida à COMB3 (G + 1,4V90°).....	79
Figura 4.24 - Verificação das seções transversais do modelo G-BP-V24-L6-V35 .....	80
Figura 4.25 - Verificação das diagonais que apresentaram a relação de tensões Nd/Rd = 1,08 do modelo G-BP-V24-L6-V35 .....	80

Figura 4.26 - Redimensionamento das diagonais do modelo G-BP-V24-L6-V35 .....	81
Figura 4.27 - Deslocamento vertical típico de um pórtico com treliça trapezoidal (BP).....	82
Figura 4.28 - Deslocamento horizontal típico de um pórtico com treliça trapezoidal (BP)....	82
Figura 4.29 - Deslocamento horizontal do nó 3 do modelo G-BP-V24-L6-V35.....	83
Figura 4.30 - Seções transversais dos elementos que compõem o modelo G-BP-V24-L6-V35 .....	85
Figura 5.1 - Taxa de consumo de aço para tipologia AC e $V_0 = 30\text{m/s}$ .....	87
Figura 5.2 - Taxa de consumo de aço para tipologia AC e $V_0 = 35\text{m/s}$ .....	88
Figura 5.3 - Taxa de consumo de aço para tipologia AC e $V_0 = 40\text{m/s}$ .....	88
Figura 5.4 - Avaliação da influência da terça de cobertura na taxa de consumo de aço no pórtico de alma cheia.....	89
Figura 5.5 - Taxa de consumo de aço para tipologia TA e $V_0 = 30\text{m/s}$ .....	90
Figura 5.6 - Taxa de consumo de aço para tipologia TA e $V_0 = 35\text{m/s}$ .....	90
Figura 5.7 - Taxa de consumo de aço para tipologia TA e $V_0 = 40\text{m/s}$ .....	91
Figura 5.8 - Taxa de consumo de aço para tipologia BP e $V_0 = 30\text{m/s}$ .....	92
Figura 5.9 - Taxa de consumo de aço para tipologia BP e $V_0 = 35\text{m/s}$ .....	92
Figura 5.10 - Taxa de consumo de aço para tipologia BP e $V_0 = 40\text{m/s}$ .....	93
Figura 5.11 - Taxa de consumo de aço para tipologia TP e $V_0 = 30\text{m/s}$ .....	94
Figura 5.12 - Taxa de consumo de aço para tipologia TP e $V_0 = 35\text{m/s}$ .....	94
Figura 5.13 - Taxa de consumo de aço para tipologia TP e $V_0 = 40\text{m/s}$ .....	95
Figura 5.14 - Taxa de consumo de aço para tipologia TT e $V_0 = 30\text{m/s}$ .....	96
Figura 5.15 - Taxa de consumo de aço para tipologia TT e $V_0 = 35\text{m/s}$ .....	96
Figura 5.16 - Taxa de consumo de aço para tipologia TT e $V_0 = 40\text{m/s}$ .....	97
Figura 5.17 - Taxa de consumo de aço para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre, $V_0 = 30\text{m/s}$ e $L = 6\text{m}$ .....	98
Figura 5.18 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre, para, $V_0 = 30\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	98
Figura 5.19 - Taxa de consumo de aço para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 6\text{m}$ .....	99
Figura 5.20 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre, para, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	99

Figura 5.21 - Taxa de consumo de aço para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre, $V_0 = 40\text{m/s}$ e $L = 6\text{m}$ .....	100
Figura 5.22 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre, para, $V_0 = 40\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	100
Figura 5.23 - Taxa de consumo de aço para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre, $V_0 = 30\text{m/s}$ e $L = 7,5\text{m}$ .....	101
Figura 5.24 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre, para, $V_0 = 30\text{m/s}$ e $L = 7,5\text{m}$ .....	101
Figura 5.25 - Taxa de consumo de aço para as tipologias AC, TA, BP e TP , em função do vão livre, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 7,5\text{m}$ .....	102
Figura 5.26 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre, para, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 7,5\text{m}$ .....	102
Figura 5.27 - Taxa de consumo de aço para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre, $V_0 = 40\text{m/s}$ e $L = 7,5\text{m}$ .....	103
Figura 5.28 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre, para, $V_0 = 40\text{m/s}$ e $L = 7,5\text{m}$ .....	103
Figura 5.29 - Taxa de consumo de aço para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre, $V_0 = 30\text{m/s}$ e $L = 9,0\text{m}$ .....	104
Figura 5.30 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre, para, $V_0 = 30\text{m/s}$ e $L = 9,0\text{m}$ .....	104
Figura 5.31 - Taxa de consumo de aço para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 9,0\text{m}$ .....	105
Figura 5.32 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre, para, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 9,0\text{m}$ .....	105
Figura 5.33 - Taxa de consumo de aço para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre, $V_0 = 40\text{m/s}$ e $L = 9,0\text{m}$ .....	106
Figura 5.34 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre, para, $V_0 = 40\text{m/s}$ e $L = 9,0\text{m}$ .....	106
Figura 5.35 - Variação da taxa de consumo para tipologia SC, em função do tipo de vinculação das bases, para, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	108
Figura 5.36 - Variação da taxa de consumo para tipologia TA, em função do tipo de vinculação das bases, para, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	108

Figura 5.37 - Variação da taxa de consumo para tipologia BP, em função do tipo de vinculação das bases, para, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	109
Figura 5.38 - Variação da taxa de consumo para tipologia TP, em função do tipo de vinculação das bases, para, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	109
Figura 5.39 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 30\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	110
Figura 5.40 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	112
Figura 5.41 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	112
Figura 5.42 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 40\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	113
Figura 5.43 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 30\text{m/s}$ e $L = 7,5\text{m}$ .....	113
Figura 5.44 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 7,5\text{m}$ .....	114
Figura 5.45 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 40\text{m/s}$ e $L = 7,5\text{m}$ .....	114
Figura 5.46 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 30\text{m/s}$ e $L = 9,0\text{m}$ .....	115
Figura 5.47 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 9,0\text{m}$ .....	115
Figura 5.48 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 40\text{m/s}$ e $L = 9,0\text{m}$ .....	116
Figura 5.49 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 30\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	118
Figura 5.50 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	118
Figura 5.51 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 40\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	119
Figura 5.52 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 30\text{m/s}$ e $L = 7,5\text{m}$ .....	119



Figura 5.53 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 7,5\text{m}$ .....	120
Figura 5.54 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 40\text{m/s}$ e $L = 7,5\text{m}$ .....	120
Figura 5.55 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 30\text{m/s}$ e $L = 9,0\text{m}$ .....	121
Figura 5.56 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 35\text{m/s}$ e $L = 9,0\text{m}$ .....	121
Figura 5.57 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP,TP e TT, em função do vão livre, $V_0 = 40\text{m/s}$ e $L = 9,0\text{m}$ .....	122
Figura 5.58 - Sobreposição dos deslocamentos verticais, em função do vão livre, $V_0=35\text{m/s}$ , $L = 6,0\text{m}$ , bases engastadas e bases rotuladas .....	123
Figura 5.59 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais, em função do vão livre, $V_0=35\text{m/s}$ , $L = 6,0\text{m}$ , bases engastadas e bases rotuladas .....	124
Figura 5.60 - Comparativo da taxa de consumo de aço dos pórticos transversais com os resultados de D'ALAMBERT (2004) para pórticos de alma cheia (AC), $V_0=35\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	125
Figura 5.61 - Comparativo da taxa de consumo de aço dos pórticos transversais com os resultados de CHAVES (2007) para pórticos de alma cheia (AC), $V_0 =35\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	126
Figura 5.62 - Comparativo da taxa de consumo de aço para pórticos com treliça triangular (TT) .....	127
Figura 5.63 - Comparativo da taxa de consumo de aço para pórticos com treliça em Arco (TA) .....	128
Figura 5.64 - Comparativo da taxa de consumo de aço para pórticos com treliça e Banzos Paralelos (BP) .....	129
Figura 5.65 - Comparativo da taxa de consumo de aço para pórticos com treliça Trapezoidal (TP) .....	129
Figura 5.66 - Comparativo da taxa de consumo de aço dos pórticos transversais com os resultados de CHAVES (2007), para $V_0 =35\text{m/s}$ e $L = 6,0\text{m}$ .....	130

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Influência das relações geométricas das seções tipo U enrijecido no modo crítico (Fonte: BATISTA, 2000) .....	19
Tabela 2.2 - Comparação entre os métodos de dimensionamento de perfis formados a frio submetidos à compressão (Fonte: PRAVIA, 2005) .....	28
Tabela 2.3 - Comparação entre os métodos de dimensionamento de perfis formados a frio submetidos à flexão (Fonte: GRIGOLETTI, 2008) .....	29
Tabela 2.4 - Composição dos estágios de ações (Fonte: D'ALAMBERT, 2004) .....	31
Tabela 3.1 - Tipologias de pórtico transversal consideradas no estudo .....	42
Tabela 4.1 - Ação permanente.....	57
Tabela 4.2 - Sobrecarga de cobertura.....	58
Tabela 4.3 - Ação do vento nas tipologias AC, BP, TP e TT em função das variações paramétricas.....	61
Tabela 4.4 - Ação do vento nas tipologias TA em função das variações paramétricas .....	62
Tabela 4.5 - Lista das terças e sua taxa de consumo de aço para o modelo G-BP-V24-L6-V35.....	84
Tabela 4.6 - Lista de materiais do modelo G-BP-V24-L6-V35 .....	85
Tabela 5.1 - Deslocamento horizontal máximo para as diversas tipologias .....	111
Tabela 5.2 - Deslocamento vertical máximo para as diversas tipologias.....	117

# 1

## Introdução

Em decorrência do mercado competitivo e globalizado, o custo dos empreendimentos é um parâmetro decisivo para a construção civil e, em particular, para as empresas fabricantes de estruturas metálicas. Os projetos modernos devem conjugar três aspectos fundamentais: segurança, economia e durabilidade. Estes aspectos garantem a competitividade de um projeto.

Existem registros de utilização de estruturas metálicas em escala industrial a partir de 1750. No Brasil, o uso de estrutura metálica teve início no ano de 1812. Acredita-se que a primeira obra a usar ferro puddado, fundido no Brasil, no Estaleiro Mauá, em Niterói, RJ, foi a Ponte de Paraíba do Sul, no Estado do Rio de Janeiro, com cinco vãos de 30 metros, cuja data de construção é de 1857, estando em uso até hoje (Figura 1.1). A primeira obra em que se usou aço importado em edifícios no Brasil foi o teatro Santa Izabel, em Recife, a partir do projeto do francês Louis Léger Vauthier (1815 - 1877).



Figura 1.1 - Ponte sobre o Rio Paraíba do Sul (Fonte: PINHO e BELLEI, 2007).

O grande avanço na fabricação de perfis em larga escala ocorreu com a implantação das grandes siderúrgicas (PINHEIRO, 2005). Graças aos avanços tecnológicos da siderurgia que a construção civil é hoje um importante setor de consumo de aço em todo o mundo.

No contexto da construção metálica brasileira, os galpões de uso geral (Figura 1.2) são responsáveis por uma grande parcela dos empreendimentos. Dentro desse importante segmento, as estruturas de um só pavimento são as mais utilizadas, exigindo soluções econômicas e versáteis para uma larga faixa de vãos e uma ampla gama de aplicações, tais como: fábricas, depósitos, lojas, academias, ginásios poliesportivos, garagens, granjas, hangares, etc.

Diversos sistemas estruturais podem ser empregados na composição da estrutura de galpões de uso geral de um só pavimento. Os sistemas formados por pórticos planos transversais estabilizados longitudinalmente por contraventamentos são os mais comuns e normalmente levam a estruturas simples, sem interferências, de grande velocidade construtiva e economia. Estas características levam à disseminação do uso desses sistemas para galpões de um só pavimento.



Figura 1.2 - Vista geral de um conjunto de galpões de uso geral (Fonte: Medabil S.A.).

Existem dois tipos básicos de pórticos planos utilizados nos galpões de um só pavimento: os pórticos de perfis de alma cheia (Figura 1.3), que utilizam perfis laminados ou perfis soldados, e os pórticos treliçados (Figura 1.4), que empregam perfis leves (laminados e/ou formados a frio).



Figura 1.3 - Galpão formado por pórticos de perfis de alma cheia.

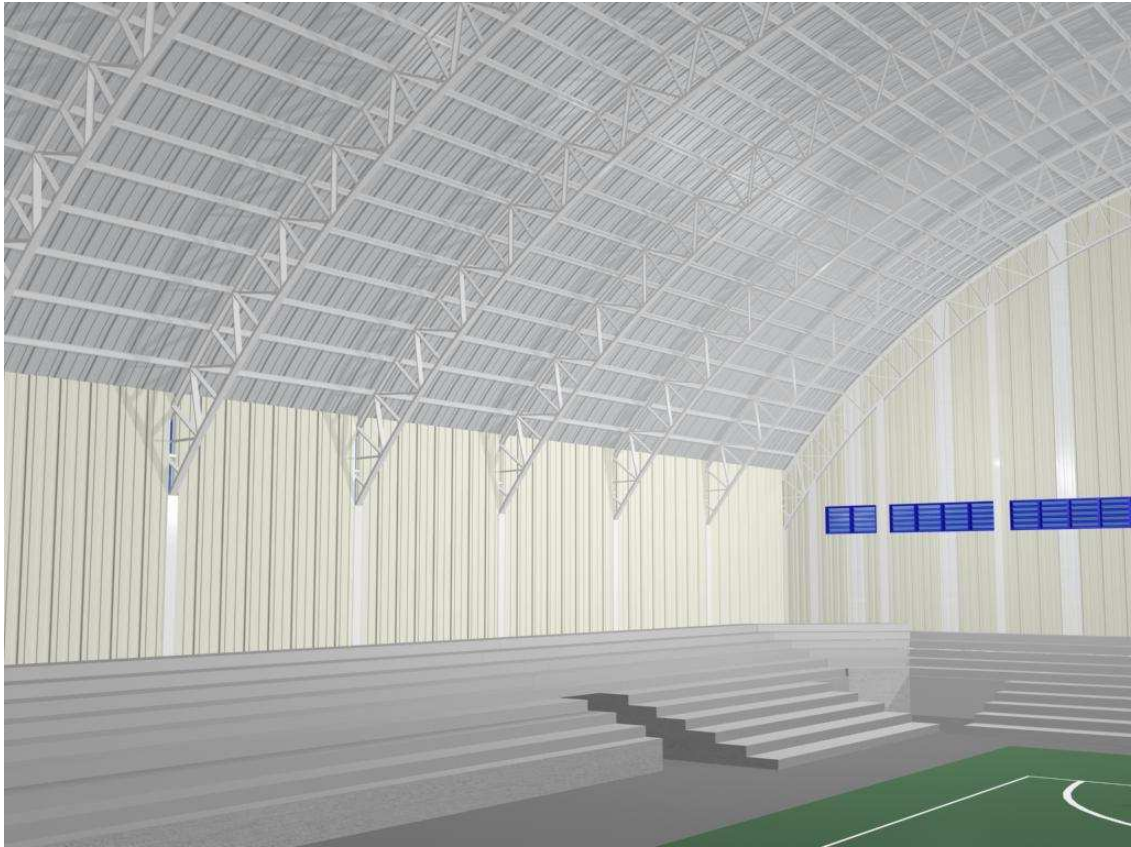


Figura 1.4 - Galpão formado por pórticos treliçados.

No Brasil, o uso de perfis de aço formados a frio (PFF) é muito difundido em diversas aplicações. No caso de galpões de uso geral o uso de PFF foi bastante ampliado nos últimos anos, principalmente devido às reduzidas taxas de consumo de aço por unidade de área alcançada nesses projetos. Em função disso, a oferta de PFF aumentou significativamente no mercado brasileiro.

## 1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar soluções estruturais para galpões compostos por perfis formados a frio.

Os objetivos específicos são:

- identificar tipologias típicas de pórticos planos transversais utilizados na concepção de galpões de uso geral de um só pavimento em estrutura de aço;
- determinar a taxa de consumo de aço de cada estrutura;

- comparar a taxa de consumo de aço e a resposta estrutural dos modelos;
- avaliar a eficiência das soluções estruturais selecionadas;
- gerar ábacos que permitam estimar a taxa do consumo de aço em função da tipologia, vão livre, distâncias entre pórticos transversais e situações de ação do vento típicas de diversas regiões brasileiras.

## **1.2. Motivação para Desenvolvimento do Trabalho**

A escolha do sistema estrutural para galpões de uso geral ainda é um assunto pouco explorado por arquitetos e engenheiros. Geralmente, a experiência do projetista é fundamental na tomada de decisão quanto à tipologia estrutural mais adequada. Sem esta experiência, arquitetos e engenheiros se ressentem da falta dessas indicações para a concepção de galpões de uso geral.

Apesar da grande utilização de perfis formados a frio nos galpões de uso geral e da disponibilidade de normas brasileira sobre o assunto (NBR 14762: 2001 e NBR 6355:2003), não se dispõe de estudos comparativos sobre soluções estruturais com o uso de PFF para essas obras.

BELLEI (2006) apresenta uma visão geral das possibilidades de arranjos estruturais para concepção de galpões industriais.

Com o avanço da informática tornou-se possível simular o comportamento de diversos modelos estruturais antes de se tomar uma decisão sobre a tipologia estrutural a ser adotada. No entanto, ainda não se dispõe de muitos estudos sobre a avaliação de soluções estruturais para galpões de uso geral. Tendo em vista esta lacuna, este trabalho se centra na avaliação de soluções estruturais para galpões de uso geral compostos por perfis formados a frio.

Este trabalho está inserido na linha de pesquisa de comportamento e dimensionamento de estruturas que vem sendo desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Área de Concentração em Estrutura Metálica. Representa também uma continuação da dissertação apresentada por CHAVES (2007). Além disso, é resultado de uma parceria com pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Área de Concentração em Engenharia da Construção.

### **1.3. Estrutura do Trabalho**

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre diversos temas relacionados ao projeto de galpões de uso geral, assim como apresentam-se os resultados de alguns estudos sobre a avaliação de soluções estruturais para galpões em estrutura metálica.

No Capítulo 3 são apresentados os parâmetros para o desenvolvimento de um estudo para avaliar o desempenho de soluções estruturais para galpões de uso gerais compostos por perfis formados a frio. Neste estudo considera-se a variação da tipologia dos pórticos planos que compõem a estrutura principal do galpão, do vão livre, do espaçamento entre pórticos transversais e das ações devidas ao vento.

A análise e dimensionamento dos modelos definidos por meio dos parâmetros adotados são objeto do Capítulo 4. Apresentam-se as estratégias de análises estruturais, os programas computacionais utilizados e os resultados da análise. Discutem-se também as bases para dimensionamento, os programas computacionais utilizados e os resultados do dimensionamento.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos e uma discussão sobre os mesmos, tendo como base principal as taxas de consumo de aço e os deslocamentos nodais dos diversos modelos analisados no estudo paramétrico.

Finalmente, no Capítulo 6 apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.



# 2

## Revisão Bibliográfica

O projeto de um galpão em estrutura metálica envolve a definição do sistema estrutural, a avaliação das de ações atuantes, a análise estrutural e o dimensionamento dos elementos estruturais.

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre diversos aspectos envolvidos no projeto de galpões de uso geral compostos por perfis de aço formados a frio. Apresenta-se também uma revisão sobre formas de avaliação de soluções estruturais para galpões em estrutura metálica.

### 2.1. Galpões de Uso Geral

De acordo com o Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas (MIC/STI, 1986), os galpões são, geralmente, construções de um pavimento, com a finalidade de fechar e cobrir grandes áreas, protegendo as instalações, os produtos armazenados ou, simplesmente, fornecendo abrigo em relação às condições climáticas

externas. Destinam-se a diversos fins, como fábricas, almoxarifado, feiras, estádios, hangares, etc.

Na maioria das vezes os galpões de uso geral se estendem por grandes áreas em um único pavimento e são constituídos por pórticos planos regularmente espaçados com cobertura na parte superior e fechamento lateral.

Segundo SCHULTE et al. (1978), os galpões possuem a função de transmitir aos pilares, através das tesouras, as ações resultantes do peso próprio e as provenientes da cobertura.

De acordo com FISHER (1993), a maioria dos edifícios industriais tem como finalidade abrigar ou encobrir uma área para estocagem ou produção. O projeto de um edifício industrial pode parecer um campo de atuação exclusivo do engenheiro estrutural; no entanto, a maioria dos edifícios industriais requer muito mais do que projetos estruturais.

Os galpões podem ser fabricados e montados no local da obra ou fabricados em partes no pátio de uma empresa especializada e, posteriormente, levados para o local onde serão montados.

Uma das características destes galpões é a possibilidade de se industrializar o processo de fabricação. A industrialização torna-se viável desde que exista uma padronização de elementos estruturais que seja compatível com os equipamentos disponíveis na empresa fabricante, o que garantirá rapidez, segurança e economia no processo de fabricação.

Como consequência mais específica do reduzido peso própria das estruturas de aço verifica-se, frequentemente, uma inversão de sinais nas solicitações que ocorrem nos elementos estruturais de uma estrutura de aço. Observa-se que o banzo inferior de uma cobertura treliçada, normalmente tracionado, solicitado à compressão fica sujeito a fenômenos de instabilidade. Caso a esbeltez do banzo inferior seja grande, uma pequena solicitação de compressão poderá tornar o fator condicionante do dimensionamento, até mesmo anulando os efeitos da tração.

## 2.2. Ação do Vento em Edificações

A ação do vento poderá provocar ruína total ou parcial de edificações, principalmente, as estruturadas em aço. O vento não era problema em construções baixas, de paredes espessas, mas passou a ser, e em medida crescente, quando as construções foram tornando-se mais esbeltas, e as estruturas usadas constituídas com menos quantidade de material.

A maioria dos acidentes ocorre em construções leves, principalmente de grandes vãos livres, tais como hangares, pavilhões de feira, cobertura de estádios, etc. Na Figura 2.1 é apresentado um exemplo de acidente causado pela ação do vento. Além de prejuízos materiais, comprometem também a integridade humana.



Figura 2.1 - Posto de combustível em Contagem - MG destruído pela ação do vento (Fonte: [www.globo.com.br](http://www.globo.com.br) - 2007).

Os acidentes ocorrem em construções mal executadas como, por exemplo, telhas leves mal ancoradas, paredes mal construídas, estruturas sem contraventamentos, concreto de má qualidade, tesouras de telhados mal dimensionadas e/ou ancoradas, etc. Se as normas correspondentes à ação do vento e ao dimensionamento estrutural forem rigorosamente seguidas, tem-se menor probabilidade de ocorrer acidentes devido à ação do vento (BLESSMANN, 1986).

A velocidade do vento é responsável por vários efeitos danosos em edificações. Os ventos de maiores intensidades são de interesse na engenharia estrutural. Assim como a rugosidade do terreno, os obstáculos naturais e artificiais serão objetos de considerações pra sua determinação.

## **2.3. Sistemas Estruturais de Galpões de Uso Geral**

Dada às amplas possibilidades de concepção, e das finalidades a que se destinam, são muitos os sistemas estruturais que podem ser empregados no projeto de galpões de uso geral. Independentemente do tipo de galpão, podem ser feitas algumas considerações sobre os sistemas estruturais que compõem estes galpões.

Dentre os diversos sistemas estruturais aplicáveis aos galpões de uso geral, o sistema formado por pórticos planos transversais, formando a estrutura principal, estabilizados longitudinalmente por estruturas secundárias, é um dos mais comuns e difundidos.

A seguir apresenta-se uma discussão sobre os aspectos mais relevantes da concepção de pórticos planos transversais e das estruturas estabilizadas longitudinalmente.

### **2.3.1. Pórticos Planos**

Existem diversas alternativas para composição de pórticos planos transversais destinados aos galpões de uso geral.

Um pórtico plano típico de um galpão é formado por duas colunas e uma viga de cobertura. A diferenciação entre as soluções estruturais se dá, basicamente, pela variação de alternativas para composição das colunas e vigas que formam esta estrutura principal.

Em função da combinação das soluções entre colunas e vigas de cobertura, pode-se conseguir uma maior ou menor transmissão de momentos fletores, o que determina o grau de continuidade entre estes elementos estruturais.

Outro aspecto importante na concepção dos pórticos transversais é a definição do tipo de vinculação das colunas com a fundação. O tipo de vínculo das colunas com a base altera os esforços transmitidos para as fundações e influencia, de maneira importante, o deslocamento horizontal da estrutura.

Ao se trabalhar com um pórtico engastado nas bases é possível obter uma melhor redistribuição de esforços e um dimensionamento mais econômico, com uma maior

facilidade de montagem (BELLEI, 2006). Isso só é possível se o terreno de fundação for capaz de suportar os esforços adicionais de momento fletor transmitidos pelo pórtico.

Quando se trata de pórticos rotulados nas bases obtêm-se fundações mais econômicas se comparadas aos pórticos engastados na base, favorecendo a implantação dessas estruturas em terrenos de baixa capacidade de suporte (BELLEI, 2006). Por outro lado, os esforços na estrutura são maiores quando comparados com os pórticos de bases engastadas. Neste caso os deslocamentos horizontais são maiores que aqueles observados com pórticos de bases engastadas.

Por outro lado, a distância entre pórticos transversais é outro parâmetro importante na definição dos sistemas estruturais. Esta distância é condicionada pela finalidade do galpão. Caso não haja restrições, escolhe-se o espaçamento que conduz à maior economia no custo global de pórticos transversais, terças e travessas de tapamento.

Elementos secundários são beneficiados quando o espaçamento entre pórticos transversais são menores. Neste caso, as ações em cada pórtico são reduzidas, mas ocorre um aumento no número de pórticos e, conseqüentemente, no número de bases. Por outro lado, espaçamentos maiores aumentam os elementos secundários da cobertura, mas reduzem o número de pórticos e de bases.

## **A - Pórticos de Alma Cheia**

Na Figura 2.2 apresenta-se um esquema típico de um pórtico de alma cheia que é formado por colunas e vigas de cobertura em alma cheia.

As principais vantagens são: “limpeza” da solução estrutural, pequeno número de peças de travamento, baixo custo de limpeza e pintura, facilidade de fabricação e transporte e maior rigidez no processo de montagem quando comparado às soluções treliçadas. Normalmente, os pórticos de alma cheia são economicamente competitivos para vãos livres da ordem de 20 metros.

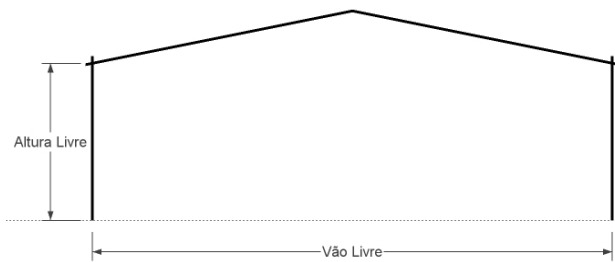


Figura 2.2 - Pórtico de alma cheia.

## B - Pórticos Treliçados

Os pórticos treliçados são formados por colunas e viga de cobertura treliçada. Na Figura 2.3 estão apresentados alguns tipos mais comuns de vigas treliçadas de cobertura. A forma da treliça e a disposição das peças são escolhidas em função de requisitos estruturais, funcionais, estéticos e econômicos, mas dependem muito da capacidade de julgamento do projetista, pois não há apenas um determinado tipo de treliça mais adequado para cada condição específica. Na escolha de um tipo de viga treliçada pode-se levar em conta, por exemplo, a possibilidade da utilização dos vazios para passagem de utilidades (tubos, dutos, equipamentos, etc.).

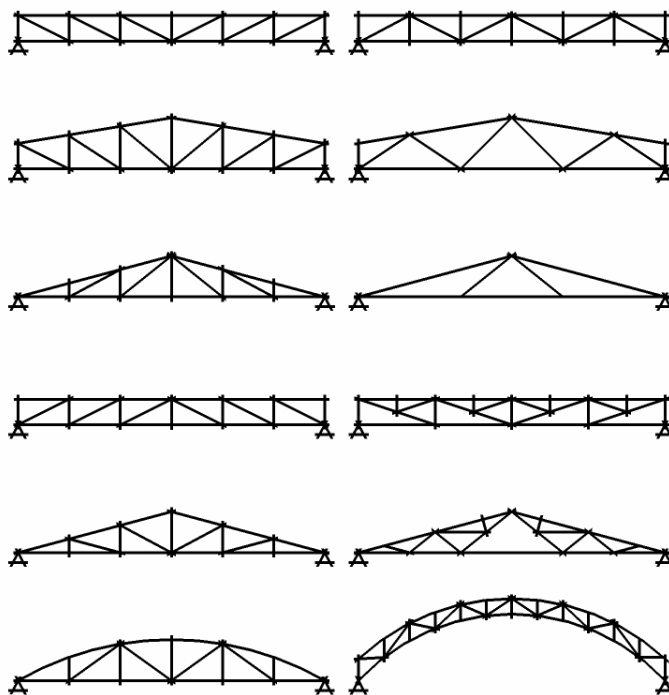


Figura 2.3 - Vigas treliçadas de cobertura.

A altura da viga treliçada de cobertura varia em função do vão e das condições de vínculo nas extremidades, embora, às vezes, possa ser condicionada por aspectos funcionais, estéticos ou por problemas de transporte.

As diagonais e montantes normalmente são posicionados de modo que as cargas transmitidas pelas terças e pelos dispositivos de apoio de equipamentos e utilidades estejam aplicadas apenas nos nós das treliças e que todas as peças sejam submetidas apenas a esforços normais.

Normalmente, os pórticos treliçados são economicamente competitivos para grandes vãos livres e ações verticais moderadas, principalmente devido à eficiência do sistema provocado pela não existência de uma alma.

### **2.3.2. Vinculação das Bases de Coluna**

As bases das colunas que compõem os pórticos transversais podem apresentar diferentes tipos de vínculos. Normalmente, os tipos de bases mais utilizados são:

#### **A - Bases Rotuladas**

As bases rotuladas são responsáveis pela transmissão de esforços normais e esforços cortantes da estrutura para a fundação. As mais simples são formadas por uma placa soldada no pé da coluna com dois chumbadores no centro, o mais próximo do seu eixo. Essas bases são mais econômicas para as fundações e mais indicadas nos casos de locais com solos de baixa capacidade de suporte.

#### **B - Bases Engastadas**

As bases engastadas são responsáveis pela transmissão de esforços normais, esforços cortantes e momentos fletores da estrutura para a fundação. Propiciam estruturas mais econômicas devido a melhor distribuição de esforços, mas conduzem a fundações mais caras que as rotuladas. As bases engastadas mais simples e econômicas são aquelas em que a coluna é soldada à placa de base, com os chumbadores afastados da linha do centro, formando um braço de alavanca.

Em grande parte dos galpões de uso geral não é comum considerar momentos transmitidos às bases porque, se por um lado isto permite reduzir o peso da estrutura,

por outro, faz aumentar o custo da fundação. Como boa parte dos terrenos onde são edificadas galpões é de baixa capacidade de suporte, é usual transmitir apenas esforços normais e esforços cortantes. Dessa forma no projeto usual de galpões de uso geral admite-se que as colunas são rotuladas na base, o que redundaria em colunas mais robustas e menos esforços na fundação. Ao se optar pelo engastamento com o objetivo de minimizar o peso da estrutura metálica, as fundações podem ter seu custo aumentado devido à necessidade de se absorver os momentos fletores.

A vinculação das colunas com a fundação influencia também o deslocamento horizontal da estrutura, em que os limites são definidos pelas normas técnicas. Bases engastadas levam à obtenção de menores deslocamentos horizontais no topo das colunas do que bases rotuladas.

Quando se trata de galpões simples (altura de coluna até aproximadamente 8 metros e sem ponte rolante), algumas empresas empregam fundações rotuladas com o intuito de obter fundações mais econômicas para o empreendimento, mas para garantir o baixo consumo de aço utilizam pórticos com seções transversais variáveis (Figura 2.4). A geometria do pórtico principal baseia-se na distribuição do momento fletor, e, portanto tem-se conseguido baixas taxas de consumo de aço. Desta forma, consegue-se uma grande economia global do empreendimento para galpões de uso geral.



Figura 2.4 - Vista geral de um galpão empregando perfis de seções variáveis.



### 2.3.3. Estruturas de Estabilização Longitudinal

A estabilidade espacial de uma estrutura de um galpão de uso geral, ou seja, a estabilidade fora do plano da estrutura principal (pórtico transversal) é garantida com a colocação de estruturas de estabilização na direção longitudinal. Para promover esta estabilização é necessário dispor de contraventamentos horizontais (no plano da cobertura) e verticais (nas laterais do edifício) (Figura 2.5).

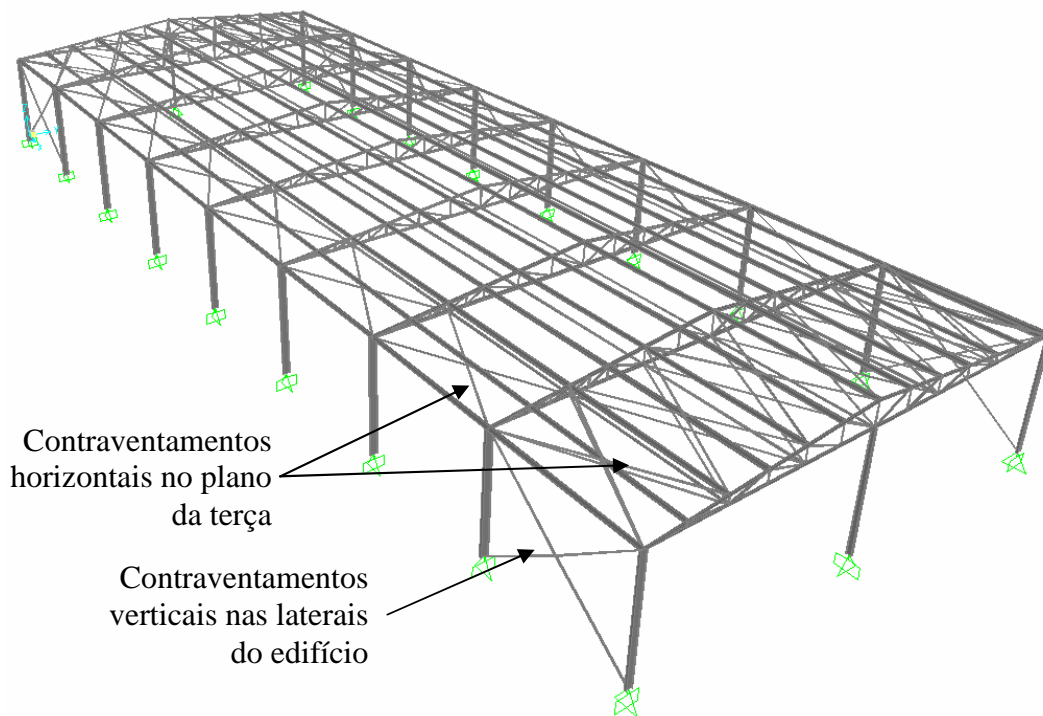


Figura 2.5 - Sistemas de estabilização longitudinal de um galpão de uso geral.

O pórtico transversal transmite à fundação as ações do vento incidente nas fachadas laterais e outras forças horizontais transversais. Os contraventamentos horizontais e verticais transmitem à fundação as forças horizontais longitudinais, resultantes da ação do vento e de pontes rolantes. As terças formam uma grande treliça horizontal na cobertura, contribuindo para o apoio das telhas de cobertura para o sistema de estabilização longitudinal.

O sistema de contraventamento horizontal situado no plano da cobertura (Figura 2.5) torna indeslocáveis os pontos de apoio das terças nos pórticos transversais, reduzindo o comprimento de flambagem do banzo superior da viga de cobertura.

Com o objetivo de reduzir o comprimento de flambagem dos elementos do banzo inferior da viga de cobertura, pode-se utilizar um sistema de contraventamento adicional disposto no plano do banzo inferior ou utilizar mãos-francesas dispostas a partir das terças.

Os contraventamentos horizontais em “X” são os mais comuns devido aos aspectos econômicos e construtivos. Os contraventamentos verticais em “X” também são muito utilizados por motivos semelhantes aos citados anteriormente, mas existem diversas outras possibilidades para composição destes sistemas de estabilização.

## **2.4. Considerações Sobre o Uso e Dimensionamento de Perfis Formados a Frio**

### **2.4.1. O Uso de Perfis Formados a Frio**

Os perfis formados a frio (PFF) são obtidos por meio de dobramento, em temperatura ambiente, de chapas de aço por dois processos distintos: descontínuo, com a utilização de prensa dobradeira ou viradeira, ou contínua, por meio de perfiladeira.

O emprego desses perfis no Brasil iniciou-se por volta da década de 60 quando algumas empresas buscou equipamentos para a realização de processos de dobramentos a frio (Malite et al, 1998), mas a maior divulgação do uso desses perfis se deu a partir da publicação da norma NBR 14762:2001 (ABNT, 2001).

O uso de perfis formados a frio gera estruturas mais leves se comparadas com outras estruturas. Normalmente apresentam uma maior relação inércia/peso que os perfis laminados, o que conseqüentemente resulta em menor consumo de material e, portanto, reduz o custo final de uma edificação.

CARVALHO et alli (2006) aponta algumas vantagens do uso de perfis formados a frio (PFF) quando comparado aos perfis laminados:

- facilidade de adequação à forma e às dimensões solicitadas. Com os perfis formados a frio pode-se criar formas especiais de perfis para atender uma solicitação específica e também pode-se otimizar dimensões de acordo com o valor da resistência compatível com os valores de solicitação, o que representa economia;

- facilidade de produção e baixo custo de estoque. A produção dos perfis formados a frio é muito barata se comparada à de um perfil laminado. Além do mais, permite que uma construtora situada longe dos grandes centros, com um pequeno estoque de chapas, com três ou quatro bitolas, possa produzir perfis que atendam, praticamente, todos os casos do dia-a-dia;
- para cargas e vãos médios, uma estrutura com perfis formados a frio resulta em edificações mais leves. A resistência pós-flambagem que é explorada nos perfis formados a frio, conjugada com a forma e as dimensões otimizadas, conduz a estruturas mais leves.

Os perfis formados a frio são cada vez mais viáveis para uso na construção civil, em vista da rapidez e economia exigidas pelo mercado. Esses elementos são bastante utilizados como material de vedação e também como elementos estruturais, algumas aplicações mais comuns são:

- telhas de cobertura e vedação;
- sistemas de armazenagem industriais como prateleiras, *racks* e mezaninos;
- no sistema de cobertura podem ser utilizados como treliças planas ou espaciais e também como terças;
- para as habitações e ampliação de edifícios podem ser empregados nos steel-frames e dry wall;
- na agroindústria são empregados em máquinas, implementos agrícolas e silos;
- de forma geral na construção civil é amplamente empregado nas edificações residenciais, comerciais e industriais, torres de transmissão, reservatórios, pontes, formas para concreto e etc.

## **2.4.2. Algumas Considerações sobre os Métodos de Dimensionamento de Perfis Formados a Frio**

### *2.4.2.1. Comportamento Estrutural de Perfis de Seção Aberta*

Nos perfis formados a frio de seção transversal aberta devem ser considerados os seguintes estados limites últimos: instabilidade local, instabilidade distorcional e instabilidade global.

Segundo PIGNATTA e SILVA (2008), as principais escolas brasileiras definem flambagem como a ocorrência de um ponto de bifurcação no diagrama força x deslocamento de um ponto de uma barra ou chapa comprimida. Em elementos estruturais reais, na presença de imperfeições, não ocorre ponto de bifurcação e, portanto, segundo a definição não ocorre flambagem. Em outras palavras distingue-se a flambagem da flexão composta. Como, geralmente, as imperfeições das estruturas de aço são de pequeno valor, os modos de deformação das barras de aço lembram os modos de flambagem.

A capacidade resistente das barras considerando as instabilidades globais relacionadas com a torção está diretamente associada à rigidez à flexão  $EI_y$ , e à rigidez à torção da seção. A parcela da torção, em especial, depende não apenas do termo correspondente à chamada torção de Saint Venant,  $GI_t$ , mas igualmente da rigidez ao empenamento da seção,  $EC_w$ . Quanto mais finas as paredes da seção do perfil, menores os valores das propriedades  $I_t$  e  $C_w$ . Essas parcelas são proporcionais ao cubo da espessura  $t$  das paredes, sofrendo grandes variações para pequenas alterações no valor da espessura.

Segundo PIGNATTA e SILVA (2008), nas vigas em que os carregamentos não são aplicados no centro de torção da seção, ocorre torção. As teorias de barras de Euler e de Timoshenko, comumente ensinadas nos cursos de Resistência dos Materiais, não abrangem esse comportamento das barras com seção aberta.

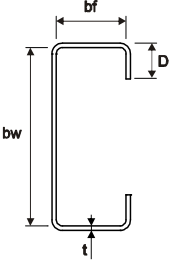
Para que se tenha uma simples noção da possibilidade de ocorrência do modo distorcional, BATISTA (2000) apresenta algumas relações geométricas referentes à seção transversal que exercem grande influência no modo crítico de instabilidade (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 Influência das relações geométricas das seções tipo U enrijecido no modo crítico [BATISTA (2000)]

Quanto menor	Relação geométrica	Quanto maior
Modo Local	$b_f / b_w$	Modo Distorcional
Modo Distorcional	$D / b_w$	Modo Local
Modo Distorcional	$b_w / t$	Modo Local

**Notas:**

$b_f$ : largura nominal de mesa  
 $b_w$ : largura nominal de alma  
 $D$ : largura nominal do enrijecedor de borda  
 $t$ : espessura



#### 2.4.2.2. Método da Largura Efetiva

A norma NBR 14762:2001 (ABNT, 2001) estabelece princípios gerais para o dimensionamento de perfis formados a frio com base no método dos estados limites. São considerados o estado limite último e o estado limite de utilização.

A norma brasileira assume as seções como elementos esbeltos com uma associação de placas. Assim, é utilizado o conceito da largura efetiva para considerar o efeito de flambagem local em cada um dos elementos isolados. Com isso resulta em um perfil com propriedades geométricas efetivas, ou seja, uma área efetiva e um módulo resistente elástico efetivo. A Figura 2.6 mostra exemplos de perfis efetivos, com porções virtuais de áreas retiradas, ou seja, porções que não colaboram com a resistência.

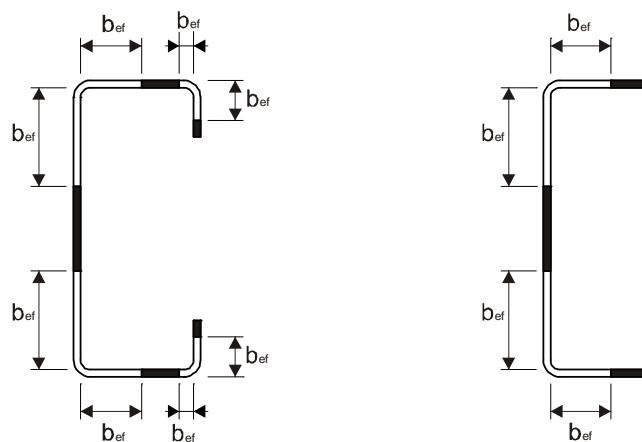


Figura 2.6 - Larguras efetivas de perfis formados a frio.

Os elementos estruturais tratados pela NBR 14762:2001 (ABNT, 2001) são vigas, colunas e vigas-colunas. Todo o formulário referente à flambagem global está baseado nessa classificação. Além disso, a variação de tensões é linear através dos elementos, e os esforços considerados são generalizados: axial, flexão e cortante.

As expressões de Von Kármán nas quais se fundamenta o método das larguras efetivas são:

$$\frac{b_{ef}}{b} = 1 \text{ se } f_{cr} \geq f \quad (2.9)$$

$$\frac{b_{ef}}{b} = \sqrt{\frac{f_{cr}}{f}} \text{ se } f_{cr} < f \quad (2.10)$$

As expressões acima indicam que a relação entre a largura efetiva ( $b_{ef}$ ) e a largura ( $b$ ) do elemento depende da relação entre a tensão crítica de flambagem elástica do elemento ( $f_{cr}$ ) e a tensão aplicada ( $f$ ).

Ao multiplicar o numerador e o denominador do primeiro membro da expressão (2.10) pelo produto  $t \cdot f$  (espessura do elemento ( $t$ ) x tensão aplicada ( $f$ )) e o numerador e o denominador do segundo membro pela área  $A$  do elemento, a expressão fica:

$$\frac{b_{ef}(t \cdot f)}{b(t \cdot f)} = \sqrt{\frac{f_{cr} \cdot A}{f \cdot A}} \quad (2.11)$$

Tomando  $f$  como o valor limite de colapso ( $f = f_{lim}$ ) de todo o perfil, que pode ser a tensão de colapso plástica, a tensão crítica de alguns modos de flambagem elástica ou uma interação entre as duas formas de colapso citado, é possível reescrever a equação (2.11) como sendo:

$$\frac{b_{ef}(t \cdot f_{lim})}{b(t \cdot f_{lim})} = \sqrt{\frac{f_{cr} \cdot A}{f_{lim} \cdot A}} \quad \text{ou} \quad \frac{P_{nl}}{P_{lim}} = \sqrt{\frac{P_{cr}}{P_{lim}}} \quad (2.12)$$

Em que:

$P_{nl}$  - carga de compressão resistente nominal (carga última de colapso) do elemento analisado, considerando que o elemento só é formado pela sua área efetiva ( $b_{ef} \times t$ ) e que a tensão aplicada toma seu valor limite ( $f = f_{lim}$ );

$P_{lim}$  - carga limite obtida considerando que a totalidade da área da seção transversal do elemento ( $b \times t$ ) colabora com a resistência e que a tensão aplicada é a tensão limite ( $f = f_{lim}$ );

$P_{cr}$  - carga de flambagem elástica local do elemento (placa) analisada.

Trabalhos experimentais realizados por Winter (1947, 1968) e aperfeiçoados por outros autores pesquisadores têm permitido modificar a expressão original de Von Kármán, a qual, em função das cargas, é possível escrever como segue:

$$\frac{P_{nl}}{P_{lim}} = \sqrt{\frac{P_{cri}}{P_{lim}}} \left( 1 - 0,22 \sqrt{\frac{P_{cri}}{P_{lim}}} \right) = \sqrt{\frac{P_{cri}}{P_{lim}}} \left( 1 - 0,22 \sqrt{\frac{P_{cri}}{P_{lim}}} \right) \quad (2.13)$$

O método da largura efetiva é amplamente utilizado por outras normas além da norma brasileira, mas CARVALHO et alli (2006) apresenta algumas desvantagens:

- a determinação da seção efetiva é trabalhosa, sobretudo no caso de perfis esbeltos submetidos à flexão. Há necessidade de realizar cálculos iterativos quando a seção é formada por vários elementos e/ou enrijecedores intermediários, embora isso possa ser parcialmente contornado utilizando-se programas computacionais;
- existem dificuldades para incluir o modo de flambagem distorcional no cálculo;
- o aprendizado do método é difícil, em função do grande volume de cálculo algébrico envolvido, prejudicando a compreensão do comportamento estrutural do perfil.

### 2.4.2.3. Método da Resistência Direta (MRD)

O Método da Resistência Direta (MRD) é uma alternativa ao Método da Largura Efetiva na determinação da resistência de PFF, submetidos à compressão ou à flexão.

O método é baseado na determinação da carga de colapso do elemento a partir de uma curva de resistência ajustada experimentalmente, que considera a carga de flambagem elástica do elemento, levando-se em consideração toda seção transversal do perfil e não apenas suas partes isoladamente.

O MRD considera a interação entre as chapas que compõem o perfil, o que não é feito no método das larguras efetivas, já que neste método cada chapa é analisada isoladamente. A análise é feita em relação às propriedades geométricas da seção bruta, não necessitando recalculas as propriedades da seção. Apresenta ainda a grande vantagem de permitir considerar explicitamente o modo distorcional.

Segundo LINDNER (2001, apud PRAVIA, 2005) a análise conjunta dos elementos que compõem o perfil só seria possível para elementos submetidos à compressão e à flexão de forma isolada, mas seria possível para solicitações combinadas empregar as expressões de interação utilizadas tradicionalmente nas normas.

As curvas de resistência ajustadas, que são *a priori* as mesmas utilizadas pelo método das larguras efetivas (ver equação 2.13), são apresentadas a seguir:

$$\frac{P_{nl}}{P_{lim}} = \sqrt{\frac{P_{ert}}{P_{lim}}} \left( 1 - 0,22 \sqrt{\frac{P_{ert}}{P_{lim}}} \right) \quad (2.14)$$

Em que:

$P_{nl}$  - carga de compressão resistente nominal por flambagem local considerando que a forma de colapso é do perfil como um todo e que leva em conta a interação entre a flambagem local e o colapso determinado pela carga  $P_{lim}$ ;

$P_{lim}$  - carga crítica de flambagem elástica global ou de escoamento e que interagem com a flambagem local;

$P_{ert}$  - carga crítica de flambagem elástica local do perfil como um todo.



Para determinação da carga  $P_{cr1}$  podem-se utilizar métodos analíticos ou numéricos.

SCHAFFER (1997, 2001) desenvolveu um programa computacional no método das faixas finitas (CHEUNG, 1988), o CU-FSM - *Finite Strip Method - Cornell University*, para a análise da estabilidade elástica de perfis com seções abertas.

O programa CU-FSM permite fazer a análise da estabilidade elástica de perfis de parede fina submetidos a qualquer distribuição de tensões normais nas extremidades. Permite, ainda, considerar a restrição ao empenamento da seção, bem como restringir os graus de liberdade dos nós extremos. Não é permitido que, ao longo do comprimento, haja aplicação de carregamentos, variação da seção e das condições de contorno (condições intrínsecas ao método das faixas finitas).

Para facilitar a visualização dos resultados o programa apresenta-os num gráfico onde, no eixo das abscissas, coloca-se o comprimento de flambagem e, no eixo das ordenadas, a tensão de flambagem elástica adimensionalizada (comprimento de semi-onda e fator de carga, respectivamente (Figura 2.7).

Com isso, obtém-se a força normal relativa à estabilidade elástica para os modos local, global e distorcional,  $P_{cr1}$ ,  $P_{cre}$  e  $P_{crd}$ , necessários para o cálculo da força normal resistente.

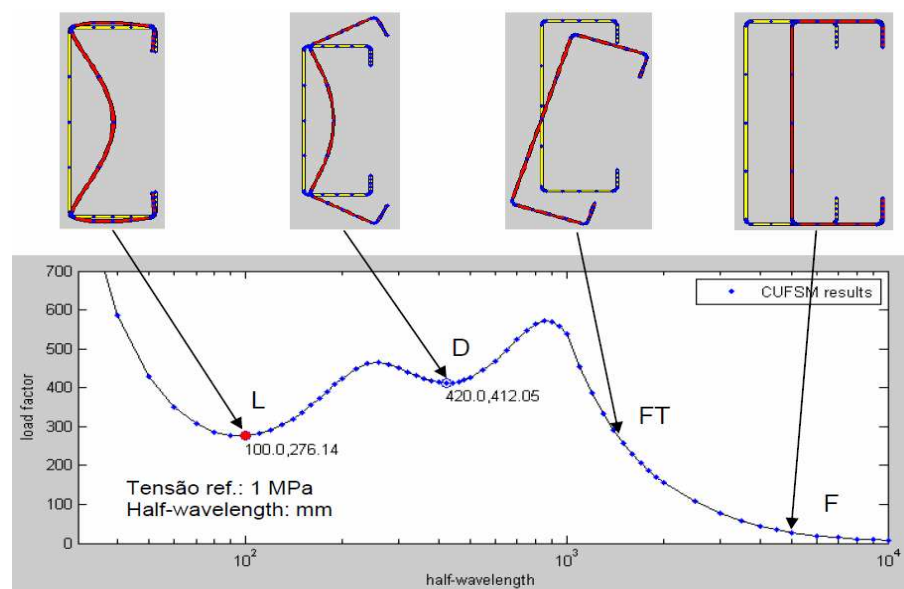


Figura 2.7 - Análise de estabilidade elástica via CUFSM de um perfil U (Fonte: MAIA, 2008).

MAIA (2008) utilizou a Figura 2.7 como exemplo para ilustrar a presença de um mínimo local ( $\sigma_{cr1} = 276,14$  MPa e  $\lambda_1 = 100$ ) e um mínimo distorcional ( $\sigma_{crd} = 412,05$  MPa e  $\lambda_d = 420$ ). Nota-se também a presença dos modos globais de flexo-torção e de flexão.

MAIA (2008) também ilustra que a cantoneira simples não apresenta ponto de mínimo definido, nota-se apenas dois modos: um coincidente local-chapa/global de flexo-torção e um global de flexão, conforme ilustra o exemplo da Figura 2.8 referente a uma cantoneira.

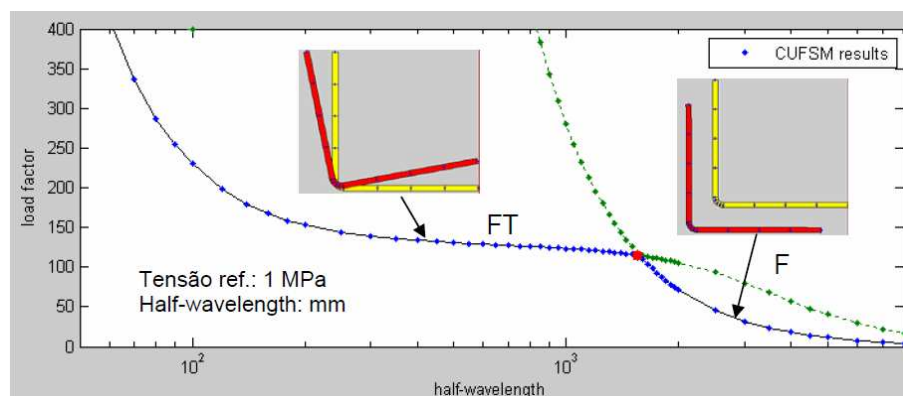


Figura 2.8 - Análise de estabilidade elástica via CUFISM de um perfil L (Fonte: MAIA, 2008).

Já na Figura 2.9 MAIA (2008) apresenta um outro exemplo, só que de uma cantoneira enrijecida tipo Le, onde pode-se perceber um mínimo local ( $\sigma_{cr1} = 977.51$  MPa e  $\lambda_1 = 61$ ). Nota-se também a presença dos modos globais de flexo-torção e de flexão.

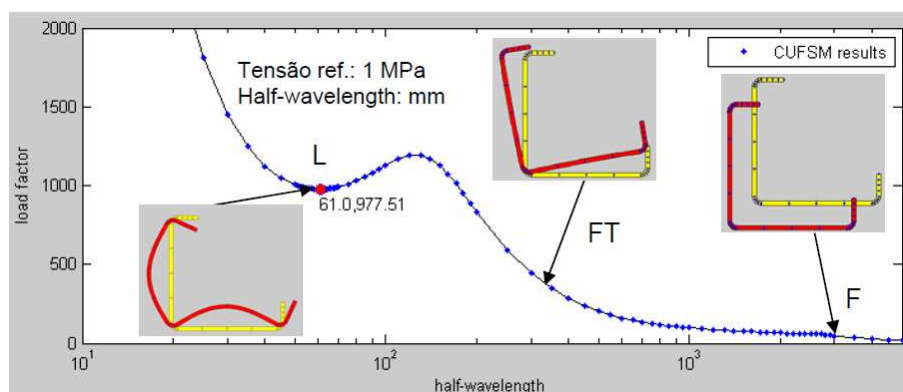


Figura 2.9 - Análise de estabilidade elástica via CUFISM de um perfil Le (Fonte: MAIA, 2008).

A força normal resistente para barras submetidas à compressão é o mínimo entre os valores calculados para os modos global, local e distorcional  $P_{lim}$ ,  $P_{nl}$  e  $P_{nd}$ , por meio de curvas de resistência determinadas para cada modo.

**Observações:**

- a) Para a flambagem global, a força normal resistente de uma barra submetida à compressão centrada é calculada pela expressão abaixo:

$$P_{lim} = \begin{cases} (0,658^{\lambda_o^2}) Af_y & \text{para } \lambda_o \leq 1,1 \\ \left(\frac{0,877}{\lambda_o^2}\right) Af_y & \text{para } \lambda_o > 1,1 \end{cases} \quad (2.15)$$

Em que:

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{Af}{P_{cre}}}$$

$P_{cre}$  - é o menor valor da força normal crítica elástica, considerando os modos globais aplicáveis (flexão, torção e flexo-torção).

- b) Para a flambagem local, do perfil como um todo, a força normal resistente de uma barra submetida à compressão centrada, para instabilidade local é calculada pela expressão abaixo:

$$P_{nl} = \begin{cases} P_{nl} = P_{lim} & \text{para } \lambda_1 \leq 0,771 \\ \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{lim}}\right)^{0,4}\right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{lim}}\right)^{0,4} P_{lim} & \text{para } \lambda_1 > 0,771 \end{cases} \quad (2.16)$$

c) Para a determinação da carga de colapso por flambagem distorcional é calculada de acordo com a expressão abaixo:

$$P_{nd} = \begin{cases} Af_y & \text{para } \lambda_d \leq 0,561 \\ \left[ 1 - 0,25 \left( \frac{P_{crd}}{Af_y} \right)^{0,6} \right] \left( \frac{P_{crd}}{Af_y} \right)^{0,6} Af_y & \text{para } \lambda_d > 0,56 \end{cases} \quad (2.17)$$

Em que:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{Af_y}{P_{crd}}}$$

$f_y$  - tensão de escoamento do aço;

$A$  - área bruta da seção transversal da barra;

$P_{crd}$  - carga crítica de flambagem elástica distorcional do perfil como um todo.

É importante notar que o Método da Resistência Direta considera em seu procedimento de cálculo a interação do modo local com o modo global, este mesmo fato não ocorre no modo distorcional.

Conforme SCHAFER (2002, apud PRAVIA, 2005), o método da resistência direta apresenta várias vantagens, como:

- no cálculo da resistência não há necessidade da determinação de propriedades geométricas efetivas ( $A_{ef}$  e  $W_{ef}$ );
- os cálculos não precisam ser feitos para elementos individuais (analogia de placas);
- não há cálculo iterativo;
- no cálculo da resistência se utilizam as propriedades geométricas da seção bruta;
- a interação dos elementos que compõem a seção (interação da mesa com a alma) quando da ocorrência da flambagem local é levada em conta, sendo

que as condições de compatibilidade e equilíbrio entre os elementos são automaticamente garantidas;

- a flambagem distorcional é explicitamente tratada no projeto como um modo de colapso único;
- proporciona um procedimento de projeto mais abrangente e flexível;
- é aplicável a um grupo maior de geometria de seções transversais, nas mais variadas formas, onde os procedimentos das normas vigentes não são aplicáveis;
- permite e estimula a otimização de seções transversais;
- métodos numéricos e análises racionais são trazidos para o dia-a-dia do projetista;
- integra os métodos numéricos disponíveis e estabelecidos em um procedimento de projeto único.

O Método da Resistência Direta é utilizado pelas normas australiana e neo-zelandesa, desde 1996, para a determinação da resistência à flambagem distorcional de barras fletidas e comprimidas.

A partir de janeiro de 2004, o American Iron and Steel Institute (AISI) também passou a adotar o MRD em um dos seus manuais para o dimensionamento de perfis formados a frio como alternativas ao Método da Largura Efetiva.

PRAVIA (2005) compara os métodos de dimensionamento em uma treliça de banzos paralelos, esquematizado na Figura 2.10, e que tem como seção transversal o perfil U. Como pode-se observar na mesma figura, foi considerado que o mesmo esteja contido lateralmente a cada dois nós.

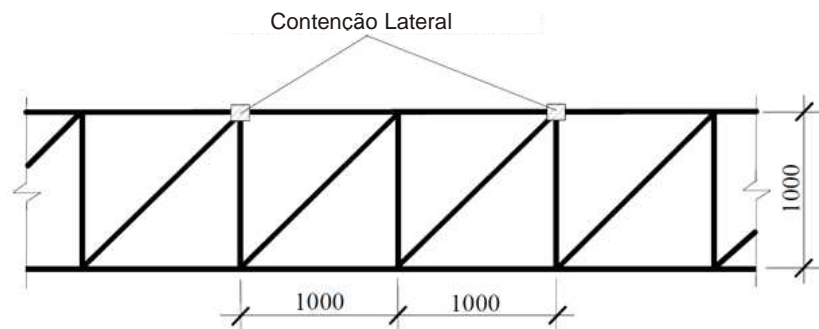


Figura 2.10 - Esquema unifilar da treliça em mm (Fonte: PRAVIA, 2005).

O perfil considerado no dimensionamento foi o perfil U 100x50x2. Na Tabela 2.2 estão os resultados das forças normais de compressão resistente de cálculo ( $N_{c,Rd}$ ) pelo método da resistência direta e pelo método das larguras efetivas utilizado pela NBR 14762:2001 (ABNT, 2001).

Tabela 2.2 - Comparação entre os métodos de dimensionamento de perfis formados a frio submetidos à compressão (Fonte: PRAVIA, 2005)

	$N_{c,Rd}$ (kN)	$A_{ef}$ (cm <sup>2</sup> )
Método da Resistência Direta	53,16	3,66
Método das Larguras Efetivas	49,80	3,39
Diferença (%)	- 6,32	- 7,38

GRIGOLETTI (2008) também comparou os resultados do dimensionamento dos perfis formados a frio pelo método da largura efetiva e pelo método da resistência direta para uma viga simplesmente apoiada submetida à flexão (Figura 2.11).

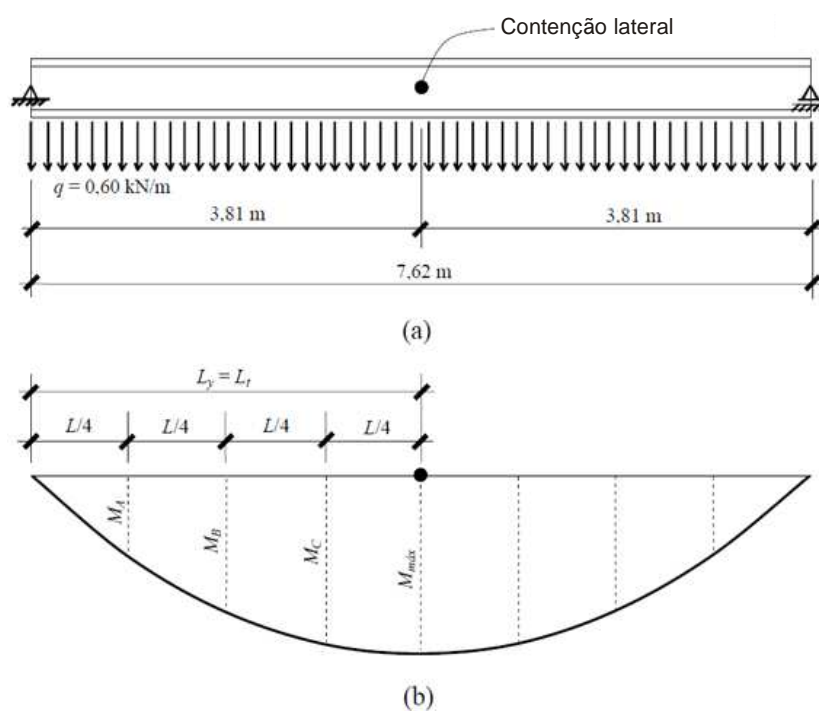


Figura 2.11 - (a) Viga simplesmente apoiada com carregamento uniformemente distribuído e (b) diagrama do momento fletor (Fonte: GRIGOLETTI, 2008).

Foi considerado no dimensionamento o perfil Ue 203x70x1,52. Na Tabela 2.3 está apresentado a comparação entre os valores obtidos pelo método das larguras efetivas empregado pela NBR14762:2001 (ABNT, 2001) com os valores obtidos utilizando-se o método da resistência direta.

Tabela 2.3 - Comparação entre os métodos de dimensionamento de perfis formados a frio submetidos à flexão (Fonte: GRIGOLETTI, 2008)

	$M_{Rd}$ (kN.m)	$W_{ef}$ (cm <sup>3</sup> )
Método da Resistência Direta	934,89**	27,06**
Método das Larguras Efetivas	940,32	27,22
Diferença (%)	- 0,58	- 0,59

\*\* valores obtidos pelo método da resistência direta desconsiderando a flambagem distorcional para efeito de comparação com os valores encontrados pela NBR14762:2001 (ABNT, 2001), visto que este modo de flambagem também foi desconsiderado quando da utilização desta norma.

## 2.5. Parâmetros para Avaliação do Sistema Estrutural

A avaliação do desempenho de um sistema estrutural pode ser feita em função de diferentes parâmetros. A taxa de consumo de aço é o parâmetro mais utilizado para avaliar o desempenho econômico de um sistema estrutural.

O Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas (MIC/STI, 1986) apresenta alguns gráficos que permitem estimar a taxa de consumo de aço, incluindo todos os elementos que compõem a estrutura metálica do galpão. Na Figura 2.12, apresenta-se um gráfico para determinação da taxa de consumo de aço ( $K_2$ ) em kg/m<sup>2</sup> de área coberta, em função do vão “s” em metro, para galpões leves comuns, com ou sem pontes rolantes, com capacidade inferior a 50 kN.

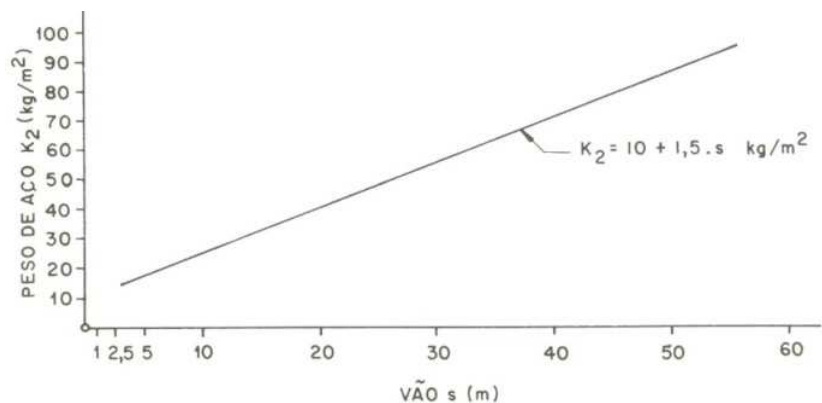


Figura 2.12 - Taxa de consumo de aço para galpão leves comum (Fonte: MIC/STI, 1986).

Na Figura 2.13 é apresentado um gráfico que permite estimar a taxa de consumo de aço, considerando todos os elementos que compõem a estrutura, abrangendo galpões comuns, excluídos os tipos “shed”, dotados de pontes rolantes com capacidade variáveis de 50 a 600 kN. A taxa de consumo de aço (K<sub>3</sub>) em kg/m² de área coberta, é dada em função do vão “s” em metro (MIC/STI, 1986).

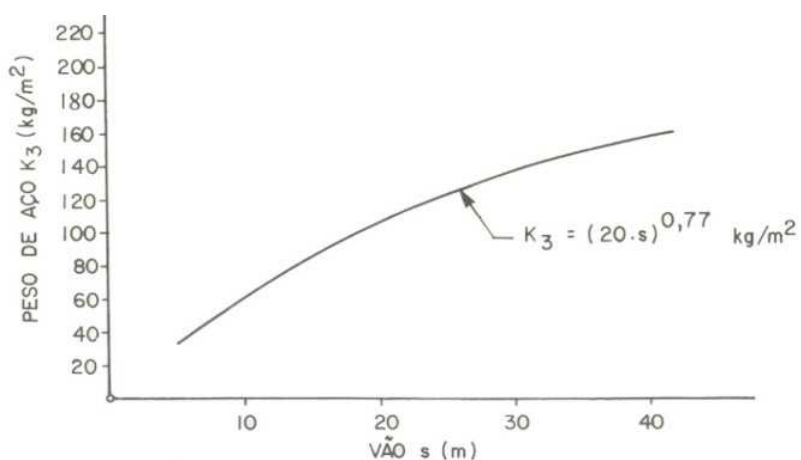


Figura 2.13 - Taxa de consumo de aço para galpões médios (Fonte: MIC/STI, 1986).

Os valores do K<sub>2</sub> e K<sub>3</sub> mostrados nas Figuras 2.12 e 2.13 são estimados com base em estruturas construídas na Europa no período de 1950 a 1965, onde em 1960 foi introduzido o aço ASTM-A36.

D'ALAMBERT (2004) desenvolveu um estudo sobre galpões formados por pórticos compostos por perfis laminados de alma cheia. O estudo abrange uma variação de vãos livres de 15 a 45 metros, alturas de colunas de 6 a 12 metros, distâncias entre



pórticos de 6 a 12 metros e diferentes estágios de ação do vento. Os resultados do trabalho são apresentados na forma de tabelas e ábacos que permitem o pré-dimensionamento dos pórticos transversais de alma cheia, assim como permite estimar a taxa de consumo de aço.

De acordo com os estudos realizados por D'ALAMBERT (2004), os parâmetros Q4, Q5 e Q6 indicam os estágios de ações considerados. Cada estágio corresponde a uma velocidade de vento associada à distância entre pórticos transversais, conforme indicado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Composição dos estágios de ações (Fonte: D'ALAMBERT, 2004)

<b>Composição dos Estágios de Ação</b>		
<b>Estágio de Ações</b>	<b>Velocidade do vento</b>	<b>Distância entre os Pórticos B</b>
	(m/seg)	(m)
Q2	45	9
	40	12
Q3	40	9
	35	12
Q4	45	6
	35	9
	30	12
Q5	40	6
	35	6
	30	9
Q6	30	6

Nas Figuras 2.14 e 2.15 são apresentados os gráficos para determinação da taxa de consumo de aço para um galpão em pórtico de alma cheia, com pé direito (H) de 6 m e distância entre pórticos (B) de 6 e 9 m.

As taxas de consumo de aço apresentadas por D'ALAMBERT (2004) consideram os seguintes elementos:

- peso dos pórticos;
- peso das placas de base e das chapas de ligação;
- travamentos necessários para a estabilização dos pórticos (verticais e horizontais).

O peso total apresentado não inclui o peso dos elementos de fechamento lateral, usualmente estimado entre 6,00 e 12,00 kg/m<sup>2</sup> dependendo das particularidades de cada projeto.

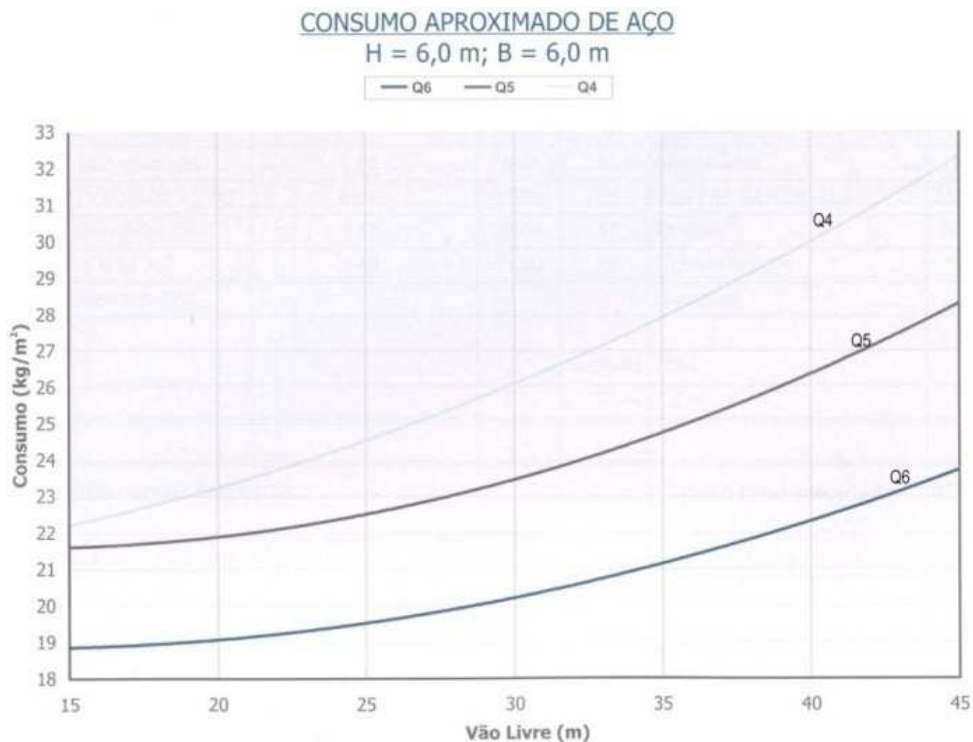


Figura 2.14 - Consumo de aço, para galpão em pórtico de perfis em alma cheia com pé direito (H) de 6 m e distância entre pórticos (B) de 6 m (Fonte: D'ALAMBERT, 2004).

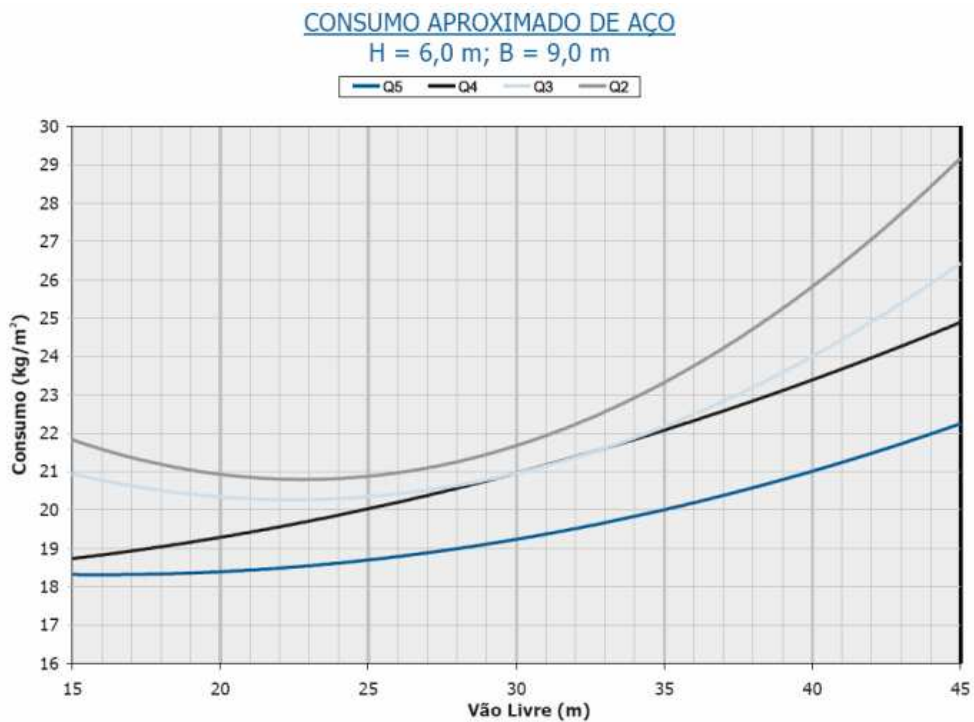


Figura 2.15 - Consumo de aço, para galpão em pórtico de perfis em alma cheia com pé direito (H) de 6 m e distância entre pórticos (B) de 9 m (Fonte: D'ALAMBERT, 2004).

CHAVES (2007) apresenta um estudo paramétrico para avaliação do desempenho de soluções estruturais para galpões industriais leves. Neste estudo são avaliadas cinco tipologias de galpões com vãos livres de 16, 20, 24, 28 e 32 metros, altura das colunas de 6 metros e distância entre pórticos de 6 metros, para uma região com velocidade básica do vento  $V_o = 30\text{m/s}$ . As tipologias dos pórticos transversais apresentadas são:

- AC - Pórtico de alma cheia;
- TA - Pórtico com treliça em arco;
- BP - Pórtico com treliça de banzos paralelos;
- TP - Pórtico com treliça trapezoidal;
- TT - Pórtico com treliça triangular.

Para comparação do desempenho das tipologias do pórticos transversais, CHAVES (2007) apresenta uma avaliação da taxa de consumo de aço e dos deslocamentos verticais e horizontais. Neste estudo são adotadas duas opções de composição dos banzos superiores e inferiores das treliças (perfis tipo T eletro-soldado (TE) e cantoneira dupla (2L)). Para as vigas de cobertura do pórtico de alma cheia foi avaliada uma única solução em perfil tipo I eletro-soldado.

Na Figura 2.16 são apresentados os resultados da taxa de consumo aço para as diversas tipologias de pórticos transversais consideradas, em função do vão livre. As taxas de consumo de aço são apresentadas para os dois tipos de composição das vigas treliçadas de cobertura (TE e 2L).

As taxas de consumo de aço apresentadas por CHAVES (2007) consideram somente o peso dos pórticos.

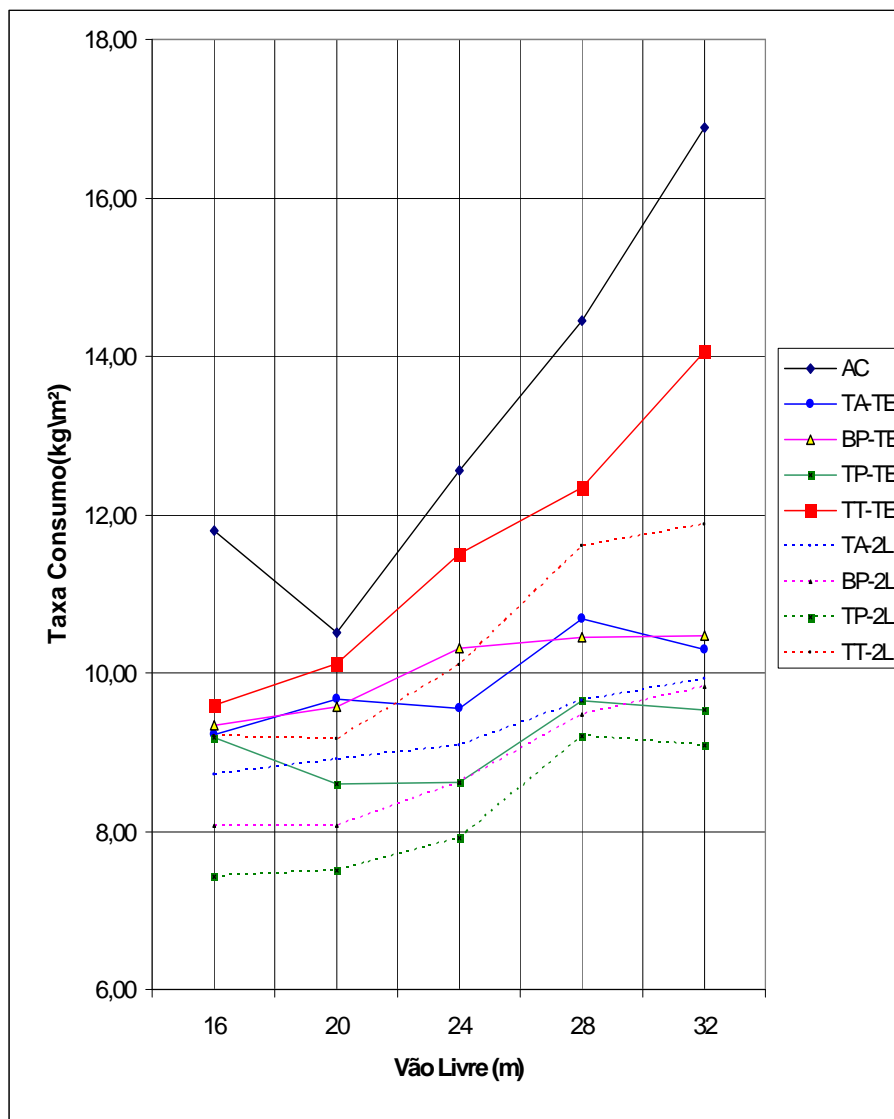


Figura 2.16 - Taxa de consumo aço para as tipologias de pórticos transversais, em função do vão livre e variação da composição das vigas treliçadas (Fonte: CHAVES, 2007).

De acordo com a Figura 2.16, é possível observar que as taxas de consumo de aço dos pórticos treliçados compostos por cantoneira dupla nos banzos são sempre inferiores aos compostos por perfis T eletro-soldado. Este fato se justifica pela pequena variedade de bitolas de perfis T eletro-soldado no mercado, sendo que para cada variação de bitola deste perfil tem-se em média quatro possibilidades de bitola do perfil tipo cantoneira.

Os pórticos de alma cheia (AC) são os que apresentam maior taxa de consumo de aço, seguido pelo pórtico de treliça triangular (TT) (Figura 2.16). As taxas de consumo de aço das tipologias de treliça em arco (TA), de banzos paralelos (BP) e treliça

trapezoidal (TP) apresentam pouca variação entre si, sendo que o pórtico com treliça trapezoidal (TP) apresenta um ligeiro destaque com relação aos demais.

Todas as tipologias apresentam uma tendência de aumento da taxa de consumo de aço na medida em que se aumenta o vão livre, mas esta tendência foi mais expressiva nos pórticos de alma cheia (AC), seguidas pelo pórtico com treliça triangular (TT).

Nas Figuras 2.17 e 2.18 são apresentados os resultados dos deslocamentos verticais para todas as tipologias estruturais em função do vão livre. Na Figura 2.17 apresentam-se as curvas para os pórticos treliçados com banzos formados por perfil T eletro-soldado, enquanto que na Figura 2.18 apresentam-se as curvas para os pórticos treliçados com banzos formados por cantoneira dupla (2L).

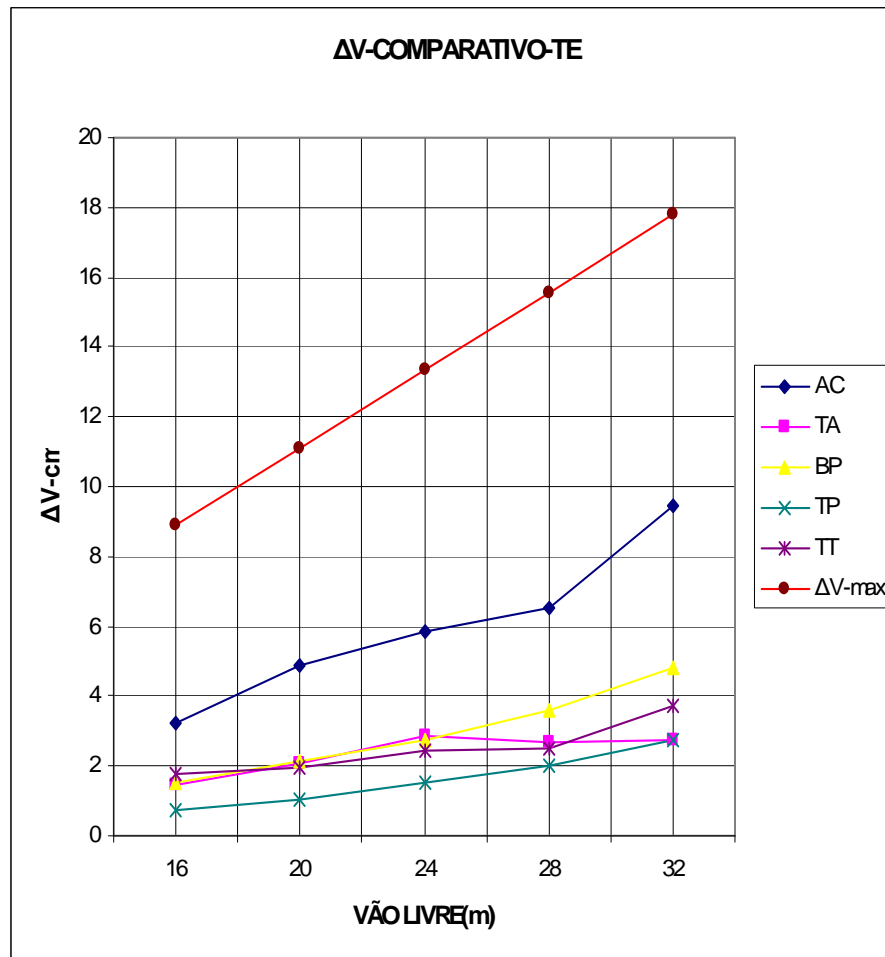


Figura 2.17 - Deslocamentos verticais para as diversas tipologias dos pórticos treliçados formados por perfil T eletro-soldado (Fonte: CHAVES, 2007).

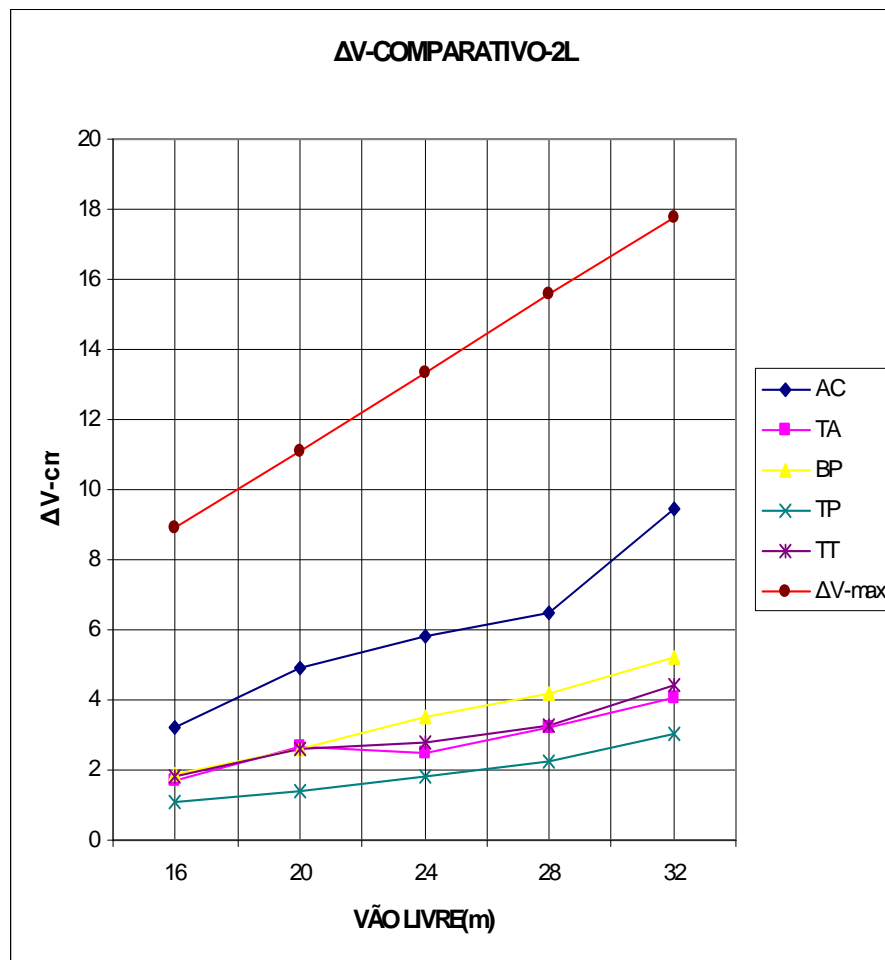


Figura 2.18 - Deslocamentos verticais para as diversas tipologias dos pórticos treliçados formados por cantoneira dupla (Fonte: CHAVES, 2007).

Nas Figuras 2.17 e 2.18 pode-se observar que os deslocamentos dos modelos formados por pórticos de alma cheia (AC) são muito superiores àqueles verificados nos pórticos treliçados. Isto se deve à menor inércia das vigas de cobertura, quando comparada aos pórticos treliçados.

Dentre os pórticos treliçados, o pórtico treliça trapezoidal (TP) é o que apresentou menor deslocamento vertical. Isto se deve à grande inércia da viga treliçada trapezoidal e da ligação viga/coluna. Pode-se interpretar o pórtico de treliça trapezoidal (TP) como sendo uma viga equivalente com seção variável e ligação semi-rígida com as colunas.

A viga treliçada que mais se aproxima da viga trapezoidal quanto à inércia equivalente é a viga em treliça triangular. Entretanto, as ligações entre a viga treliçada triangular e as colunas são naturalmente flexíveis, ou seja, a viga é bi-rotulada. Por esse motivo, não ocorre continuidade entre viga e colunas, o que causa maiores esforços e deslocamentos.

Nas Figuras 2.19 e 2.20 são apresentadas as curvas dos deslocamentos horizontais para todas as tipologias estruturadas em função do vão livre, considerando-se os pórticos treçados com banzos formados por perfil T eletro-soldado e por cantoneira dupla (2L), respectivamente.

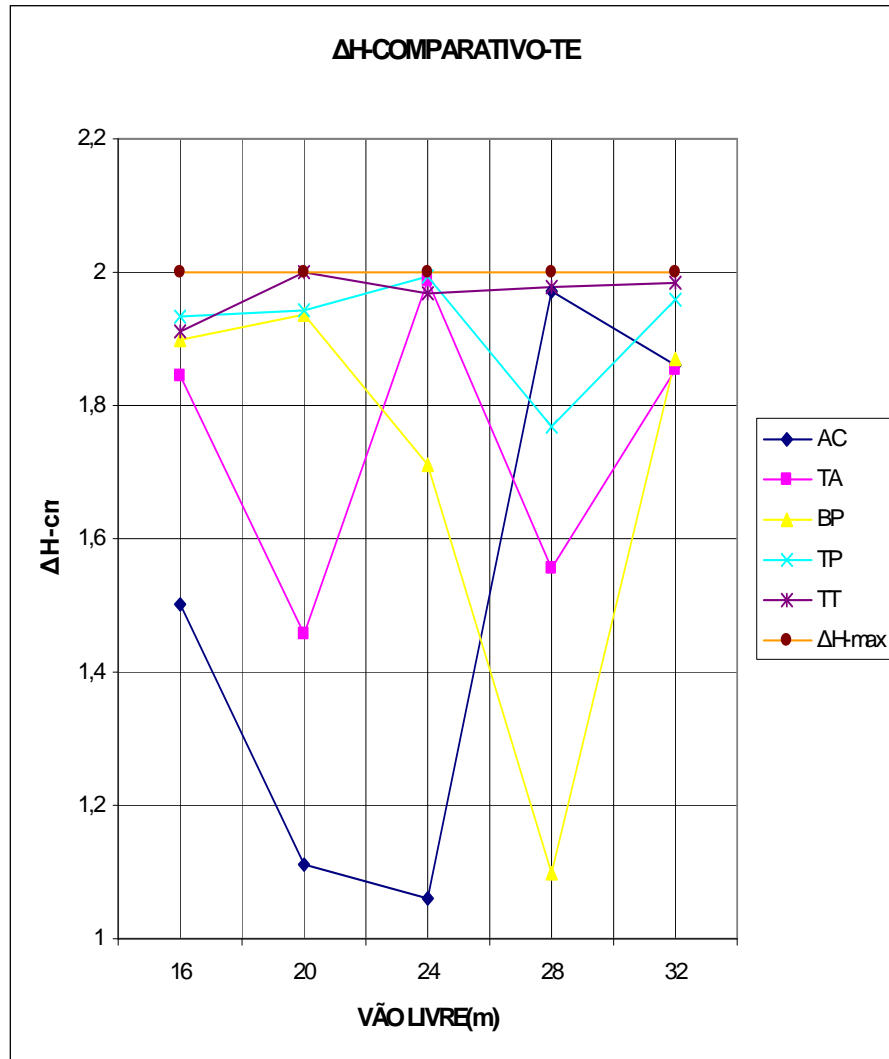


Figura 2.19 - Deslocamentos horizontais para as diversas tipologias, considerando-se pórticos treçados formados por perfil T eletro-soldado (Fonte: CHAVES, 2007).

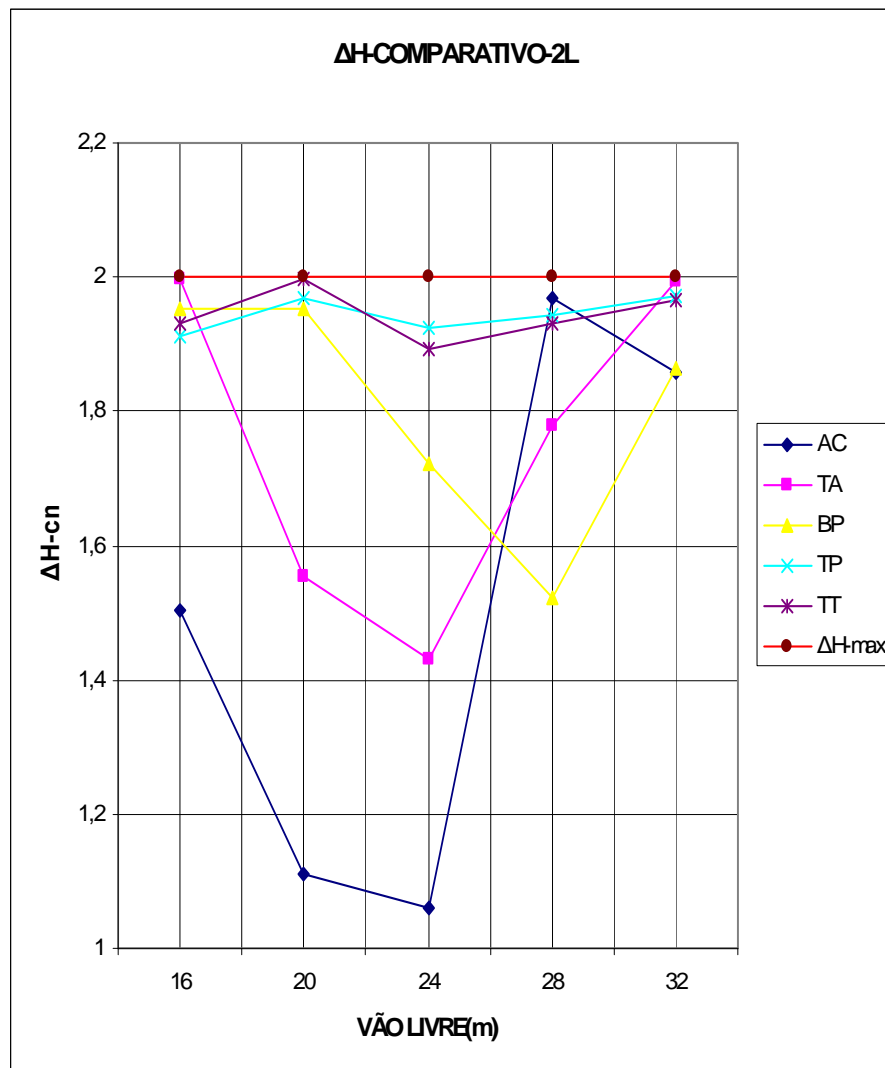


Figura 2.20 - Deslocamentos horizontais para as diversas tipologias, considerando-se pórticos treliçados formados por cantoneira dupla (Fonte: CHAVES, 2007).

Em função dos resultados apresentados nas Figuras 2.19 e 2.20, não é possível definir claramente que tipo de pórtico é mais eficiente quanto ao deslocamento horizontal. Essa falta de definição está diretamente relacionada ao salto de bitolas nos perfis das colunas, que é muito superior aos saltos dados por perfis tipo T eletro-soldado e cantoneira dupla (2L).



# 3

## **Seleção de Parâmetros para o Desenvolvimento do Estudo**

Tendo em vista que o objetivo principal deste trabalho é o de avaliar o desempenho de soluções estruturais para galpões de uso geral compostos por perfis de aço formados a frio, apresenta-se neste capítulo a seleção de parâmetros para o desenvolvimento do estudo considerando as tipologias dos pórticos planos transversais utilizados com maior frequência em galpões de um só pavimento.

Para selecionar os parâmetros que possibilite avaliar as soluções, leva-se em consideração as principais características comumente empregadas neste tipo de edificação. Portanto, fez-se uma análise panorâmica das principais soluções estruturais utilizadas atualmente como: tipologias para os pórticos principais, espaçamento entre os pórticos principais, tipos de fechamento lateral, e etc.

### 3.1. Variação de Parâmetros

A seleção de parâmetros para o desenvolvimento do estudo sobre galpões de uso geral pode ser estabelecida, a partir da variação de diversas características que influenciam o comportamento estrutural, destacando:

- tipologia do pórtico transversal;
- vão livre do pórtico transversal;
- inclinação da cobertura;
- altura da coluna;
- tipo de vinculação;
- distância entre os pórticos transversais;
- relação entre altura no meio do vão (flecha) e vão livre do pórtico transversal;
- variação da magnitude dos esforços devido ao vento.

Cada um desses parâmetros exerce uma maior ou menor influência na taxa de consumo de aço e na resposta estrutural. Portanto, para uma avaliação abrangente seria necessário analisar um elevado número de modelos estruturais na tentativa de determinar a influência de cada característica.

Neste trabalho decidiu-se por avaliar a influência dos seguintes parâmetros:

- tipologia do pórtico transversal;
- vão livre do pórtico transversal;
- distância entre pórticos transversais;
- diferentes estágios de ações do vento (típico das diferentes regiões brasileiras).

Para as demais características, em todos os modelos admitem-se valores adotados em projetos dos galpões usuais de um só pavimento:

- inclinação da cobertura - 10%;
- altura da coluna - 6 metros;
- comprimento total do galpão:
  - 60 metros - para espaçamento entre pórticos transversais de 6,0 e 7,5 metros.
  - 63 metros - para espaçamento entre pórticos transversais de 9,0 metros.

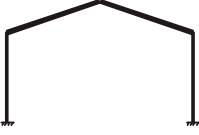
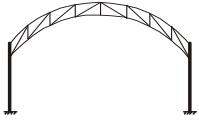
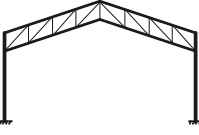
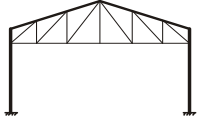
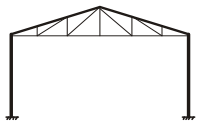
Para a avaliação do desempenho de soluções estruturais para galpões de uso geral, neste trabalho, consideram-se:

- cinco tipologias de pórticos transversais (Tabela 3.1);
  - AC - Pórtico de alma cheia;
  - TA - Pórtico com treliça em arco;
  - BP - Pórtico com treliça de banzos paralelos;
  - TP - Pórtico com treliça trapezoidal;
  - TT - Pórtico com treliça triangular;
- cinco vãos livres (16, 20, 24, 28 e 32 metros) (Tabela 3.1);
- três distâncias entre pórticos transversais (6,0; 7,5 e 9,0 metros) (Figura 3.1);
- três velocidades básicas de vento (30, 35 e 40m/s).

Em função da variação de parâmetros proposta, geram-se 225 modelos de galpões de um só pavimento que se constituem na base para a avaliação das soluções estruturais.

Para comparar os resultados deste estudo com os disponíveis na literatura, geram-se mais 20 modelos com bases engastadas, distância entre pórticos transversais de 6 metros e velocidade básica do vento igual a 35m/s. Portanto, no total, são analisados 245 modelos.

Tabela 3.1 - Tipologias de pórtico transversal consideradas no estudo

Tipologia	Vão Livre (m)	Simbologia
<b>AC</b> 	16	AC-16
	20	AC-20
	24	AC-24
	28	AC-28
	32	AC-32
<b>TA</b> 	16	TA-16
	20	TA-20
	24	TA-24
	28	TA-28
	32	TA-32
<b>BP</b> 	16	BP-16
	20	BP-20
	24	BP-24
	28	BP-28
	32	BP-32
<b>TP</b> 	16	TP-16
	20	TP-20
	24	TP-24
	28	TP-28
	32	TP-32
<b>TT</b> 	16	TT-16
	20	TT-20
	24	TT-24
	28	TT-28
	32	TT-32

Nota: Os esquemas estruturais apresentados na coluna tipologia são apenas ilustrativos, não representando a verdadeira disposição de montantes e diagonais adotados em cada modelo.

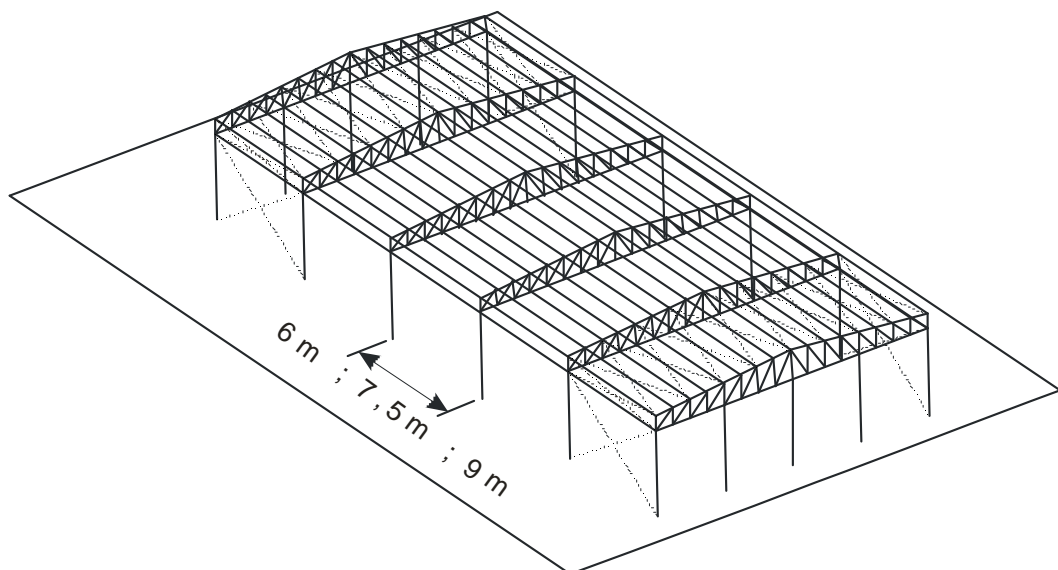


Figura 3.1 - Variação do espaçamento entre os pórticos transversais.

Conforme, anteriormente, mostrado no item 2.3.1 existem diversas alternativas para a composição dos pórticos planos de galpões de uso geral. As tipologias de pórticos treliçados escolhidas para o desenvolvimento do estudo são as mais comuns encontradas no Brasil, mas não representam, necessariamente, a melhor solução geométrica quanto à distância entre terças e posicionamento das diagonais. A busca por uma geometria que conduza a uma melhor solução estrutural para os pórticos treliçados não faz parte dos objetivos deste trabalho.

Para a distância entre pórticos transversais, considera-se um valor mínimo de 6,0 metros, que representa o espaçamento utilizado ao longo de muitos anos no projeto de galpões de uso geral no Brasil. Tendo em vista a observação de diversos projetos de galpões de uso geral nos últimos anos, nota-se que existe uma tendência de aumentar a distância entre pórticos transversais, o que leva à adoção dos valores de 7,5 e 9,0 metros para a avaliação do desempenho de soluções estruturais para galpões de uso geral.

Dado que a magnitude das ações devidas ao vento exerce uma importante influência no dimensionamento dos galpões de estrutura metálica devido ao seu baixo peso próprio, adotam-se três velocidades básicas de vento ( $V_0 = 30, 35$  e  $40$  m/s) para o desenvolvimento do estudo. Estas velocidades cobrem grande parte do território brasileiro como pode-se ver na Figura 3.2.

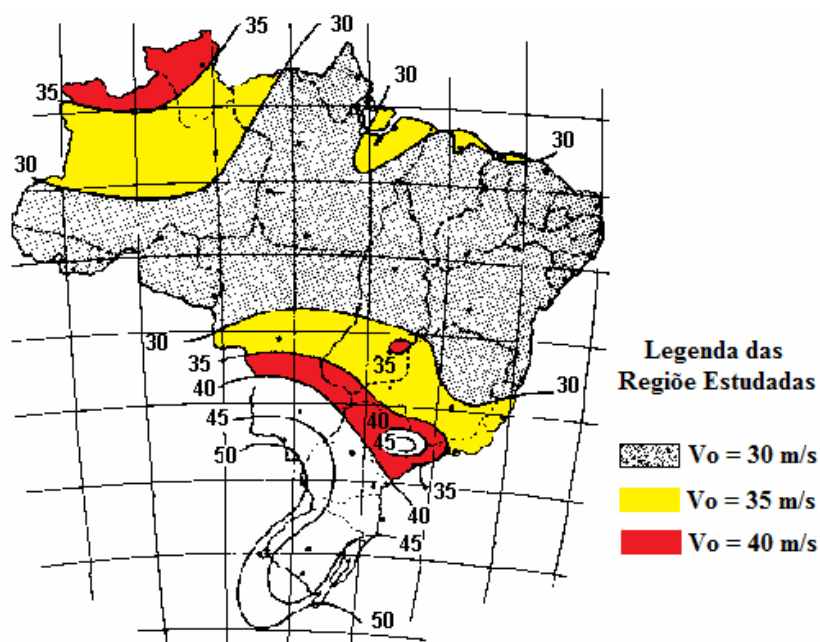


Figura 3.2 - Regiões consideradas no estudo.

A variação da distância entre pórticos transversais e da magnitude das ações devidas ao vento influencia o dimensionamento de elementos estruturais secundários que compõem os galpões, como terças de cobertura, travessas de tapamento e contraventamentos. Portanto, para que se possa comparar a taxa de consumo de aço dos diversos modelos gerados, é necessário incluir a taxa devida aos elementos estruturais secundários no cômputo da taxa de consumo de aço global do galpão.

Neste estudo, para cálculo da taxa de consumo de aço global dos diversos modelos, além do peso dos pórticos transversais, decidiu-se levar em consideração o peso das terças de cobertura e dos contraventamentos. O peso das travessas de tapamento não é considerado no cômputo da taxa de consumo de aço global dos modelos, devido à grande variedade de soluções adotadas para o tapamento lateral e frontal dos galpões de uso geral. Tendo em vista esta decisão, as taxas de consumo de aço global obtidas no presente estudo representam exclusivamente os elementos comuns aos galpões de uso geral.

Deve-se notar que as taxas de consumo de aço dos estudos citados no item 2.5 não consideram o peso das terças de cobertura, o que pode gerar uma discrepância de resultados em eventuais comparações. É importante observar que quando se considera a variação da distância entre pórticos transversais e a variação da magnitude das ações devidas ao vento, deve-se comparar a taxa de consumo de aço global dos galpões, visto que a variação destas características afeta o consumo de aço dos elementos estruturais secundários. Ao se comparar somente a taxa de consumo de aço devido aos pórticos principais, existe uma tendência de se obter melhores resultados para maiores distâncias entre pórticos. No entanto, esta vantagem é diminuída quando se agrega a taxa devida às terças de cobertura e aos contraventamentos, visto que a tendência se inverte, com maiores taxas de consumo para maiores distâncias entre pórticos transversais.

A taxa de consumo de aço referente às travessas de fechamento não será inclusa nos resultados finais, pois, no fechamento lateral pode-se empregar vários sistemas, como por exemplo:

- Alvenarias de tijolos maciços de barro, blocos cerâmicos, blocos de concreto ou concreto celular.
- Painéis pré fabricados de concreto, de fibrocimento, de aço e do tipo dry wall;
- Telhas metálicas, translúcidas e etc.

Pode-se perceber que as características usuais para o fechamento lateral são muito variáveis, isto se deve às soluções arquitetônicas e às finalidades dos galpões. Portanto, não é possível identificar qual sistema é mais empregado.

Como o objetivo é proporcionar uma visão mais clara das comparações entre as tipologias, buscando considerar as soluções incomuns entre os galpões de uso geral, ou seja, coluna, viga de cobertura, terças de cobertura, sistemas de estabilização e etc., o fechamento lateral, por ser muito variável, poderia mascarar a interpretação dos resultados. Para fins de comparação, optou-se em não considerar a taxa de consumo de aço dos elementos estruturais que compõem o fechamento lateral.

### **3.2. Definição dos Modelos**

Tendo em vista o objetivo de se avaliar a influência da solução estrutural para galpões de uso geral e considerando que a estrutura desses edifícios é marcada pela repetição de pórticos planos transversais, o desempenho das tipologias centra-se na avaliação estrutural dos pórticos principais. Com os parâmetros adotados definem-se neste item, as características geométricas de cada modelo estrutural.

Para a definição das características geométricas dos modelos estruturais para cada tipologia de galpão, toma-se como referência uma inclinação de 10% para a cobertura, o que é usual no caso de telhas metálicas.

Para os pórticos de alma cheia (AC), a inclinação de 10% resulta em uma flecha no meio do vão equivalente a  $L/20$ , sendo “L” o vão livre do pórtico transversal.

Preservando-se a inclinação de 10%, adota-se uma relação de  $L/10$  para a flecha da viga de cobertura dos modelos em treliça de banzos paralelos (BP) e treliça trapezoidal (TP). Esta medida foi tomada para manter próximas as inércias equivalentes das seções transversais no meio do vão dos diferentes tipos de pórticos.

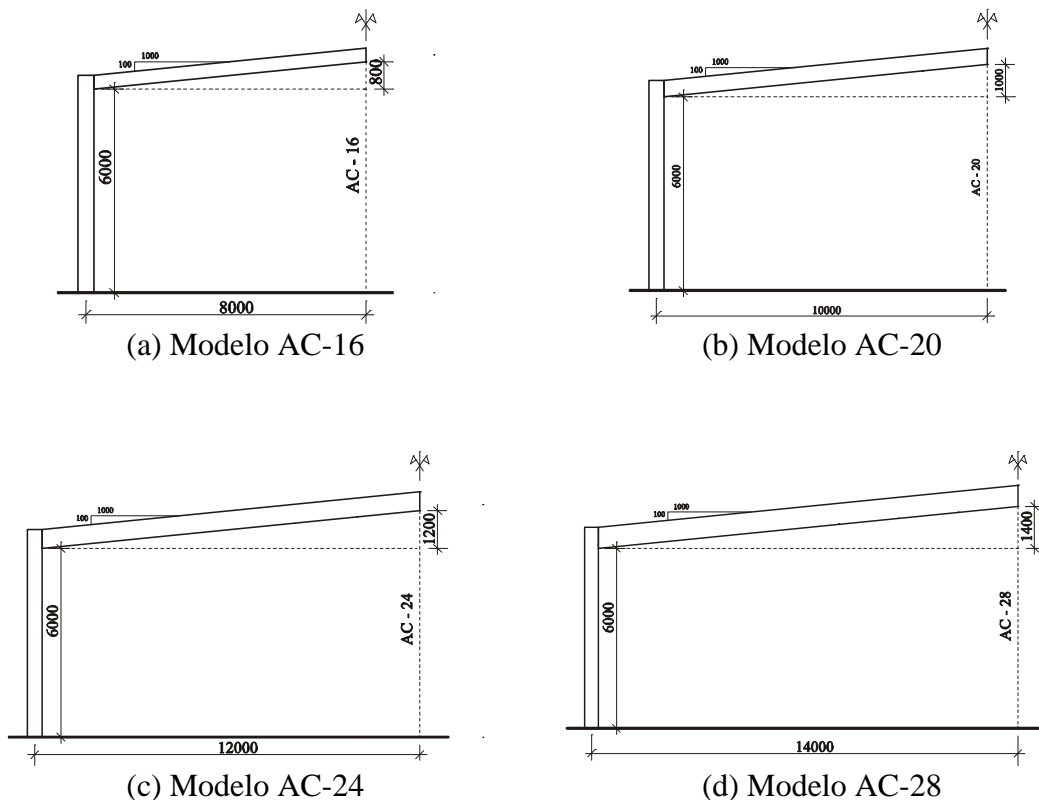
No caso da treliça triangular (TT), mantém-se a relação de  $L/10$  para a flecha do meio do vão, o que proporciona uma inclinação de 20% para a cobertura. A inclinação de 10% para esse caso faz surgir esforços muito elevados nas extremidades da viga de cobertura, além de reduzir significativamente a inércia equivalente da seção transversal no meio do vão.

Para a treliça em arco (TA) toma-se como referência uma relação entre a flecha e o vão livre variando de  $1/6$  a  $1/5$ , conforme recomendação de SALES (1994). Portanto, para esses modelos utiliza-se uma relação de  $L/5$  para a flecha no meio do vão.

Com base nas considerações anteriores, foram adotadas no presente trabalho bases rotuladas para os pórticos AC, TA, BP e TP. Já no pórtico TT foi adotada base engastada, em virtude do afunilamento produzido pelo arranjo das barras.

### 3.2.1. Pórtico de Alma Cheia

Na Figura 3.3 apresentam-se os cinco modelos de pórtico de alma cheia e a sobreposição dos cinco modelos considerados no estudo, cujos vãos livres variam de 16 a 32 metros, com incrementos de 4 metros. Para esta tipologia admite-se que a ligação entre a coluna e a viga de cobertura em alma cheia é rígida e as colunas estão rotuladas na base.





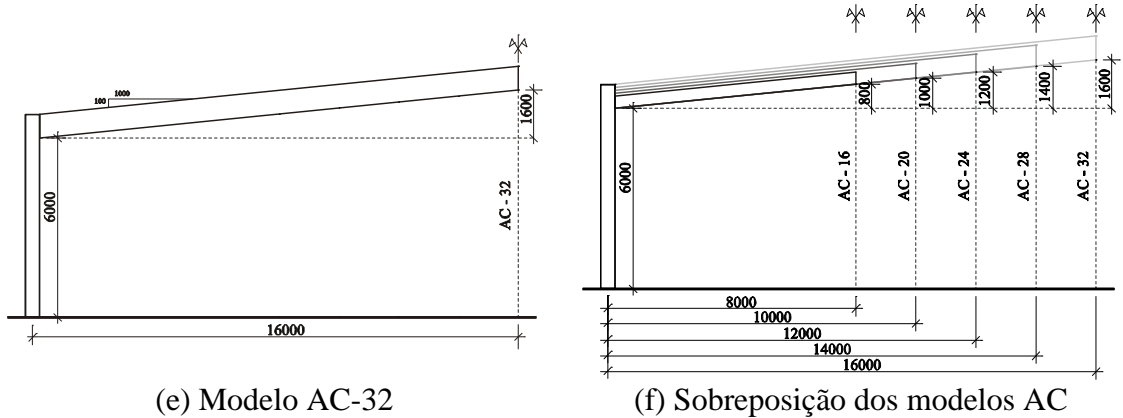


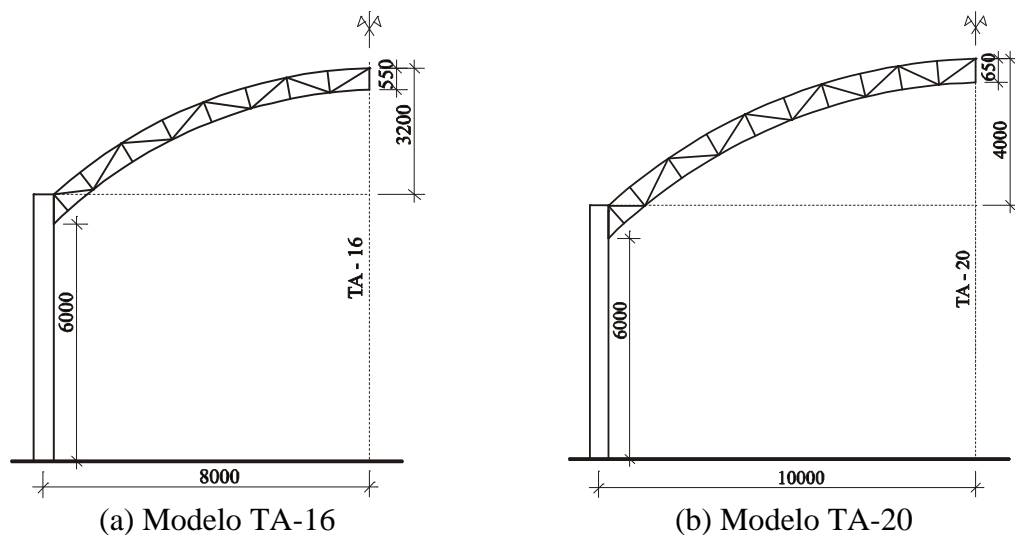
Figura 3.3 - Variação da geometria para os pórticos de alma cheia (AC).

### 3.2.2. Pórtico com Treliça em Arco

Na Figura 3.4 apresentam-se os cinco modelos de pórtico com treliça em arco e uma sobreposição dos cinco modelos considerados no estudo, cujos vãos livres variam de 16 a 32 metros, com incrementos de 4 metros.

Para essa tipologia admite-se que as ligações entre os banzos da viga de cobertura e a coluna são flexíveis e que as colunas estão rotuladas na base. Por outro lado, as diagonais e os montantes da treliça são rotulados em suas extremidades.

Segundo SALES et. al. (1994), nos arcos metálicos a relação entre a altura dos banzos e o vão livre entre colunas varia em torno de  $L/40$  a  $L/30$ . Neste trabalho adota-se uma relação de  $L/30$  para a distância entre banzos.



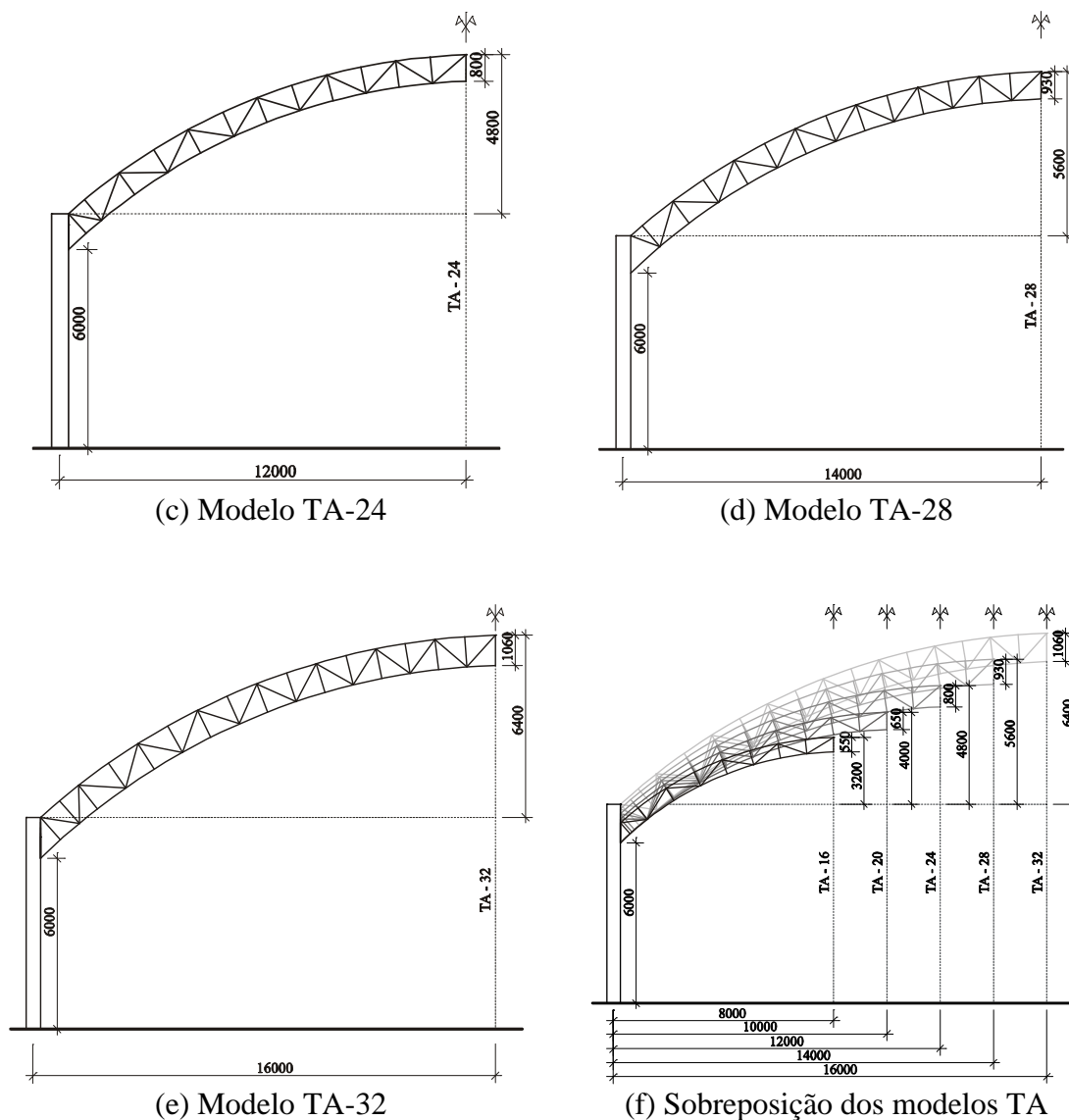


Figura 3.4 - Variação da geometria para os pórticos com treliça em arco (TA).

### 3.2.3. Pórtico com Treliça de Banzos Paralelos

Na Figura 3.5 apresentam-se os modelos de pórticos com treliça de banzos paralelos e uma sobreposição dos cinco modelos considerados no estudo, mantendo-se a mesma variação de vãos utilizada nos estudos anteriores (16 a 32 metros, com incrementos de 4 metros).

As colunas são rotuladas na base e a ligação dos banzos da treliça com a coluna é flexível. Os elementos das diagonais e montantes são rotulados nas suas extremidades.

Nestes modelos admite-se que a distância entre banzos corresponde à metade da altura no meio do vão, ou seja, à metade da flecha da treliça.

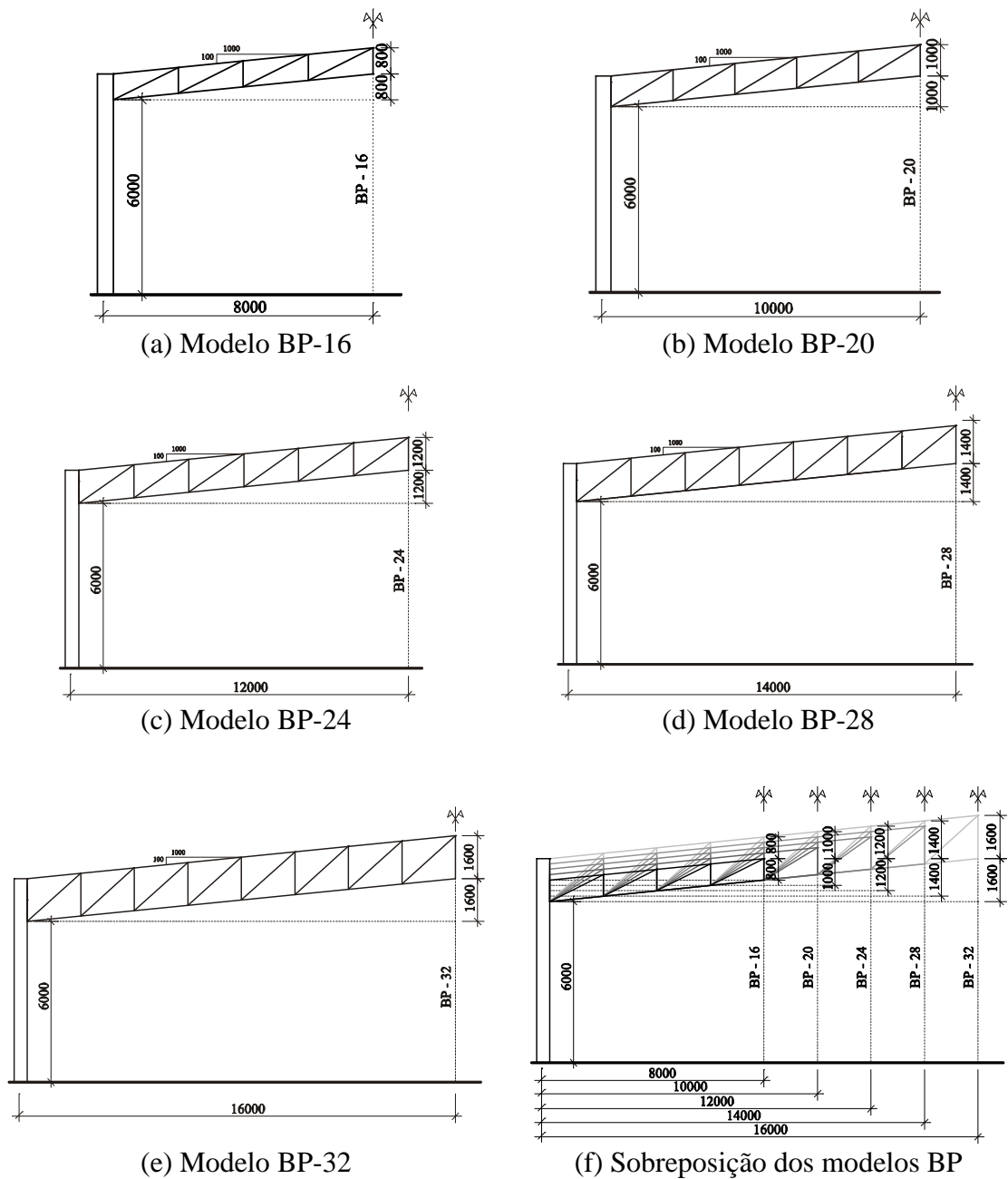


Figura 3.5 - Variação da geometria para os pórticos com treliça de banzos paralelos (BP).

### 3.2.4. Pórtico com Treliça Trapezoidal

Na Figura 3.6 apresentam-se os modelos de pórticos com treliça trapezoidal e uma sobreposição dos cinco modelos considerados no estudo, mantendo-se a mesma variação de vãos utilizada nos estudos anteriores (16 a 32 metros, com incrementos de 4 metros).

Os critérios de vinculação seguem o mesmo princípio adotado nos modelos em pórtico com treliça em arco e pórtico com treliça de banzos paralelos, ou seja, colunas rotuladas na base, ligação flexível entre os banzos da treliça e a coluna e extremidades das diagonais e montantes rotuladas.

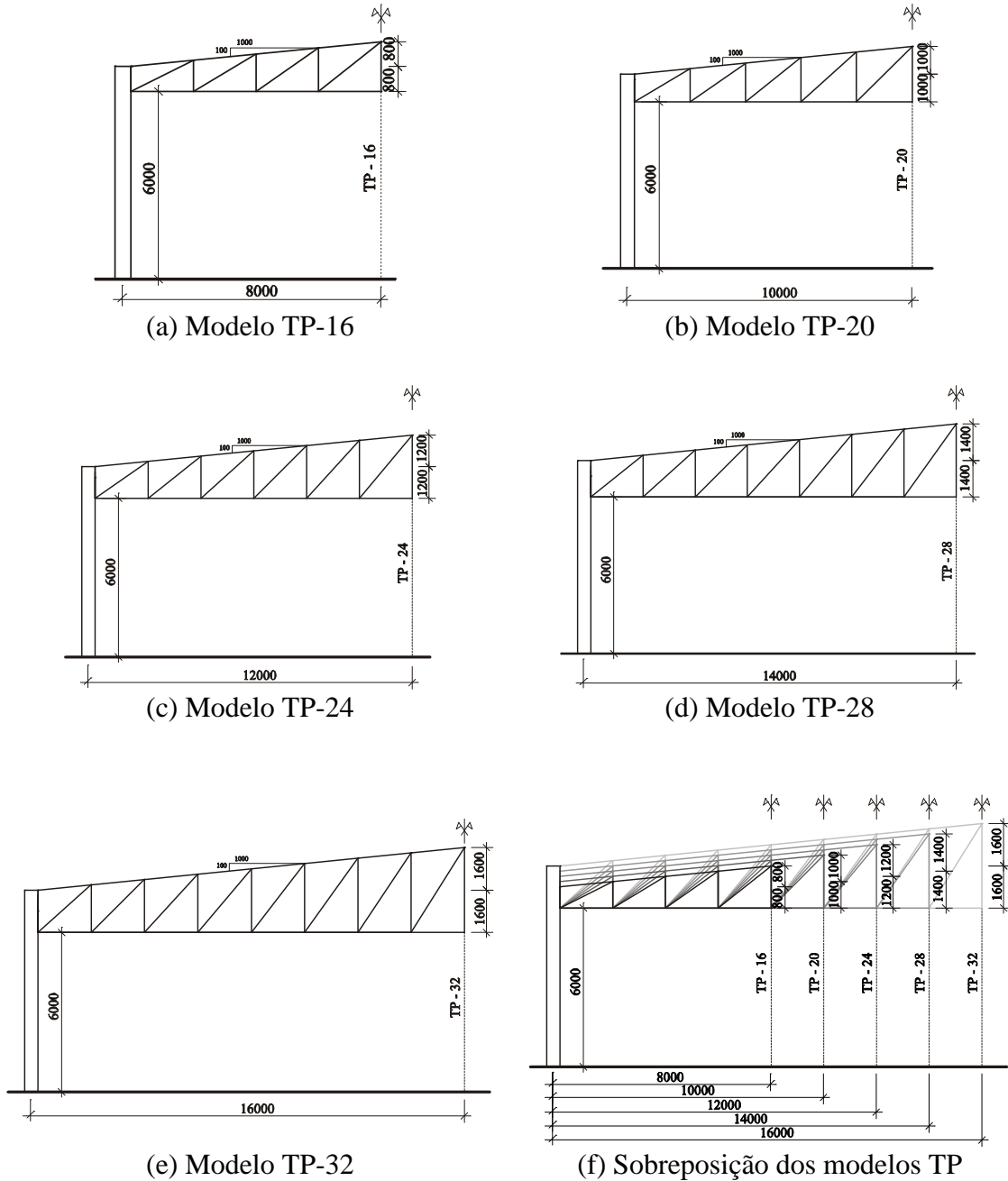


Figura 3.6 - Variação da geometria para os pórticos com treliça trapezoidal (TP).

### 3.2.5. Pórtico com Treliça Triangular

O último grupo de modelos considerado no estudo é o pórtico com treliça triangular. Na Figura 3.7 apresentam-se os modelos de pórticos com treliça triangular e uma sobreposição dos cinco modelos considerados neste trabalho, mantendo-se a mesma variação de vãos utilizada nos estudos anteriores (16 a 32 metros, com incrementos de 4 metros).

A ligação da viga de cobertura com a coluna é flexível, as barras que compõem a treliça têm suas extremidades rotuladas e as colunas são engastadas na base.

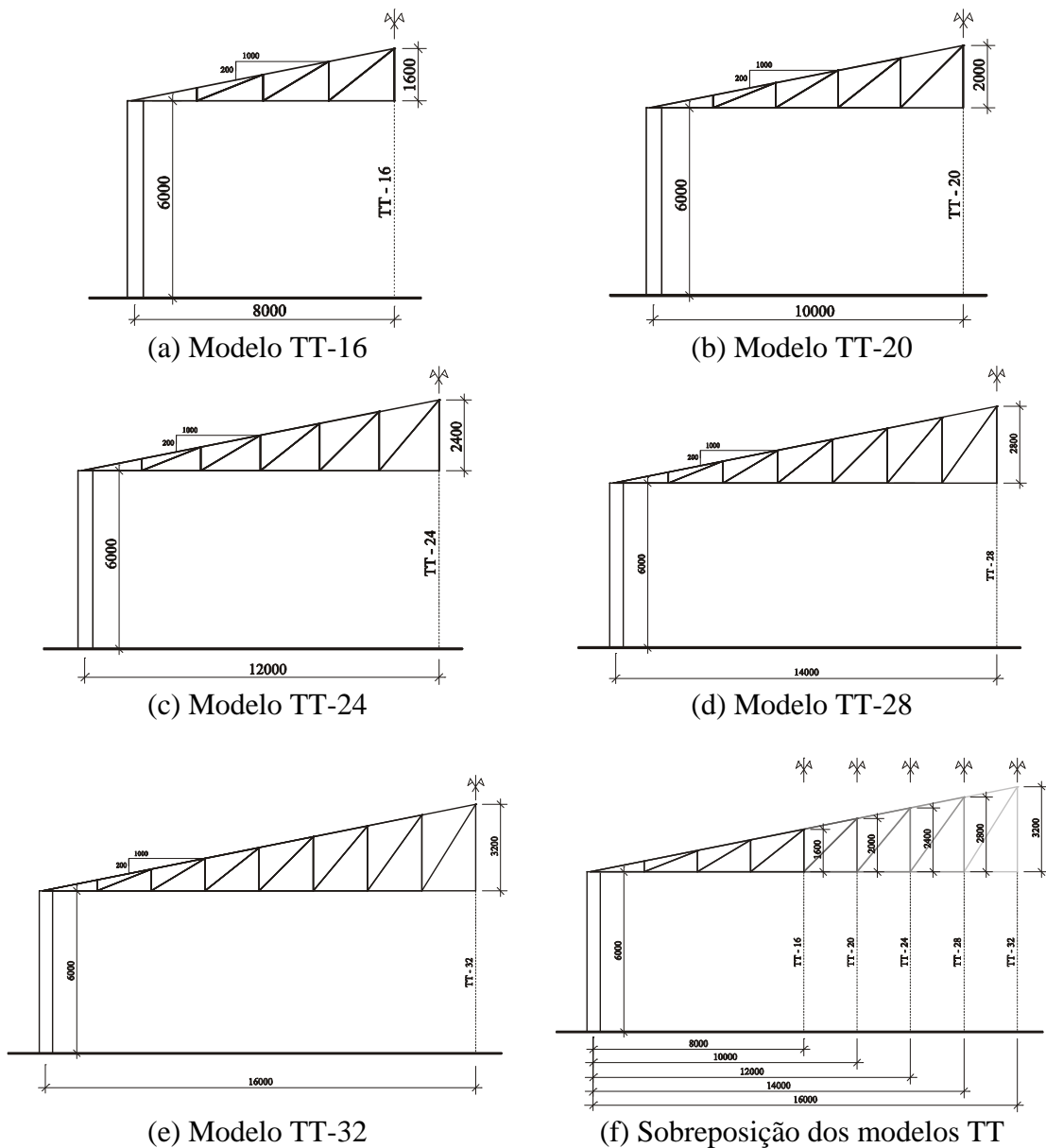


Figura 3.7 - Variação da geometria para os pórticos com treliça triangular (TT).

### 3.3. Considerações sobre a Fabricação de Estruturas Treliçadas com PFF Tipo U

Em função da observação de diversos projetos de galpão de uso geral, nota-se que há diferença de desempenho estrutural de diferentes composições de seções transversais das vigas treliçadas. Na Figura 3.8 apresentam-se algumas possíveis seções transversais.

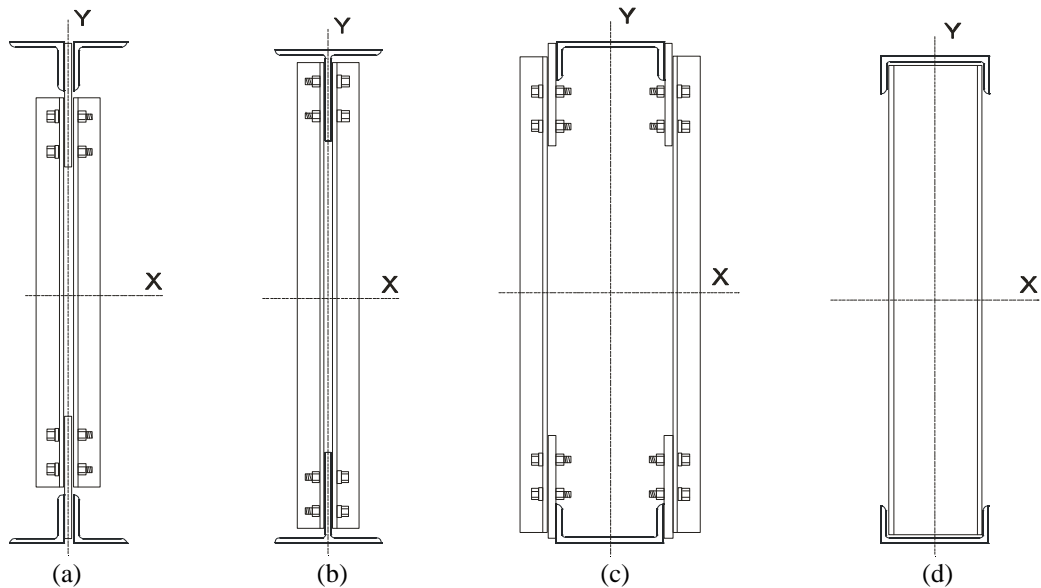


Figura 3.8 - Possibilidades de seções transversais de vigas treliçadas.

Na Figura 3.8 (a) apresenta-se a seção transversal de uma treliça com banzos, diagonais e montantes em cantoneira dupla; na Figura 3.8 (b) são indicadas as treliças com banzos em perfil T e diagonais e montantes em cantoneira dupla; na Figura 3.8 (c) são indicadas as treliças com banzos em perfil U e diagonais e montantes em cantoneira dupla e na Figura 3.8 (d) são indicadas as treliças com banzos, diagonais e montantes em perfil U.

Na Figura 3.8 apresentam-se somente algumas possibilidades dentre as diversas alternativas para composição de uma viga treliçada. Diversos fatores podem ser considerados para a escolha da seção transversal ideal. Como principal, tem-se que não se deveria avaliar uma solução de composição simplesmente pela taxa de consumo de aço, mas, levando-se em conta aspectos do processo de fabricação.

Os elementos estruturais em treliça podem ser produzidos com uma grande variedade de perfis, podendo-se optar por uma maior ou menor variação de soluções transversais, algumas como descritas anteriormente, a serem utilizadas em um mesmo elemento.

Tendo em vista que em uma treliça usual de galpões de uso geral existe uma importante variação de esforços em cada barra que a compõem, seria natural escolher perfis que conduzissem à maior economia de peso. No entanto, sob o ponto de vista de fabricação, a adoção de uma grande variedade de perfis em um mesmo elemento estrutural tende a elevar o custo de fabricação, podendo superar a vantagem de racionalização imaginada com a adoção dos perfis otimizados para cada elemento da treliça.

Uma alternativa usual no projeto de elementos treliçados é a utilização de perfis formados a frio tipo U nos banzos, diagonais e montantes. Esta prática tem sido observada em algumas empresas brasileiras de fabricação de estruturas metálicas, como a Medabil S. A (Figura 3.9). As principais vantagens dessa solução são:

- grande variedade geométrica dos PFF tipo U, que permite uma padronização das dimensões externas, com variação da espessura e das abas dos perfis (Figura 3.10);
- elevada produtividade;
- precisão milimétrica das medidas quando montada em fábrica e facilidade de aplicação de contraflechas;
- quando montada em fábrica possibilita ótimo controle de solda;
- excelente acabamento.



Figura 3.9 - Exemplo de aplicação de treliça empregando perfis formados a frio tipo U nos banzos, diagonais e montantes (Fonte: álbum do autor).

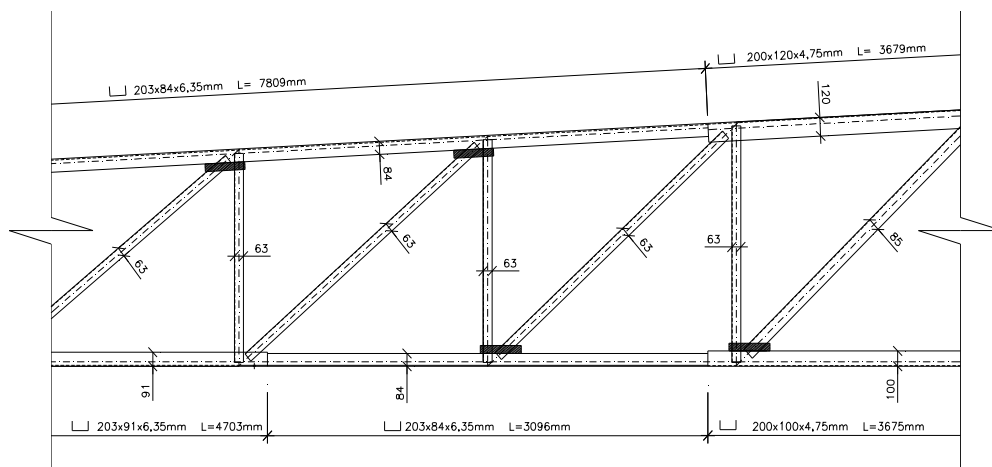


Figura 3.10 - Exemplo de projeto de treliça empregando perfis formados a frio tipo U nos banzos, diagonais e montantes.

A produção de vigas treliçadas empregando perfis formados a frio do tipo U nos banzos, diagonais e montantes pode iniciar com a montagem de uma treliça de gabarito sobre uma bancada (Figura 3.11). Sobre esta treliça de referência montam-se as próximas treliças executando somente uma solda inicial (pré-montagem). Em seguida, numa outra bancada, a treliça recebe a solda e o acabamento final.

Para se ter uma noção da grande produtividade dessa solução, considerando-se uma fábrica especializada em estrutura metálica que produz em média 245ton/mês de treliças, leva-se em média 110 minutos para montagem do gabarito de referência de uma treliça de banzos paralelos composta por perfis formados a frio tipo U para um vão livre de 18 m. Tendo o gabarito como referência, gasta-se cerca de 150min para fabricação completa de cada treliça.



Figura 3.11 - Bancada de gabarito para produção de treliças (Fonte: álbum do autor).



Do ponto de vista econômico, pode-se comparar uma treliça de banzos paralelos compostos por perfis formados a frio tipo U a uma treliça parafusada em cantoneiras laminadas, por exemplo. Com relação ao custo de produção não há grandes diferenças, já o custo de montagem é aproximadamente 18% maior quando emprega-se a solução de cantoneiras laminadas. Outra diferença entre as duas soluções é o custo da matéria-prima, em que os perfis laminados é aproximadamente 40% mais caros que os perfis dobrados a frio.

Tendo em vista a observação sistemática dos ganhos de produtividade e economia alcançadas na fabricação de elementos estruturais treliçados com as premissas apresentadas anteriormente, nas vigas treliçadas de cobertura, que são apresentadas no Capítulo 4, considera-se a utilização de PFF tipo U com a racionalização imposta pelo processo de fabricação.

# 4

## Análise Estrutural e Dimensionamento dos Modelos

Conforme apresentado no Capítulo 3, os parâmetros adotados para as diversas tipologias de pórticos transversais, vãos livres, velocidade básica do vento, espaçamento entre pórticos transversais e vinculação das colunas com a fundação, num total de 245 (duzentos e quarenta e cinco) modelos.

Neste Capítulo apresentam-se os principais aspectos da análise e dimensionamento dos modelos que compõem o estudo da avaliação do desempenho das tipologias estruturais para galpões compostos por perfis formados a frio.

### 4.1. Ações

As ações atuantes nos modelos foram determinadas de acordo com as recomendações do Anexo B da NBR8800:2008 (ABNT, 2008).

## A – Ações Permanentes (G)

No caso de galpões industriais leves, as ações permanentes correspondem ao peso próprio dos elementos constituintes da estrutura e dos materiais a ela ligados. O peso próprio dos elementos estruturais do pórtico transversal é determinado diretamente pelo mCalc 2008, enquanto as demais ações são informadas separadamente. Para todos os modelos considerou-se uma ação permanente de  $0,11 \text{ kN/m}^2$ , levando-se em conta o peso próprio das telhas, terças e elementos secundários de cobertura. Na Tabela 4.1 estão os valores da ação permanente nas tipologias levando-se em consideração a variação do espaçamento entre os pórticos transversais. Na Figura 4.1 está ilustrado o sentido e a forma de atuação das ações.

Tabela 4.1 - Ação permanente

<b>AÇÃO PERMANENTE</b>	
Tipologias: AC-BP-TP-TT-TA	
AP= $0,11 \text{ kN/m}^2$	
Vão Livre (m)= 16 - 20 - 24 - 28 - 32	
Altura livre (m)= 6 m	
Dist. Entre Pórticos(L)	PP (kN/m)
6 m	-0,66
7,5 m	-0,83
9 m	-0,99

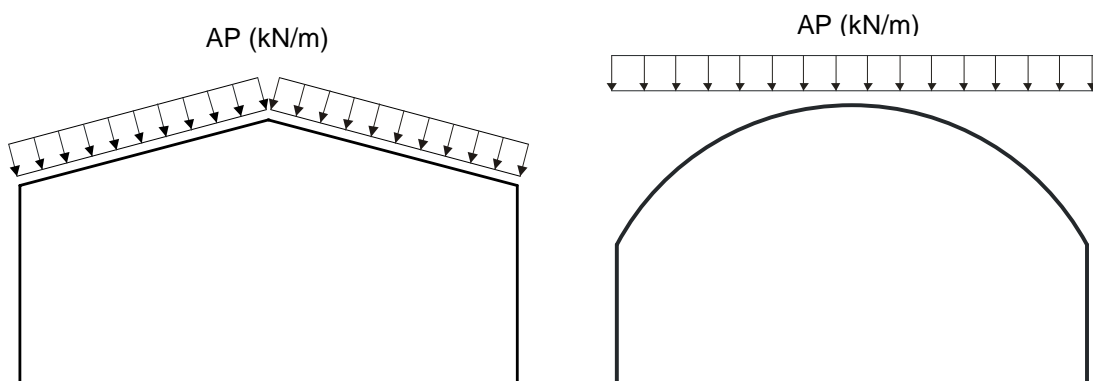


Figura 4.1 - Atuação da ação permanente.

## B – Ações Variáveis

As ações variáveis são aquelas que ocorrem com valores que apresentam variações significativas durante a vida útil da construção. No caso de galpões industriais leves, as ações variáveis a serem consideradas são a sobrecarga de cobertura e a ação do vento.

### B.1 - Sobrecarga de Cobertura (Q)

Para coberturas comuns, na ausência de especificação mais rigorosa, deve ser prevista uma sobrecarga nominal mínima de  $0,25 \text{ kN/m}^2$  (Anexo B da NBR8800:2008 (ABNT, 2008)).

Segundo BELLEI (2006) para galpões de pequeno e médio porte, fora de zonas de acúmulo de poeira, pode-se adotar para sobrecargas de cobertura o valor de  $0,15 \text{ kN/m}^2$ .

Para os modelos foi considerado a sobrecarga de cobertura recomendada pela NBR 8800:2008 (ABNT, 2008) de  $0,25 \text{ kN/m}^2$ . Os valores da sobrecarga nas tipologias levando-se em consideração a variação do espaçamento entre os pórticos transversais estão apresentados na Tabela 4.2, e na Figura 4.2 está ilustrado o sentido e forma de aplicação do carregamento.

Tabela 4.2 - Sobrecarga de cobertura

<b>SOBRECARGA DE COBERTURA</b>	
Tipologias: AC-BP-TP-TT-TA	
SC= $0,25 \text{ kN/m}^2$	
Vão Livre (m) = 16 - 20 - 24 - 28 - 32	
Altura livre (m) = 6 m	
Dist. Entre Pórticos(L)	SC (kN/m)
6 m	-1,50
7,5 m	-1,88
9 m	-2,25

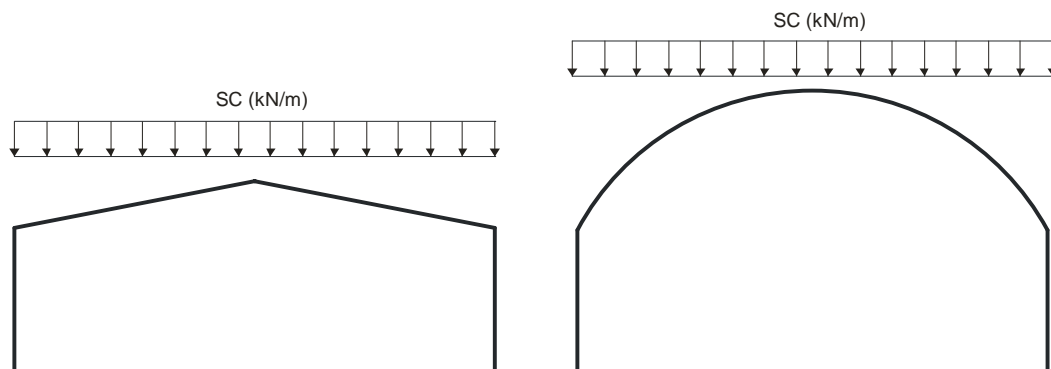


Figura 4.2 - Atuação da sobrecarga.

## B.2 - Ação do Vento (V)

A ação do vento nos galpões foi determinada segundo as prescrições da NBR 6123:1988 (ABNT, 1988).

Como foi apresentado no Capítulo 3, no presente trabalho são consideradas três velocidades básicas do vento  $V_o = 30, 35$  e  $40$  m/s, o que abrange grande parte do território brasileiro. Além da velocidade básica do vento, considerou-se que os galpões de uso geral estão localizados em terrenos planos ou fracamente acidentados, abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas (a cota média do topo dos obstáculos foi considerada inferior ou igual a 1m).

A ação do vento foi determinada para dois casos distintos de edifício com planta retangular: uma com cobertura em duas águas e a outra com cobertura em arco. O comprimento longitudinal foi de 60 metros para os espaçamentos entre pórticos transversais iguais a 6 e 7,5 metros, e para espaçamento entre pórticos transversais igual a 9 metros o comprimento longitudinal foi considerado igual a 63 metros.

Em todos os modelos foi considerado o coeficiente de pressão interna,  $C_{pi}$ , igual a -0,30 ou 0 (entre o valor mais nocivo), admitindo-se que o galpão possui quatro faces igualmente permeáveis.

Nas Figuras 4.3 a 4.6 está ilustrada a da ação do vento nas tipologias em duas águas e em arco. Os valores da ação do vento nas tipologias em estudo estão apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4.

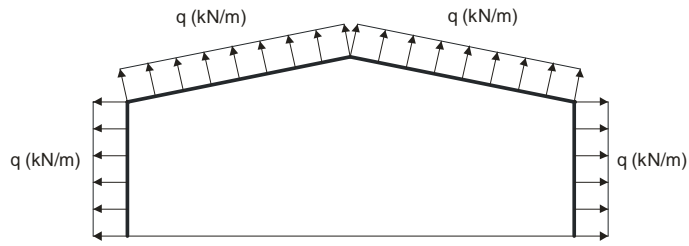


Figura 4.3 - Atuação do vento longitudinal para galpões em duas águas (vento  $0^\circ$ ).

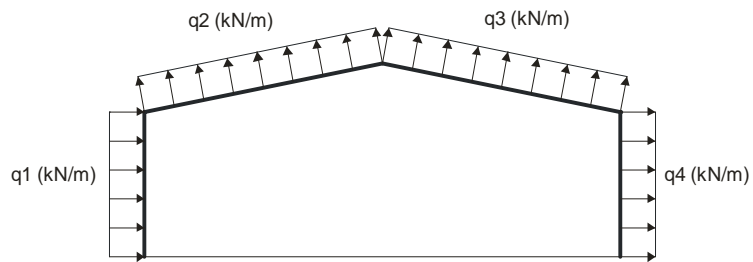


Figura 4.4 - Atuação do vento transversal para galpões em duas águas (vento  $90^\circ$ ).

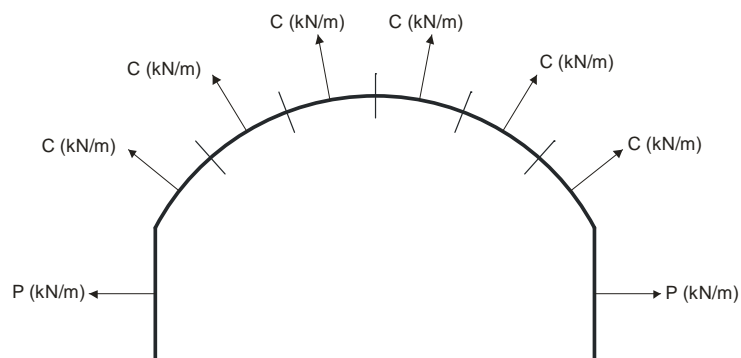


Figura 4.5 - Atuação do vento longitudinal para galpões em arco (vento  $0^\circ$ ).

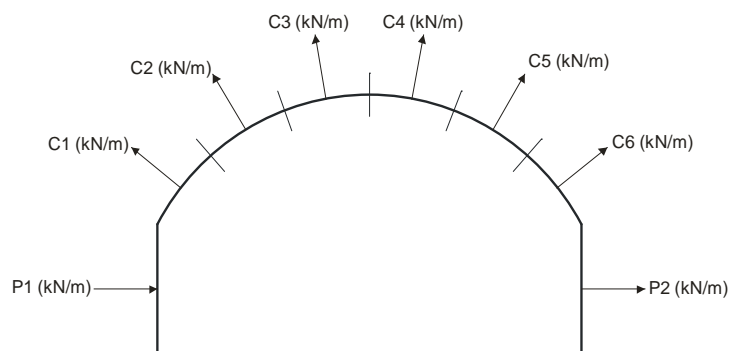


Figura 4.6 - Atuação do vento transversal para galpões em arco (vento  $90^\circ$ ).

Tabela 4.3 - Ação do vento nas tipologias AC, BP, TP e TT em função das variações paramétricas

(a)						(b)					
AÇÃO DO VENTO						AÇÃO DO VENTO					
Tipologias AC-BP-TP-TT						Tipologias AC-BP-TP-TT					
$V_0 = 30 \text{ m/s}$						$V_0 = 30 \text{ m/s}$					
Dist. entre pórticos = 6 m						Dist. entre pórticos = 7,5 m					
Altura livre = 6 m						Altura livre = 6 m					
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=90^\circ$					$\alpha=0^\circ$	$\alpha=90^\circ$			
	q (kN/m)	q1 (kN/m)	q2 (kN/m)	q3 (kN/m)	q4 (kN/m)		q (kN/m)	q1 (kN/m)	q2 (kN/m)	q3 (kN/m)	q4 (kN/m)
16 m	-2,41	2,11	-3,61	-1,20	-1,51	16 m	-2,81	2,46	-4,22	-1,41	-1,76
20 m	-2,43	2,13	-3,64	-1,21	-1,52	20 m	-2,84	2,48	-4,26	-1,42	-1,77
24 m	-2,45	2,14	-3,67	-1,22	-1,53	24 m	-2,87	2,51	-4,30	-1,43	-1,79
28 m	-2,47	2,16	-3,70	-1,23	-1,41	28 m	-2,89	2,53	-4,33	-1,44	-1,81
32 m	-2,49	2,18	-3,73	-1,24	-1,24	32 m	-2,91	2,55	-4,37	-1,46	-1,55

(c)						(d)					
AÇÃO DO VENTO						AÇÃO DO VENTO					
Tipologias AC-BP-TP-TT						Tipologias AC-BP-TP-TT					
$V_0 = 30 \text{ m/s}$						$V_0 = 35 \text{ m/s}$					
Dist. entre pórticos = 9 m						Dist. entre pórticos = 6 m					
Altura livre = 6 m						Altura livre = 6 m					
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=90^\circ$					$\alpha=0^\circ$	$\alpha=90^\circ$			
	q (kN/m)	q1 (kN/m)	q2 (kN/m)	q3 (kN/m)	q4 (kN/m)		q (kN/m)	q1 (kN/m)	q2 (kN/m)	q3 (kN/m)	q4 (kN/m)
16 m	-3,38	2,95	-5,06	-1,69	-1,79	16 m	-3,28	2,87	-4,92	-1,64	-2,05
20 m	-3,41	2,98	-5,11	-1,70	-2,13	20 m	-3,31	2,89	-4,96	-1,65	-2,07
24 m	-3,44	3,01	-5,16	-1,72	-2,15	24 m	-3,33	2,92	-5,00	-1,67	-2,08
28 m	-3,47	3,03	-5,20	-1,73	-2,17	28 m	-3,36	2,94	5,04	-1,68	-1,92
32 m	-3,50	3,06	-5,24	-1,75	-2,19	32 m	-3,38	2,96	-5,08	-1,69	-1,69

(e)						(f)					
AÇÃO DO VENTO						AÇÃO DO VENTO					
Tipologias AC-BP-TP-TT						Tipologias AC-BP-TP-TT					
$V_0 = 35 \text{ m/s}$						$V_0 = 35 \text{ m/s}$					
Dist. entre pórticos = 7,5 m						Dist. entre pórticos = 9 m					
Altura livre = 6 m						Altura livre = 6 m					
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=90^\circ$					$\alpha=0^\circ$	$\alpha=90^\circ$			
	q (kN/m)	q1 (kN/m)	q2 (kN/m)	q3 (kN/m)	q4 (kN/m)		q (kN/m)	q1 (kN/m)	q2 (kN/m)	q3 (kN/m)	q4 (kN/m)
16 m	-3,83	3,35	-5,74	-1,91	-2,39	16 m	-4,60	4,02	-6,89	-2,30	-2,44
20 m	-3,87	3,38	-5,80	-1,93	-2,42	20 m	-4,64	4,06	-6,96	-2,32	-2,90
24 m	-3,90	3,41	-5,85	-1,95	-2,44	24 m	-4,68	4,09	-7,02	-2,34	-2,92
28 m	-3,93	3,44	-5,90	-1,97	-2,46	28 m	-4,72	4,13	-7,08	-2,36	-2,95
32 m	-3,97	3,47	-5,95	-1,98	-2,11	32 m	-4,76	4,16	-7,14	-2,38	-2,97

Tabela 4.3 - Ação do vento nas tipologias AC, BP, TP e TT em função das variações paramétricas (Continuação)

(g)

<b>AÇÃO DO VENTO</b>					
Tipologias: AC-BP-TP-TT					
$V_0 = 40 \text{ m/s}$					
Dist. entre pórticos = 6 m					
Altura livre = 6 m					
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=90^\circ$			
	q (kN/m)	q1 (kN/m)	q2 (kN/m)	q3 (kN/m)	q4 (kN/m)
16 m	-4,28	3,75	-6,43	-2,14	-2,68
20 m	-4,32	3,78	-6,48	-2,16	-2,70
24 m	-4,35	3,81	-6,53	-2,18	-2,72
28 m	-4,39	3,84	-6,58	-2,19	-2,51
32 m	-4,42	3,87	-6,63	-2,21	-2,21

(h)

<b>AÇÃO DO VENTO</b>					
Tipologias: AC-BP-TP-TT					
$V_0 = 40 \text{ m/s}$					
Dist. entre pórticos = 7,5 m					
Altura livre = 6 m					
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=90^\circ$			
	q (kN/m)	q1 (kN/m)	q2 (kN/m)	q3 (kN/m)	q4 (kN/m)
16 m	-5,00	4,38	-7,50	-2,50	-3,13
20 m	-5,05	4,42	-7,57	-2,52	-3,16
24 m	-5,09	4,46	-7,64	-2,55	-3,18
28 m	-5,14	4,50	-7,71	-2,57	-3,21
32 m	-5,18	4,53	-7,77	-2,59	-2,75

(i)

<b>AÇÃO DO VENTO</b>					
Tipologias: AC-BP-TP-TT					
$V_0 = 40 \text{ m/s}$					
Dist. entre pórticos = 9 m					
Altura livre = 6 m					
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=90^\circ$			
	q (kN/m)	q1 (kN/m)	q2 (kN/m)	q3 (kN/m)	q4 (kN/m)
16 m	-6,00	5,25	-9,00	-3,00	-3,19
20 m	-6,06	5,30	-9,09	-3,03	-3,79
24 m	-6,11	5,35	-9,17	-3,06	-3,82
28 m	-6,16	5,39	-9,25	-3,08	-3,85
32 m	-6,22	5,44	-9,32	-3,11	-3,88

Tabela 4.4 - Ação do vento nas tipologias TA em função das variações paramétricas (a)

<b>AÇÃO DO VENTO</b>										
Tipologias: TA										
$V_0 = 30 \text{ m/s}$										
Dist. entre pórticos = 6 m										
Altura livre = 6 m										
	$\alpha=0^\circ$		$\alpha=90^\circ$							
	P (kN/m)	C (kN/m)	P1 (kN/m)	P2 (kN/m)	C1 (kN/m)	C2 (kN/m)	C3 (kN/m)	C4 (kN/m)	C5 (kN/m)	C6 (kN/m)
16 m	-2,30	-2,49	2,01	-1,44	-3,27	-2,02	-2,65	-2,49	-1,09	-0,62
20 m	-2,30	-2,54	2,01	-1,44	-3,05	-1,97	-2,61	-2,54	-1,21	-0,64
24 m	-2,30	-2,57	2,01	-1,44	-2,89	-1,93	-2,57	-2,57	-1,29	-0,64
28 m	-2,30	-2,61	2,01	-1,26	-2,58	-1,86	-2,51	-2,51	-1,40	-0,65
32 m	-2,30	-2,64	2,01	-1,15	-2,31	-1,82	-2,48	-2,48	-1,49	-0,66



Tabela 4.4 - Ação do vento nas tipologias TA em função das variações paramétricas (Continuação)

(b)

AÇÃO DO VENTO										
Tipologias TA										
$V_0 = 30 \text{ m/s}$										
Dist. entre pórticos = 7,5 m										
Alturalivre = 6m										
	$\alpha=0^\circ$		$\alpha=90^\circ$							
	P	C	P1	P2	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
16 m	-2,69	-2,92	2,36	-1,68	-3,84	-2,37	-3,10	-2,92	-1,28	-0,73
20 m	-2,69	-2,99	2,36	-1,68	-3,59	-2,32	-3,06	-2,99	-1,42	-0,75
24 m	-2,69	-3,02	2,36	-1,68	-3,40	-2,27	-3,02	-3,02	-1,51	-0,76
28 m	-2,69	-3,07	2,36	-1,68	-3,03	-2,19	-2,96	-2,96	-1,65	-0,77
32 m	-2,69	-3,11	2,36	-1,58	-2,72	-2,14	-2,91	-2,91	-1,75	-0,78

(c)

AÇÃO DO VENTO										
Tipologias TA										
$V_0 = 30 \text{ m/s}$										
Dist. entre pórticos = 9 m										
Alturalivre = 6m										
	$\alpha=0^\circ$		$\alpha=90^\circ$							
	P	C	P1	P2	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
16 m	-3,23	-3,51	2,83	-2,02	-4,60	-2,85	-3,73	-3,51	-1,53	-0,88
20 m	-3,23	-3,59	2,83	-2,02	-4,30	-2,78	-3,68	-3,59	-1,70	-0,90
24 m	-3,23	-3,63	2,83	-2,02	-4,08	-2,72	-3,63	-3,63	-1,81	-0,91
28 m	-3,23	-3,69	2,83	-2,02	-3,64	-2,63	-3,55	-3,55	-1,98	-0,92
32 m	-3,23	-3,73	-2,83	-2,02	-3,23	-2,56	-3,50	-3,50	-2,10	-0,93

(d)

AÇÃO DO VENTO										
Tipologias TA										
$V_0 = 35 \text{ m/s}$										
Dist. entre pórticos = 6 m										
Alturalivre = 6m										
	$\alpha=0^\circ$		$\alpha=90^\circ$							
	P	C	P1	P2	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
16 m	-3,13	-3,39	2,74	-1,96	-4,45	-2,76	-3,61	-3,61	-1,48	-0,85
20 m	-3,13	-3,46	2,74	-1,96	-4,15	-2,68	-3,55	-3,46	-1,64	-0,87
24 m	-3,13	-3,50	2,74	-1,96	-3,94	-2,63	-3,50	-3,50	-1,75	-0,88
28 m	-3,13	-3,56	2,74	-1,72	-3,51	-2,53	-3,42	-3,42	-1,91	-0,89
32 m	-3,13	-3,60	2,74	-1,60	-3,24	-2,48	-3,38	-3,38	-2,02	-0,90

Tabela 4.4 - Ação do vento nas tipologias TA em função das variações paramétricas (Continuação)

(e)

AÇÃO DO VENTO										
Tipologias TA										
$V_0 = 35 \text{ m/s}$										
Dist. entre pórticos= 7,5 m										
Alturalivre = 6m										
	$\alpha=0^\circ$		$\alpha=90^\circ$							
	P	C	P1	P2	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
16 m	-3,67	-3,98	3,21	-2,29	-5,23	-3,24	-4,23	-3,98	-1,74	-1,00
20 m	-3,67	-4,07	3,21	-2,29	-4,88	-3,15	-4,17	-4,07	-1,93	-1,02
24 m	-3,67	-4,12	3,21	-2,29	-4,63	-3,09	-4,12	-4,12	-2,06	-1,03
28 m	-3,67	-4,18	3,21	-2,29	-4,12	-2,98	-4,02	-4,02	-2,24	-1,04
32 m	-3,67	-4,23	3,21	-2,15	-3,70	-2,91	-3,97	-3,97	-2,38	-1,06

(f)

AÇÃO DO VENTO										
Tipologias TA										
$V_0 = 35 \text{ m/s}$										
Dist. entre pórticos= 9 m										
Alturalivre = 6m										
	$\alpha=0^\circ$		$\alpha=90^\circ$							
	P	C	P1	P2	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
16 m	-4,40	-4,78	3,85	-2,75	-6,27	-3,88	-5,08	-4,78	-2,09	-1,20
20 m	-4,40	-4,88	3,85	-2,75	-5,86	-3,78	-5,00	-4,88	-2,32	-1,22
24 m	-4,40	-4,94	3,85	-2,75	-5,56	-3,70	-4,94	-4,94	-2,47	-1,23
28 m	-4,40	-5,01	3,85	-2,75	-4,95	-3,57	-4,82	-4,82	-2,69	-1,25
32 m	-4,40	-5,08	3,85	-2,75	-4,44	-3,49	-4,76	-4,76	-2,86	-1,27

(g)

AÇÃO DO VENTO										
Tipologias TA										
$V_0 = 40 \text{ m/s}$										
Dist. entre pórticos= 6 m										
Alturalivre = 6m										
	$\alpha=0^\circ$		$\alpha=90^\circ$							
	P	C	P1	P2	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
16 m	-4,09	-4,43	3,58	-2,56	-5,81	-3,60	-4,71	-4,43	-1,94	-1,11
20 m	-4,09	-4,52	3,58	-2,56	-5,43	-3,50	-4,63	-4,52	-2,15	-1,13
24 m	-4,09	-4,58	3,58	-2,56	-5,15	-3,43	-4,58	-4,58	-2,29	-1,14
28 m	-4,09	-4,64	3,58	-2,25	-4,58	-3,31	-4,47	-4,47	-2,59	-1,16
32 m	-4,09	-4,70	3,58	-2,04	-4,11	-3,23	-4,41	-4,41	-2,64	-1,17

Tabela 4.4 - Ação do vento nas tipologias TA em função das variações paramétricas (Continuação)

(h)

AÇÃO DO VENTO										
Tipologias TA										
V <sub>0</sub> = 40 m/s										
Dist. entre pórticos = 7,5 m										
Alturalivre = 6m										
	α=0°		α=90°							
	P	C	P1	P2	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
16 m	-4,79	-5,20	4,19	-2,99	-6,83	-4,23	-5,53	-5,20	-2,28	-1,30
20 m	-4,79	-5,31	4,19	-2,99	-6,37	-4,12	-5,44	-5,31	-2,52	-1,33
24 m	-4,79	-5,38	4,19	-2,99	-6,05	-4,03	-5,38	-5,38	-2,69	-1,34
28 m	-4,79	-5,46	4,19	-2,99	-5,39	-3,89	-5,26	-5,26	-2,93	-1,37
32 m	-4,79	-5,53	4,19	-2,81	-4,84	-3,80	-5,18	-5,18	-3,11	-1,38

(i)

AÇÃO DO VENTO										
Tipologias TA										
V <sub>0</sub> = 40 m/s										
Dist. entre pórticos = 9 m										
Alturalivre = 6m										
	α=0°		α=90°							
	P	C	P1	P2	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
16 m	-5,75	-6,24	5,03	-3,59	-8,19	-5,07	-6,63	-6,24	-2,73	-1,56
20 m	-5,75	-6,37	5,03	-3,59	-7,65	-4,94	-6,53	-6,37	-3,03	-1,59
24 m	-5,75	-6,45	5,03	-3,59	-7,26	-4,84	-6,45	-6,45	-3,23	-1,61
28 m	-5,75	-6,55	5,03	-3,59	-6,47	-4,67	-6,31	-6,31	-3,52	-1,64
32 m	-5,75	-6,63	5,03	-3,59	-5,80	-4,56	-6,22	-6,22	-3,73	-1,66

## 4.2. Combinações de Ações

Os critérios para combinação das ações, ou seja, que há probabilidade de ocorrer simultaneamente num período de tempo, estão definidos na NBR8800:2008 (ABNT, 2008). Na referida norma está prescrito as seguintes combinações de ações:

- Combinação 01 - 1,25 x G (peso próprio) + 1,5 x Q (sobrecarga);
- Combinação 02 - 1,0 x G (peso próprio) + 1,4 x V90° (vento transversal).
- Combinação 03 - 1,0 x G (peso próprio) + 1,4 x V0° (vento longitudinal).

## **4.3. Análise Estrutural**

### **4.3.1. Estratégias de Análise Estrutural**

O tipo de análise estrutural pode ser classificado de acordo com o comportamento do material e dos efeitos dos deslocamentos da estrutura.

Tendo em vista o comportamento do material estrutural, pode-se desenvolver uma análise global elástica (diagrama tensão-deformação elástico-linear) ou uma análise global plástica (diagrama tensão-deformação rígido-plástico, elastoplástico perfeito ou elastoplástico não-linear). Este segundo tipo de análise é normalmente designado análise não-linear física.

Quanto aos efeitos dos deslocamentos da estrutura, pode-se realizar uma análise linear (teoria de primeira ordem), com base na geometria indeformada da estrutura, ou uma análise não-linear, com base na geometria deformada da estrutura. Este segundo tipo de análise é normalmente designado como análise não-linear geométrica. A análise não-linear geométrica deve ser usada sempre que os deslocamentos afetarem de forma significativa os esforços internos. Essa análise pode ter como base teorias geometricamente exatas, teorias aproximadas ou adaptações a resultados da teoria de primeira ordem.

A escolha de um tipo de análise deve assegurar principalmente que os resultados obtidos serão representativos do real comportamento da estrutura.

Segundo a NBR 8800:2008 (ABNT, 2008), a análise estrutural deve ser feita com um modelo realista, que permita representar a resposta da estrutura e dos materiais estruturais, levando-se em conta as deformações causadas por todos os esforços solicitantes relevantes. Onde necessário, a interação solo-estrutura e o comportamento das ligações devem ser contemplados no modelo.

A NBR 8800:2008 (ABNT, 2008) prescreve que para a verificação da estabilidade global da estrutura deve ser realizada uma análise de segunda ordem que inclua as imperfeições iniciais das vigas e pilares a serem contidos lateralmente.

Tendo em vista que as estruturas típicas de galpões de uso geral são pórticos planos de um só pavimento, normalmente de pequena deslocabilidade lateral, e que o objetivo principal deste trabalho é comparar o desempenho de soluções estruturais,

opta-se pela realização de uma análise elástica e de primeira ordem. Logicamente, uma avaliação dos efeitos de segunda ordem pode ser objeto de trabalhos futuros dentro desta mesma linha de pesquisa.

### **4.3.2. Programas Computacionais Utilizados na Análise Estrutural**

No mercado internacional existem diversos programas computacionais para análise estrutural, amplamente empregados na avaliação do comportamento de um grande número de problemas de engenharia. Muitos desses programas são baseados no Método dos Elementos Finitos, enquanto outros, que estão limitados a elementos de barras, utilizam o Método dos Deslocamentos.

Neste trabalho utiliza-se o programa computacional mCalc2008 para realização das análises estruturais e dimensionamento dos modelos. O mCalc2008 é um programa integrado de análise e dimensionamento de estruturas de aço desenvolvido pela empresa Stabile Engenharia Ltda., situada em Porto Alegre-RS. No Anexo A apresentam-se as principais características do programa mCalc2008.

Para validação dos resultados da análise estrutural gerados pelo mCalc2008, realizou-se uma comparação com resultados gerados por meio dos programas computacionais SAP 2000 v10, STRAP v12.5 e FTool v2.11. Os resultados desta comparação são apresentados no Anexo B.

## **4.4. Dimensionamento dos Modelos**

### **4.4.1. Bases para Dimensionamento**

As normas internacionais atuais para dimensionamento de estruturas metálicas e mistas são baseadas no Método dos Estados Limites.

De acordo com o Método dos Estados Limites, exige-se que nenhum estado limite aplicável seja excedido quando a estrutura for submetida a todas as combinações apropriadas de ações. Se um ou mais estados limites forem excedidos, a estrutura não atende mais aos objetivos para os quais foi projetada. Devem ser considerados os estados limites últimos (ELU) e os estados limites de serviço (ELS).

Os estados limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil, durante a construção ou quando atuar uma ação especial ou excepcional. Os estados limites de serviço estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de utilização.

A NBR 8800:2008 (ABNT, 2008) é baseada no Método dos Estados Limites e aplica-se às estruturas de edifícios destinados à habitação, de edifícios de usos comerciais e industriais e de edifícios públicos. Aplica-se também às estruturas de passarelas de pedestres e a suportes de equipamentos. Esta Norma não abrange o dimensionamento de elementos estruturais constituídos por perfis formados a frio, que deve ser feito de acordo com a ABNT NBR 14762 (ABNT, 2001).

#### **4.4.2. Deslocamentos dos Pórticos Transversais**

Os deslocamentos excessivos, horizontais e verticais, são limitados conforme o Anexo C da NBR8800:2008 (ABNT, 2008) para verificar o Estado Limite de Utilização. Em edifícios industriais o deslocamento horizontal máximo ( $\Delta H$ ) é de  $H/400$  a  $H/200$ , onde  $H$  é a altura total da coluna. O deslocamento vertical máximo ( $\Delta V$ ) é de  $L/180$ , sendo  $L$  o vão teórico entre apoios.

Como mencionado no item anterior, este estudo considerou quatro casos de carga. O maior deslocamento horizontal é causado pelo vento transversal ( $W90^\circ$ ). As demais ações ( $G$ ,  $Q$  e  $W0^\circ$ ) são responsáveis pelos maiores deslocamentos verticais. Nas Figuras 4.7 e 4.8 são mostradas as deformações típicas de um modelo de pórtico transversal com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros (BP-24). Para cada caso indica-se a posição onde devem ser verificados os deslocamentos máximos verticais e horizontais.

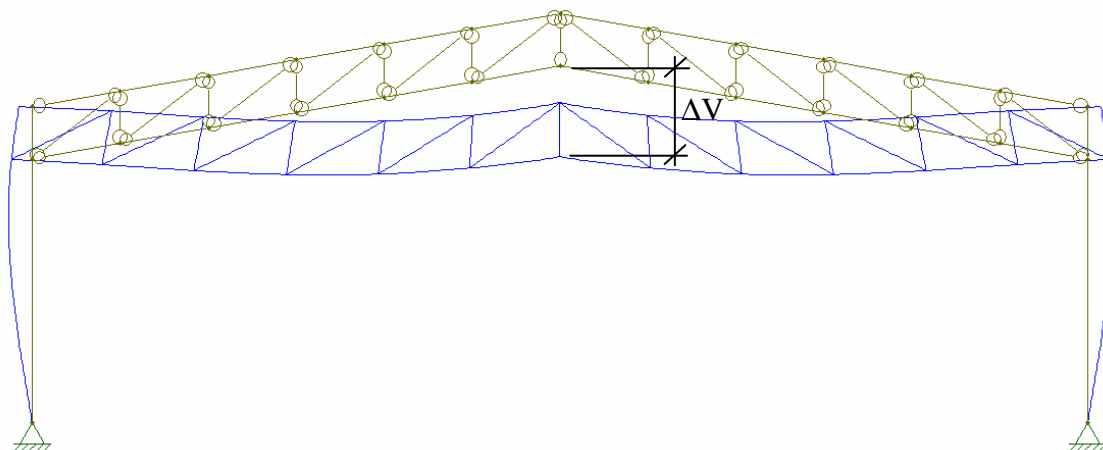


Figura 4.7 - Deslocamento vertical típico de um pórtico com treliça trapezoidal (BP).

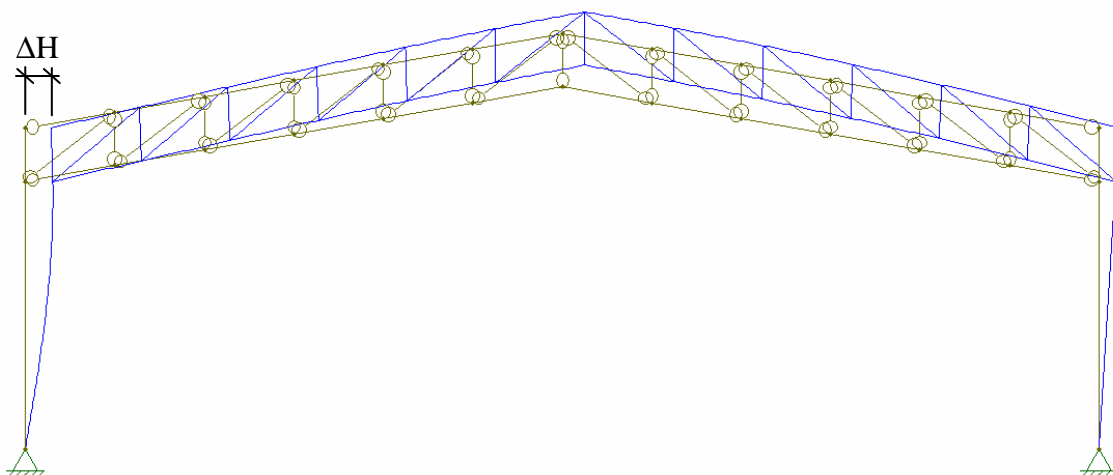


Figura 4.8 - Deslocamento horizontal típico de um pórtico com treliça trapezoidal (BP).

Neste trabalho, a verificação dos deslocamentos vertical e horizontal máximos foi feita com base no critério indicado no Anexo C da NBR8800:2008 (ABNT, 2008). Recomenda-se considerar para o deslocamento vertical máximo a sobrecarga de cobertura que se estabelece um valor máximo de  $L/250$  para o caso de estrutura biapoiadas, suportando elementos de cobertura elásticos. Para verificação do deslocamento horizontal máximo, recomenda-se levar em conta a ação do vento e estabelecer um valor máximo médio de  $H/300$ .

#### 4.4.3. Programas Computacionais Utilizados no Dimensionamento

No Brasil, estão disponíveis alguns programas para o dimensionamento de elementos estruturais formados por perfis de aço laminados ou soldados, dentre eles o

DESMET v2.08 (Veríssimo et al., 1998) e o VISUAL METAL (Pravia et al., 2007). Estes programas têm por base o dimensionamento segundo o Método dos Estados Limites, mas ainda não cobrem o dimensionamento segundo a NBR 8800:2008 (ABNT, 2008), que entrou em vigor a partir do mês de setembro de 2008.

Para o dimensionamento de perfis formados a frio, também existem alguns programas disponíveis no Brasil dentre eles o DimPerfil V1.1 (Pignatta et al., 2007) e mCalcPerfis2008 (Carvalho et al., 2009).

Neste trabalho utiliza-se o programa computacional mCalc2008 para dimensionamento dos modelos. O mCalc2008 (Carvalho et al., 2009) permite o dimensionamento integrado com a análise estrutural de perfis de aço laminados ou soldados de acordo com a NBR 8800:2008 (ABNT, 2008) e perfis formados a frio segundo a NBR 14762:2001 (ABNT, 2001).

Para validação dos resultados do dimensionamento gerados pelo mCalc2008, realizou-se uma comparação com resultados gerados por meio de uma rotina de cálculo desenvolvida no programa computacional Mathcad v14. Os resultados desta comparação são apresentados no Apêndice B.

## **4.5. Resultados da Análise e Dimensionamento dos Modelos**

Para exemplificar o trabalho realizado nos 245 modelos analisados, optou-se em apresentar o resultado da análise e dimensionamento de um único modelo. O modelo selecionado é designado por G-BP-V24-L6-V35 que representa um galpão com pórticos transversais com treliça de Banzos Paralelos (BP), vão livre de 24 metros, distância entre os pórticos transversais de 6,0 metros e velocidade básica do vento  $V_o = 35\text{m/s}$ , conforme se apresenta nas Figura 4.9 e 4.10.

Na Figura 4.9 representa-se o modelo BP em forma tridimensional somente para efeitos de visualização do caso selecionado no estudo paramétrico. Devido às características estruturais dos galpões que compõem o estudo paramétrico, com a repetição de pórticos planos transversais estabilizados longitudinalmente, as análises estruturais envolvem basicamente a avaliação do comportamento de pórticos planos e do comportamento de terças e elementos de contraventamento.



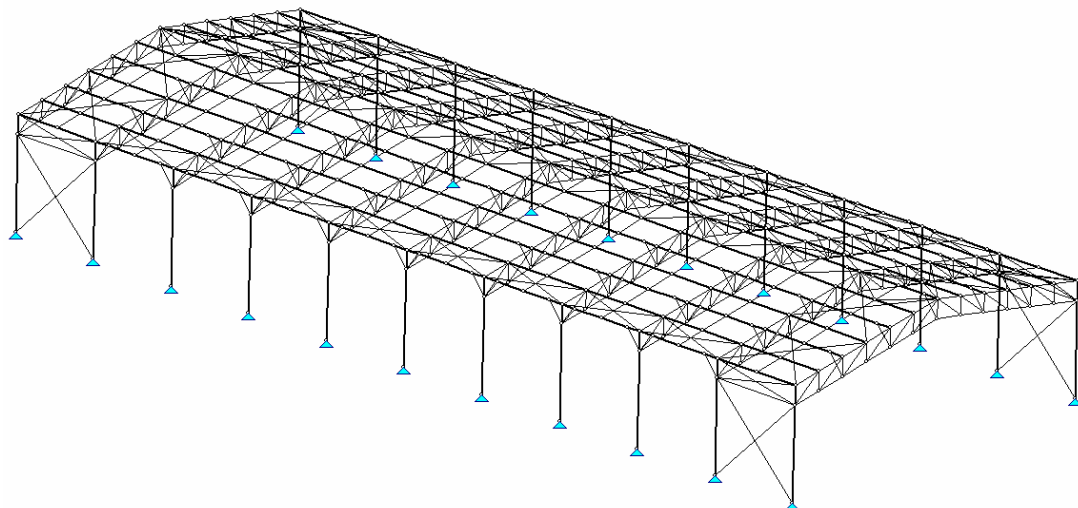


Figura 4.9 - Visão tridimensional do modelo G-BP-V24-L6-V35.

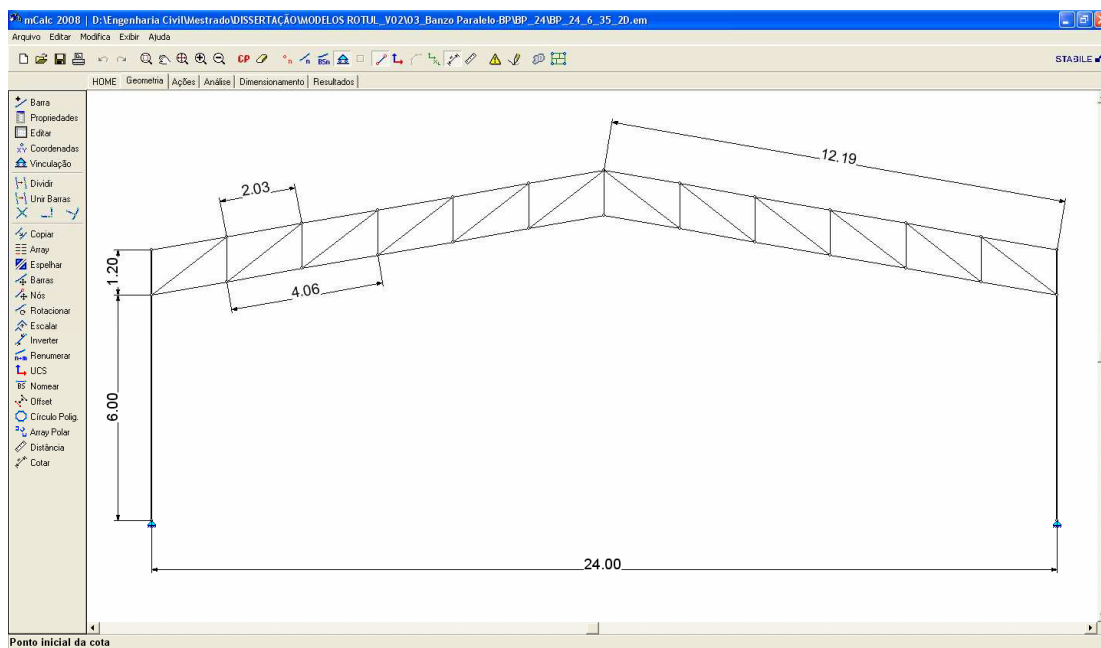


Figura 4.10 - Pórtico transversal com treliça de banzos paralelos referente ao modelo G-BP-V24-L6-V35.

No pórtico transversal da Figura 4.10, os elementos que compõem a viga treliçada de cobertura são definidos como barras de treliça plana, sujeitas somente a esforços axiais. As colunas são definidas como barras de pórtico plano, sujeitas a esforço axial, momento fletor e esforço cortante. Considera-se ainda que as colunas estão rotuladas nas bases. Por fazerem parte de uma treliça plana, as barras de extremidade da viga treliçada de cobertura não transmitem momentos para a coluna,

mas o braço de alavanca formado entre o banzo superior e o inferior confere uma continuidade da viga de treliçada de cobertura com a coluna do pórtico.

Na Figura 4.9 pode-se observar que são utilizadas mãos-francesas entre as terças e os nós do banzo inferior das vigas treliçadas de cobertura. Tendo em vista que é considerada a continuidade das terças de cobertura, as mãos francesas desempenham um papel fundamental de travamento lateral do banzo inferior da treliça de cobertura. Por outro lado, considera-se que o banzo superior está contido lateralmente nos pontos de interseção das linhas que passam pelas terças que compõem o contraventamento frontal do galpão com o pórtico transversal. Portanto, no caso do modelo G-BP-V24-L6-V35, considera-se um comprimento de flambagem de 203cm com relação aos eixos x e y para o banzo superior e 406cm para o banzo inferior, pois as mãos-francesas estão dispostas em terças alternadas.

Para os modelos com pórtico transversal de alma cheia considerou-se um procedimento semelhante para o travamento lateral da viga de cobertura. Ou seja, a mesa superior do perfil está contida lateralmente nos pontos de interseção das linhas que passam pelas terças que compõem o contraventamento frontal do galpão com o pórtico transversal e a mesa inferior está contida nos pontos onde são dispostas as mãos-francesas.

#### **4.5.1. Análise Estrutural do Modelo G-BP-V24-L6-V35**

Nas Figuras 4.11 e 4.12 mostra-se a aplicação das ações devidas ao peso próprio e sobrecarga de cobertura no modelo estrutural. Já nas Figuras 4.13 e 4.14 são indicadas as ações devidas ao vento longitudinal ( $V0^\circ$ ) e ao vento transversal ( $V90^\circ$ ), respectivamente.

Ao atuar sobre o galpão, o vento incide sobre as telhas da cobertura e de tapamento lateral, que transferem esta ação para as terças de cobertura e travessas de tapamento, respectivamente. Por esse motivo deve-se aplicar as ações sobre os nós do pórtico transversal. Quando o usuário define que a viga de cobertura é uma viga treliçada, o programa mCalc2008 transmite as ações linearmente distribuídas para os nós da estrutura.

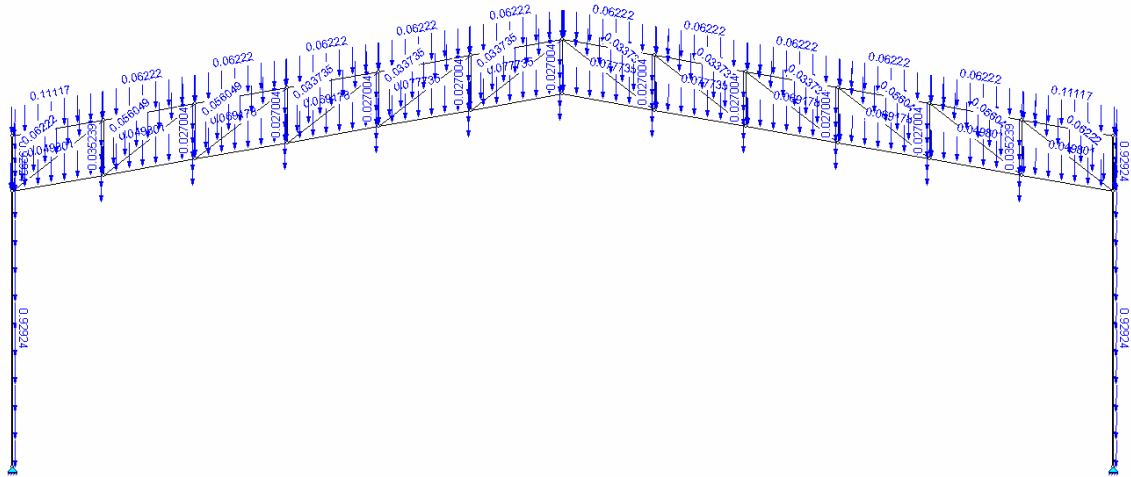


Figura 4.11 - Ações devidas ao peso próprio de cobertura (G) em kN/m do modelo G-BP-V24-L6-V35.

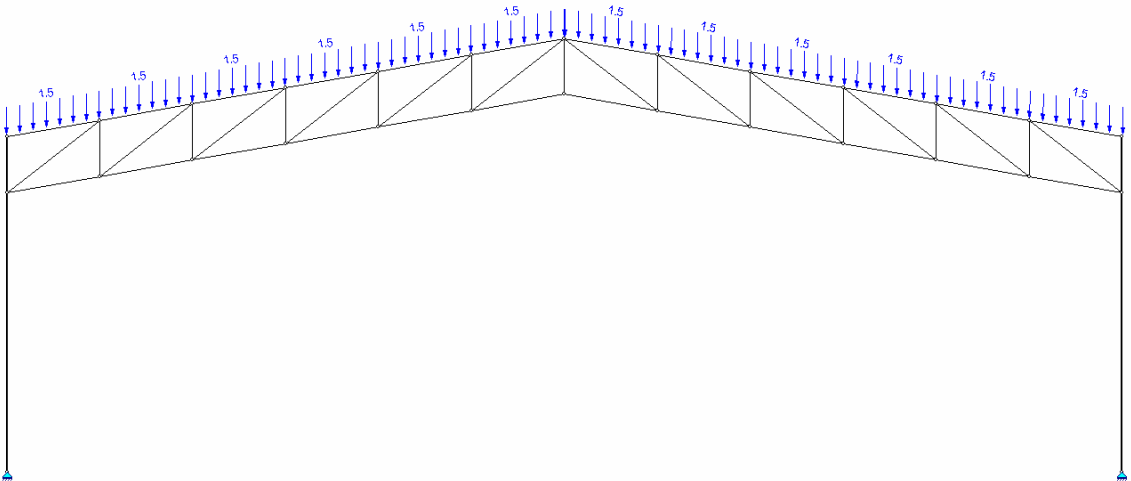


Figura 4.12 - Ações devidas à sobrecarga de cobertura (Q) em kN/m do modelo G-BP-V24-L6-V35.

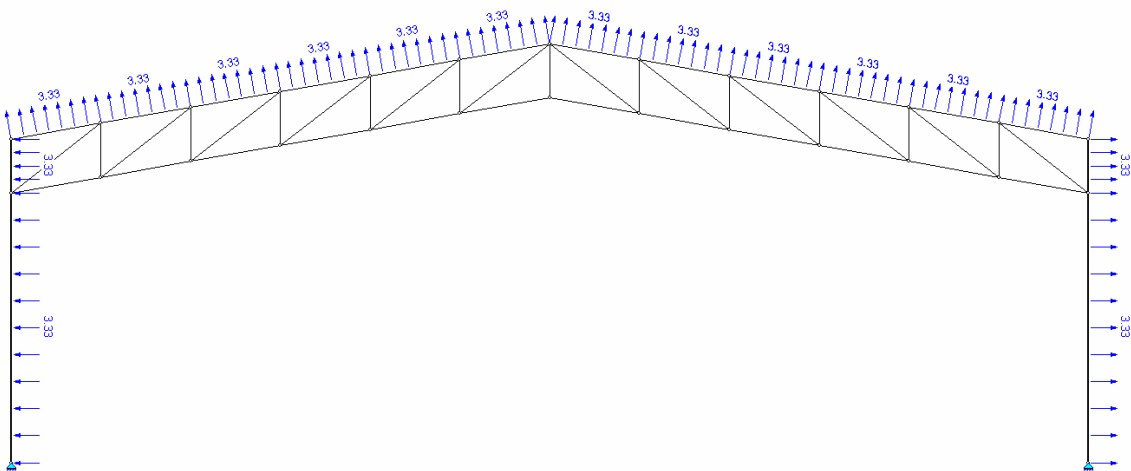


Figura 4.13 - Ações devidas ao vento longitudinal ( $V_0^0$ ) em kN/m do modelo G-BP-V24-L6-V35.

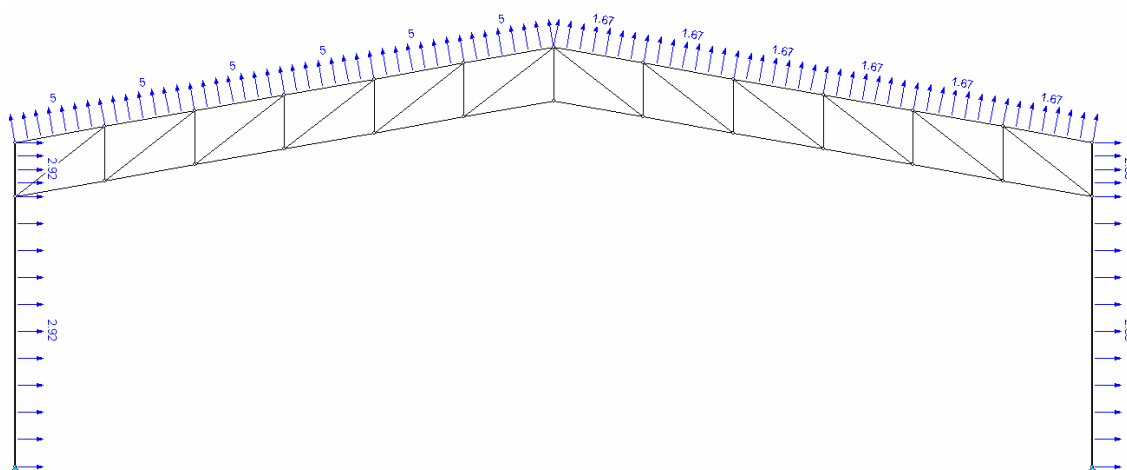


Figura 4.14 - Ações devidas ao vento transversal ( $V90^{\circ}$ ) em kN/m do modelo G-BP-V24-L6-V35.

As vinculações das barras que compõem o pórtico transversal, como todas as diagonais e montantes, são rotuladas nas suas extremidades. Esta consideração é definida automaticamente pelo programa quando o usuário define que a viga de cobertura é uma viga treliçada. Como foram definidas no Capítulo 3, as colunas são rotuladas na base tanto na direção do pórtico transversal quanto na direção perpendicular ao mesmo.

Assim como está descrito no Apêndice A o mCalc2008 não interage seu processo de análise com o usuário, sendo efetuado automaticamente. Depois de efetuada a solução do sistema de equações é possível combinar as ações (ponderar e somar) um estado com outro, com o intuito de reproduzir um carregamento real na estrutura, sendo possível obter as envoltórias máximas e mínimas de cada combinação de ações, nó por nó, e barra por barra.

Os resultados das análises estão ilustrados nas Figuras 4.15 a 4.23 que mostram os diagramas de esforços axiais, esforços cortantes e momentos fletores devido às combinações COMB1, COMB2 e COMB3, respectivamente.

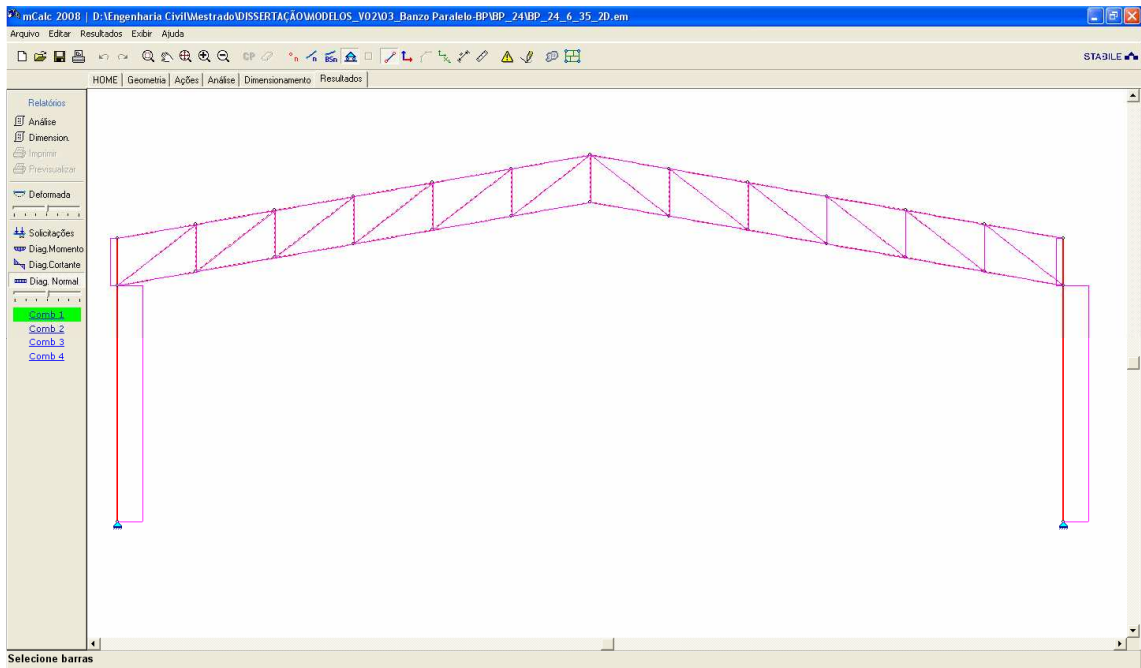


Figura 4.15 - Diagrama de esforços axiais devida à COMB1 (1,25G + 1,5Q).

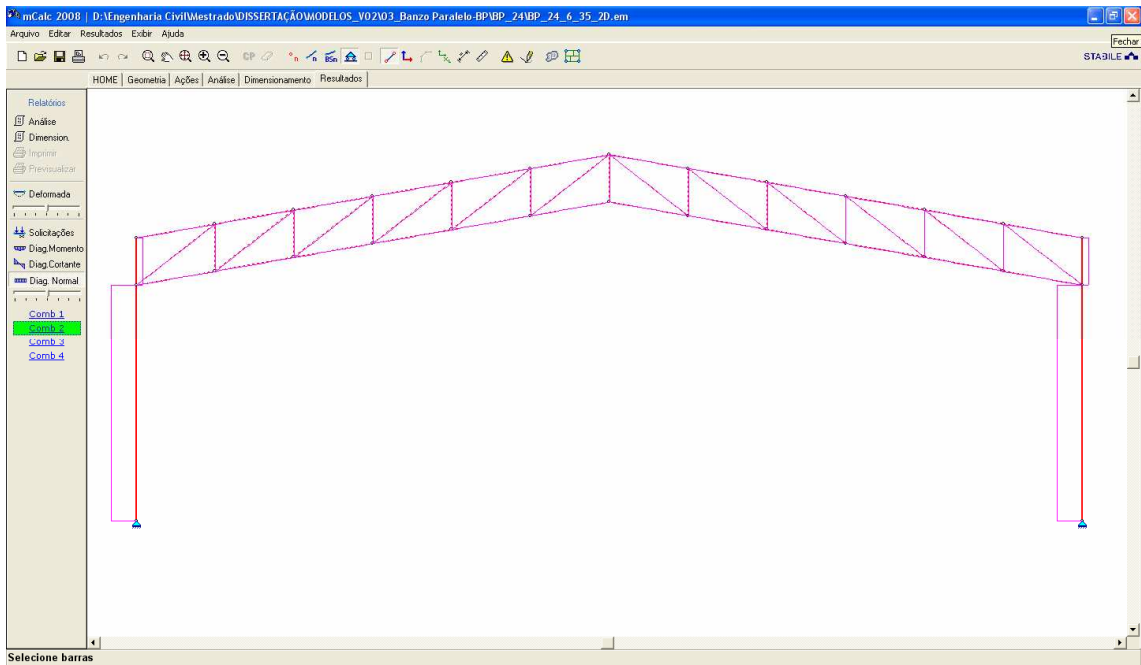


Figura 4.16 - Diagrama de esforços axiais devida à COMB2 (G + 1,4V<sup>0</sup>).

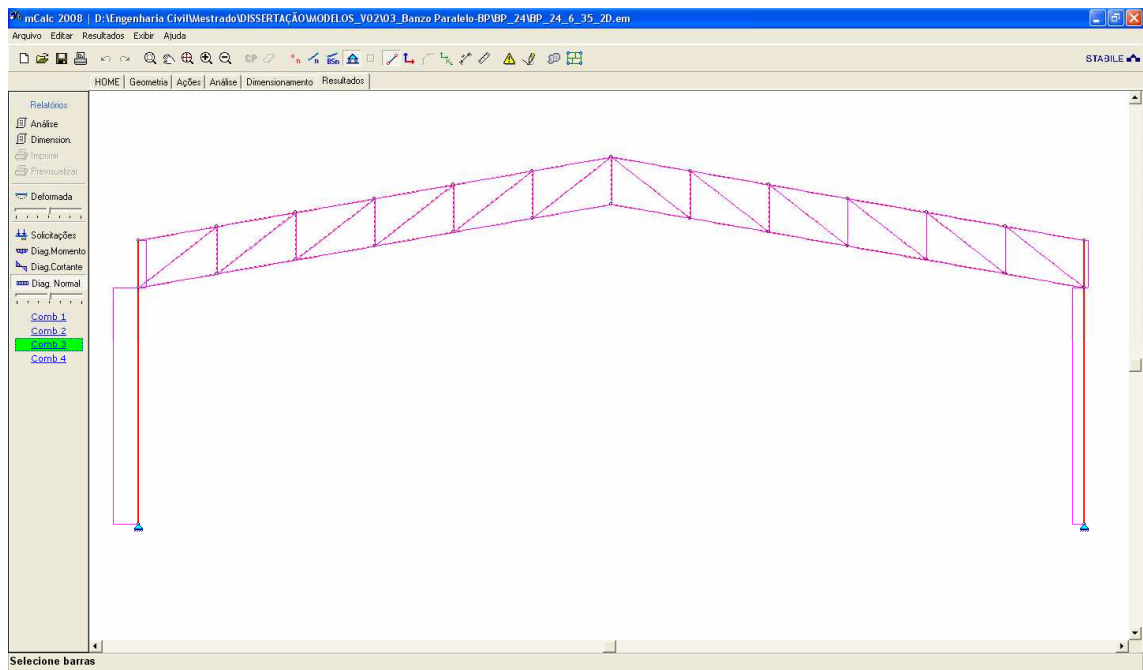


Figura 4.17 - Diagrama de esforços axiais devida à COMB3 ( $G + 1,4V90^\circ$ ).

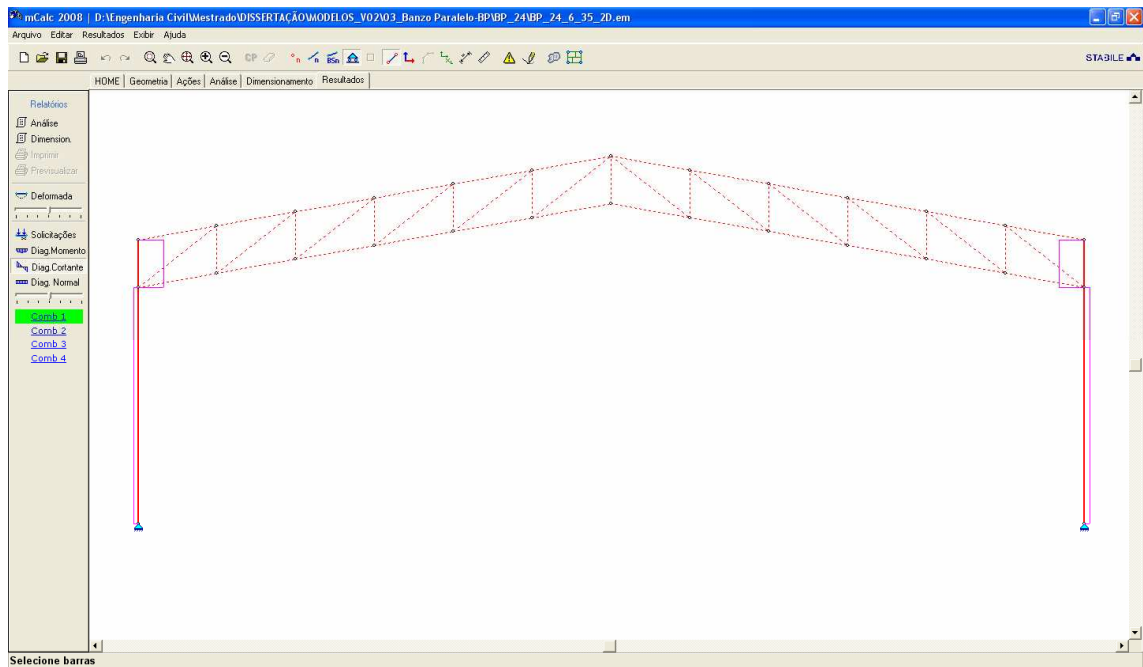


Figura 4.18 - Diagrama de esforços cortante devida à COMB1 ( $1,25G + 1,5Q$ ).

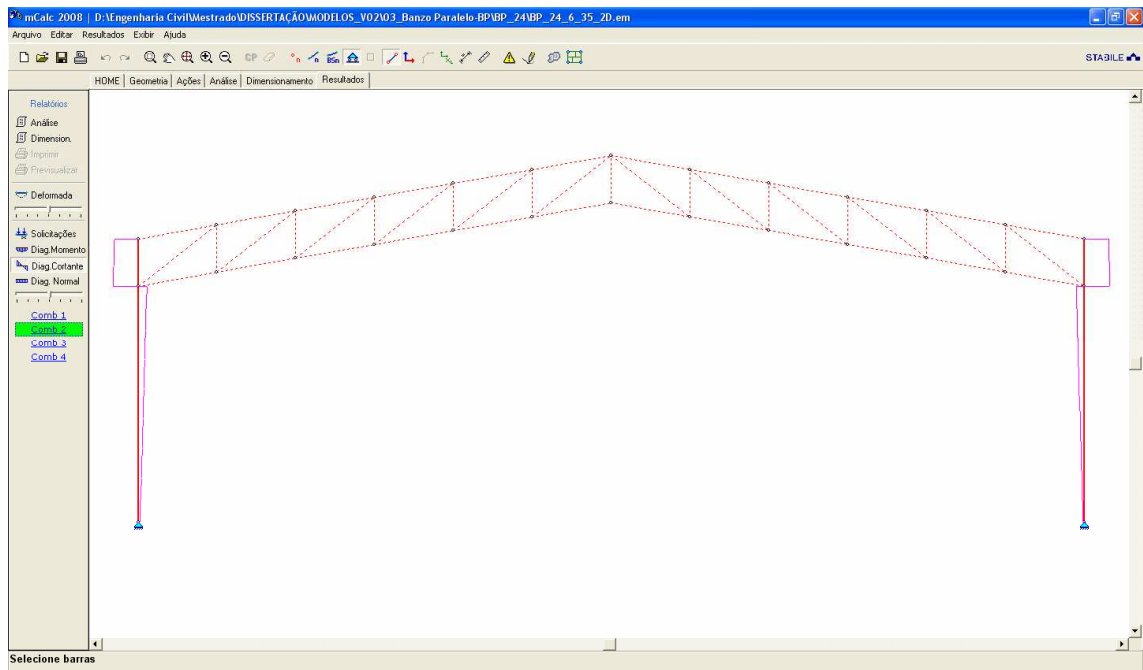


Figura 4.19 - Diagrama de esforços cortante devida à COMB2 ( $G + 1,4V0^{\circ}$ ).

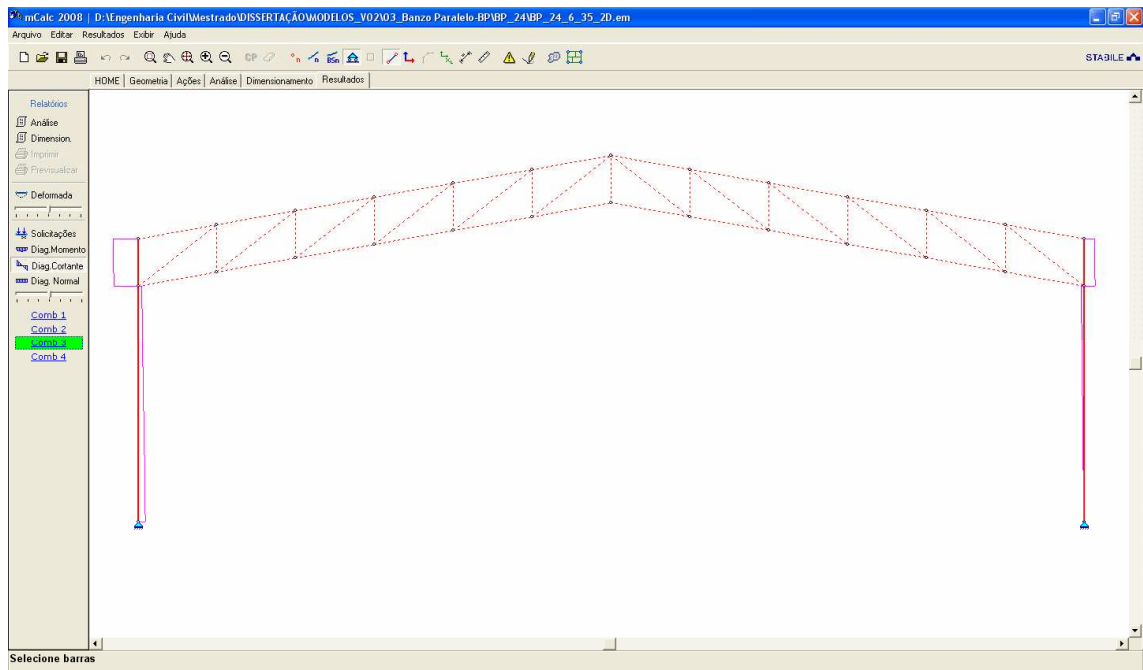


Figura 4.20 - Diagrama de esforços cortante devida à COMB3 ( $G + 1,4V90^{\circ}$ ).

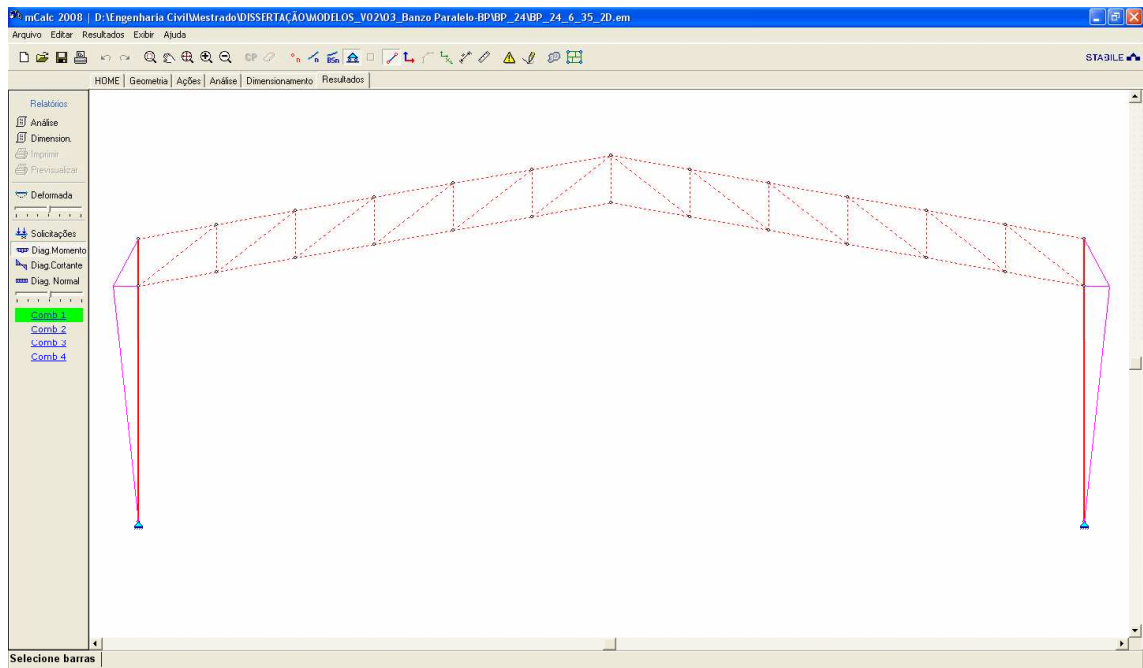


Figura 4.21 - Diagrama de momentos fletores devida à COMB1 (1,25G + 1,5Q).

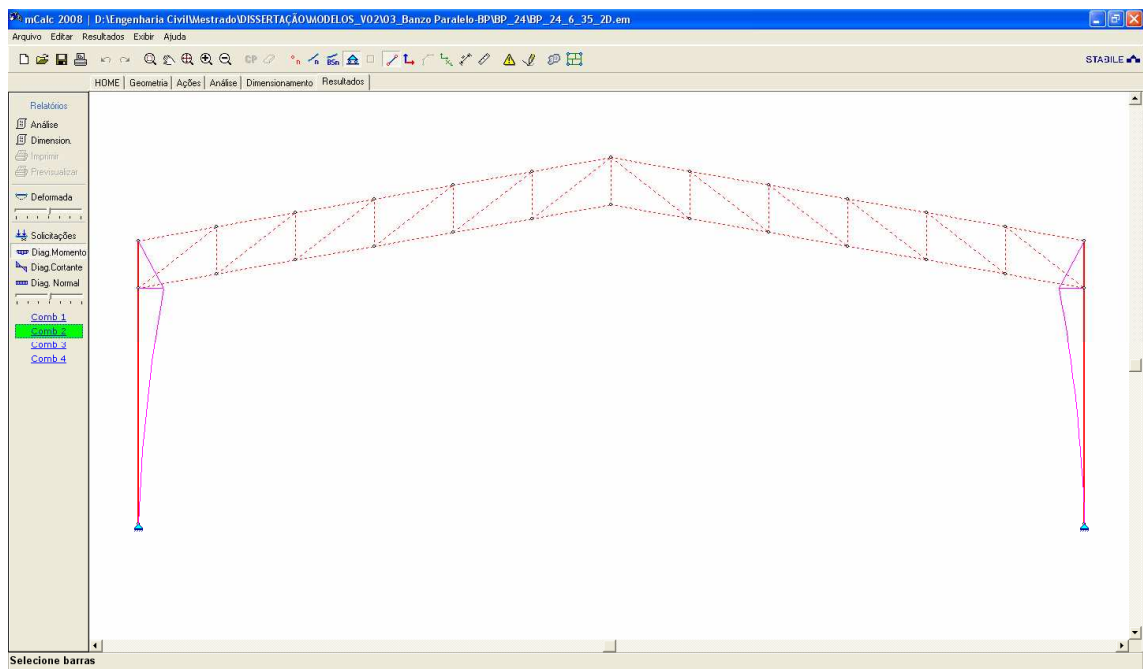


Figura 4.22 - Diagrama de momentos fletores devida à COMB2 (G + 1,4V0<sup>0</sup>).



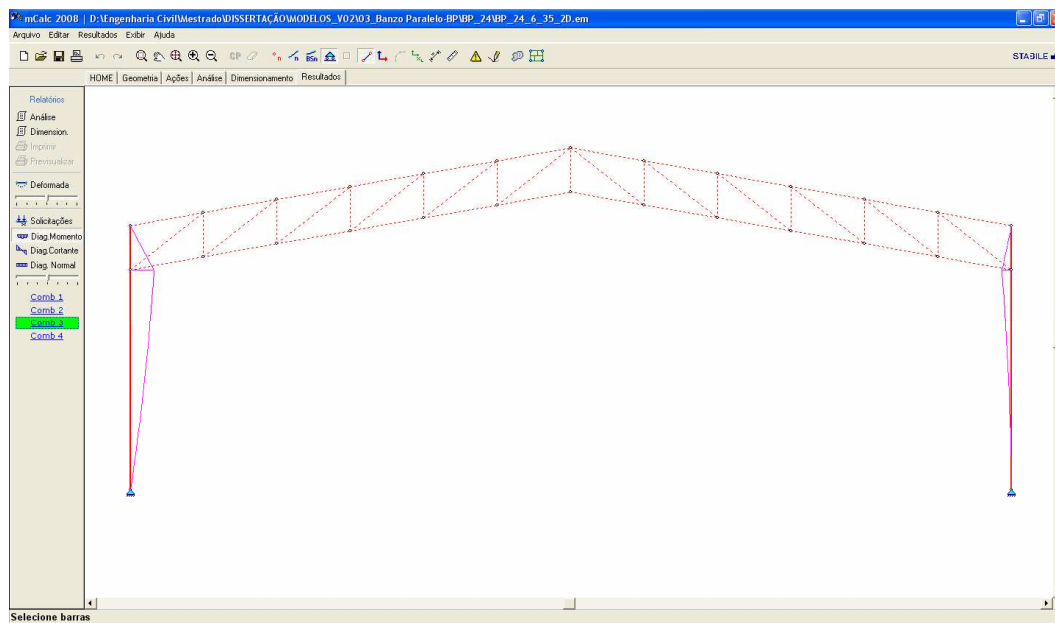


Figura 4.23 - Diagrama de momentos fletores devida à COMB3 ( $G + 1,4V90^\circ$ ).

## 4.5.2. Dimensionamento do Modelo G-BP-V24-L6-V35

### a) Estado Limite Último

O processo de verificação é feito por meio de barras (uma ou um conjunto), após selecionar o tipo de perfil e suas dimensões, de forma que o módulo de dimensionamento permite determinar as resistências de cálculo do perfil e posteriormente, comparar os resultados com as solicitações de cálculo obtidas na análise.

Esse procedimento, embora seja o de verificação, é também conhecido como dimensionamento paramétrico, ou simplesmente, dimensionamento de uma barra ou um conjunto de barras.

As verificações dos perfis são definidas de acordo com a norma a qual ele se adequou. No caso de selecionar perfis laminados ou soldados, os cálculos são feitos com base na NBR 8800:2008 (ABNT, 2008). No caso de perfis formados a frio os cálculos seguirão os procedimentos prescritos pela NBR 14762:2001 (ABNT, 2001).

Na Figura 4.24 apresentam-se os resultados da verificação preliminar de seções transversais. Os resultados apresentados indicam a relação de tensão  $N_d/R_d$  para a combinação mais desfavorável em cada barra do pórtico transversal. Valores de  $N_d/R_d$  menores de 1,00 indicam que a barra atende ao critério de estado limite. Na Figura 4.24 podem ser observadas duas diagonais que excederam a relação de esforços  $N_d/R_d = 1,08$  para a combinação crítica de ações (COMB1).

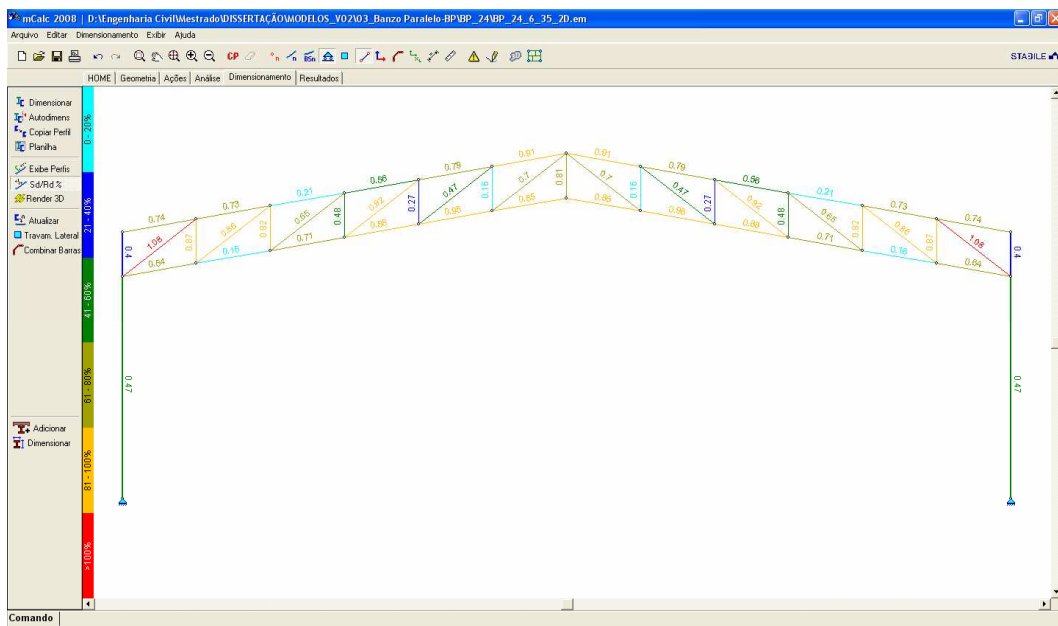


Figura 4.24 - Verificação das seções transversais do modelo G-BP-V24-L6-V35.

Após a verificação preliminar das seções transversais, procede-se à verificação final das seções no módulo dimensionamento com o auxílio de uma calculadora denominada mCalcPerfis. Esta calculadora é integrada ao programa mCalc2008 para o cálculo dos perfis de aço. Na Figura 4.25 mostra-se a verificação das diagonais que apresentaram a relação de esforços  $N_d/R_d = 1,08$ .

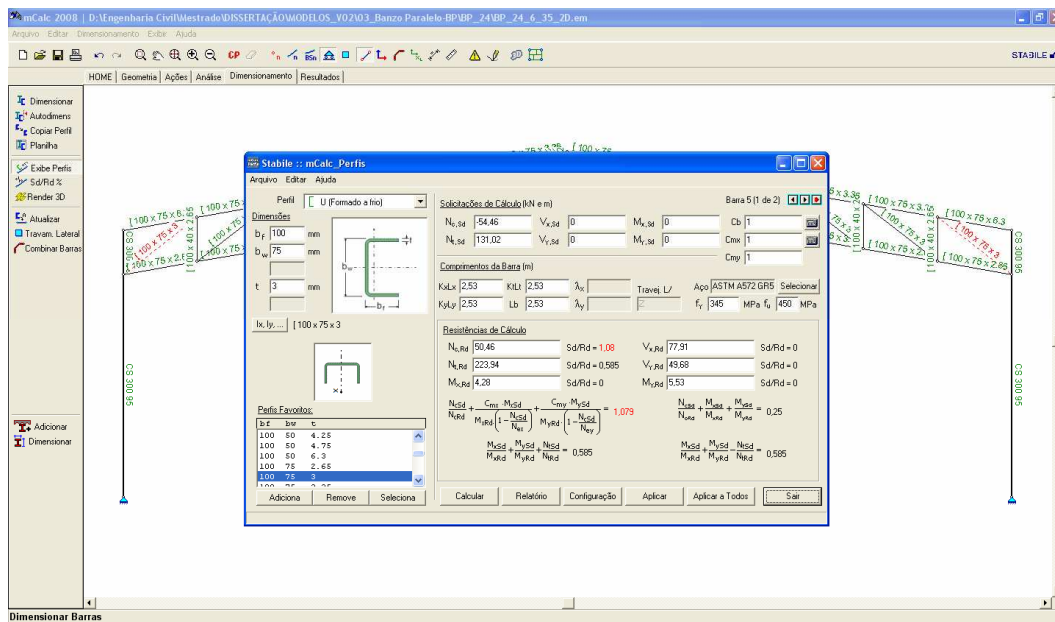


Figura 4.25 - Verificação das diagonais que apresentaram a relação de tensões  $N_d/R_d = 1,08$  do modelo G-BP-V24-L6-V35.

A Figura 4.26 ilustra a escolha de outro perfil em função do esforço de cálculo (Nd) e os comprimentos de flambagem correspondentes. Com o novo perfil a relação de esforços passa a ser  $N_d/R_d = 0,86$  o que está de acordo com os critérios da NBR14762:2001 (ABNT, 2001).

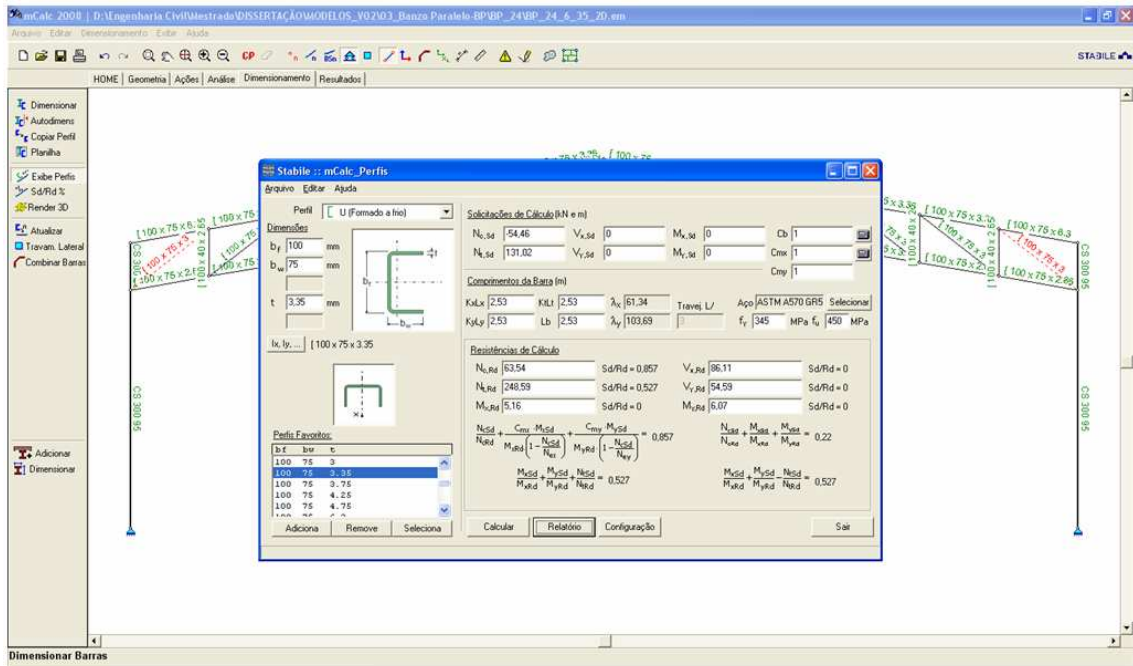


Figura 4.26 - Redimensionamento das diagonais do modelo G-BP-V24-L6-V35.

## b) Estado Limite de Serviço

Neste trabalho a verificação dos deslocamentos vertical e horizontal máximos foi feita com base no critério indicado no Anexo C da NBR8800:2008 (ABNT, 2008). Recomenda-se considerar para o deslocamento vertical máximo a sobrecarga de cobertura que se estabelece um valor máximo de  $L/250$  para o caso de estrutura biapoiadas, suportando elementos de cobertura elásticos. Para verificação do deslocamento horizontal máximo, recomenda-se levar em conta a ação do vento e estabelecer um valor máximo médio de  $H/300$ .

Para garantir as limitações dos deslocamentos segundo as prescrições do ANEXO C da NBR 8800:2008 (ABNT, 2008), realizou-se uma verificação dos deslocamentos horizontais e verticais. As Figuras 27 e 28 ilustram os resultados do deslocamento horizontal do nó 3 e deslocamento vertical do nó 14 do pórtico em análise.

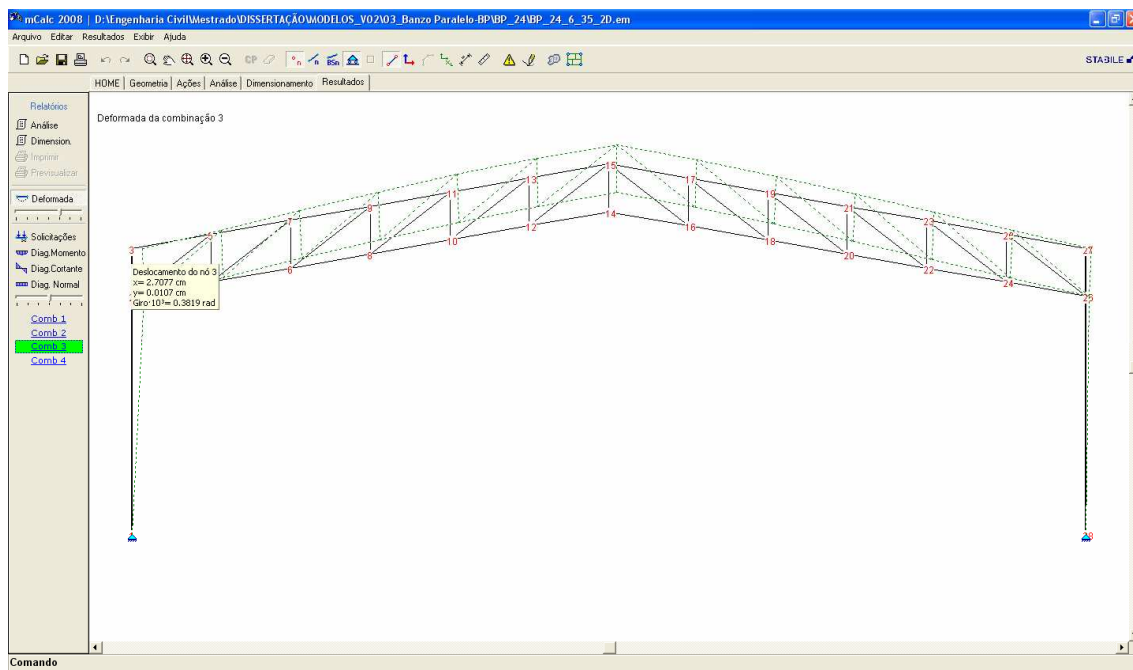


Figura 4.27 - Deslocamento horizontal do nó 3 do modelo G-BP-V24-L6-V35.

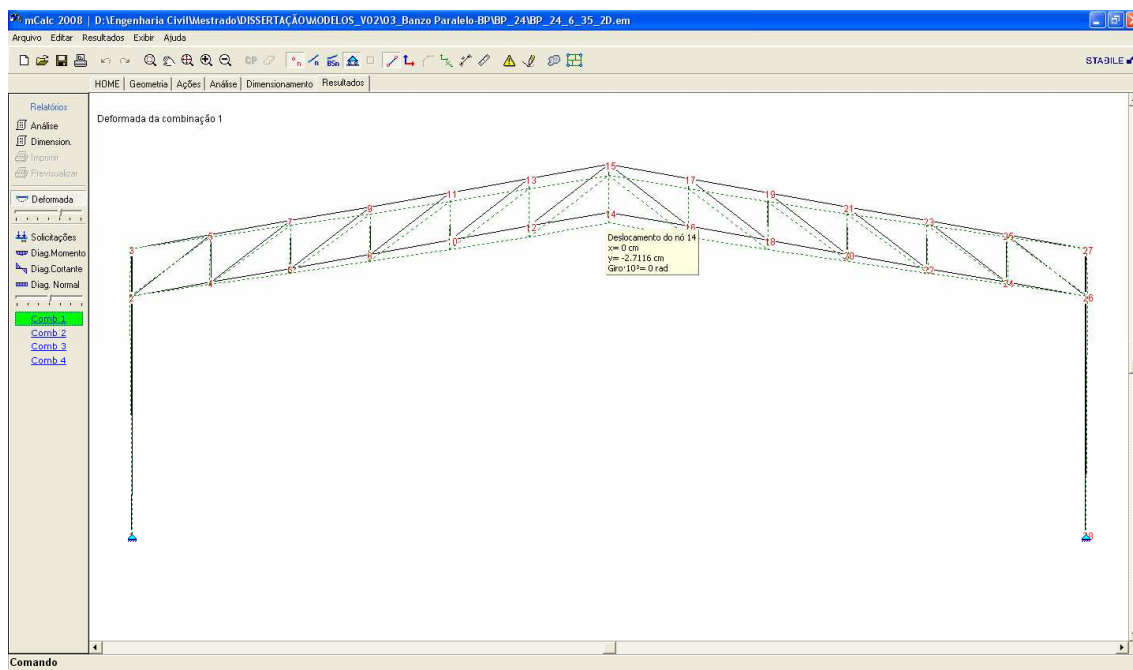


Figura 4.28 - Deslocamento vertical do nó 14 do modelo G-BP-V24-L6-V35.

Como pode-se observar, os deslocamentos verticais estão de acordo com a limitação prevista ( $L/250 = 9,6\text{cm}$ ), mas o deslocamento horizontal excede o valor

previsto ( $H/300 = 2,4\text{cm}$ ). Após a análise de deformação da estrutura procede-se uma retro análise do pórtico transversal com o objetivo de diminuir o deslocamento horizontal. Neste caso, a solução foi aumentar a inércia da coluna substituindo o perfil CS 300x95kg/m pelo perfil CS 350x93kg/m. Desta forma, o deslocamento atende os limites estabelecidos. A Figura 4.29 representa o deslocamento horizontal depois da substituição dos perfis das colunas.

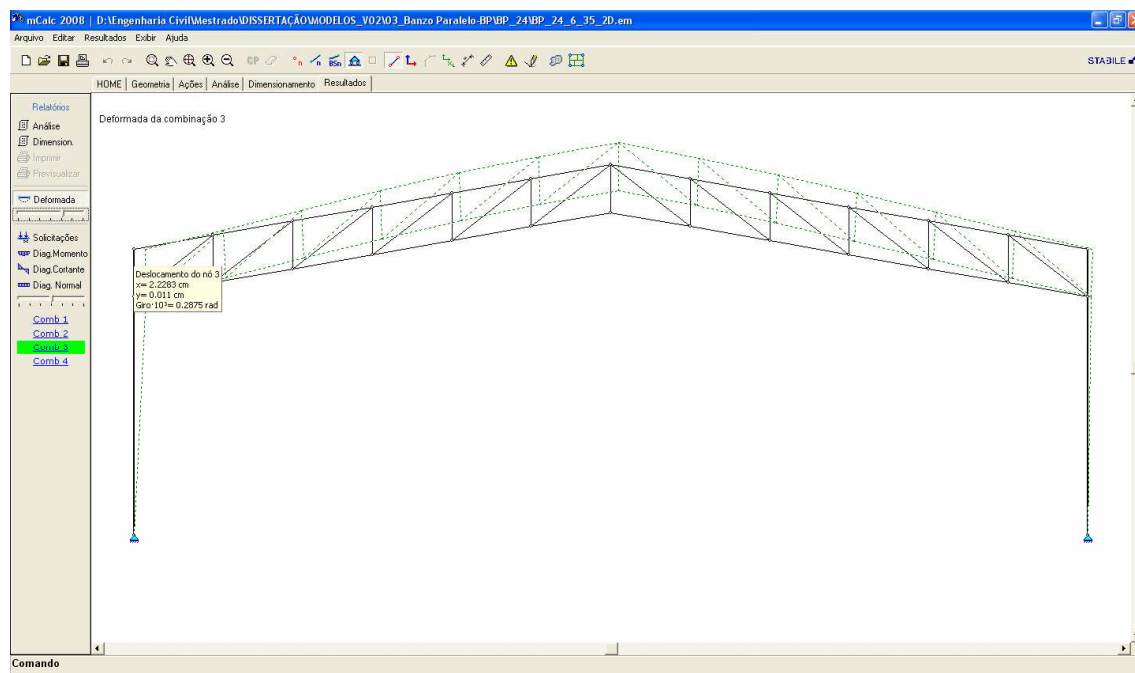


Figura 4.29 - Deslocamento do nó 3 após a retro análise do modelo G-BP-V24-L6-V35.

### 4.5.3. Dimensionamento das Terças de Cobertura G-BP-V24-L6-V35

No Apêndice D está descrita a metodologia adotada para a determinação da taxa de consumo de aço da estrutura secundária para o modelo G-BP-V24-L6-V35. O perfil considerado para terça de cobertura foi o perfil formado a frio do tipo  $Z_{45}$  especificado na NBR6255:2003 (ABNT, 2003). Após finalizado o dimensionamento, gerou-se uma tabela resumo dos perfis obtidos e o valor da taxa de consumo de aço, já incluindo os suportes das terças e as correntes rígidas para o travamento lateral (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 - Lista das terças e sua taxa de consumo de aço para o modelo  
G-BP-V24-L6-V35

		Comprimento: 42 m		Área: 1008 m <sup>2</sup>					
		Largura da obra: 24 m		esp. entre terças: 2 m					
	Perfil	Peso (kg/ m)	Comp.(m)	Transpasse (m)		Peso (kg)	n° Correntes Rígida	Comp. (m)	Peso (kg)
				Esq. (m)	Dir (m)				
V1	150 x 60 x 20 x 2,25	5,310	6,00		0,810	37,00	1	2	43,68
V2	150 x 60 x 20 x 2,25	5,310	6,00	0,810	0,610	39,41	1	2	43,68
V3	150 x 60 x 20 x 2,00	4,730	6,00	0,610	0,610	34,16	1	2	43,68
V4	150 x 60 x 20 x 2,00	4,730	6,00	0,610	0,610	34,16	1	2	43,68
V5	150 x 60 x 20 x 2,00	4,730	6,00	0,610	0,610	34,16	1	2	43,68
V6	150 x 60 x 20 x 2,25	5,310	6,00	0,610	0,810	39,41	1	2	43,68
V7	150 x 60 x 20 x 2,25	5,310	6,00	0,810		36,17	1	2	43,68
<b>Total</b>						<b>3308,11</b>	<b>Total</b>		<b>305,76</b>

	N° de linhas de terças = 13 Suportes = 175 kg
<b>TOTAL = 3788,87 kg</b>	
<b>TAXA = 3,76 kg/m<sup>2</sup></b>	

#### 4.5.4. Representação dos Resultados

Foi avaliado um número expressivo de modelos estruturais. Por este motivo optou-se por apresentar somente a lista de material do modelo de pórtico com treliça de banzo paralela (BP), vão livre de 24 metros, distância entre pórticos de 6 metros e velocidade básica do vento  $V_o = 30$  m/s, designado por G-BP-V24-L6-V35, obtida após a análise e dimensionamento dos elementos estruturais (Tabela 4.6).

Na lista de material apresentam-se algumas características a respeito da composição do pórtico transversal como:

- descrição do modelo;
- descrição do perfil e definição do tipo de elemento estrutural;
- comprimento total;
- peso total do pórtico transversal;
- Taxa de consumo de aço do pórtico principal;
- Taxa de consumo de aço da terça de cobertura;
- Taxa de consumo de aço do sistema de contraventamento;
- Taxa de consumo de aço final do modelo.

Tabela 4.6 - Lista de materiais e taxa de consumo de aço do modelo G-BP-V24-L6-V35

LISTA DE MATERIAL DO MODELO = G - BP - V 24 - L 6 - V 35				
Perfil	Descrição	Tipo de Aço	Comp. Total (cm)	Peso (kg)
CS 350 x 93	Colunas	ASTM A572 GR50	1440,00	1.338,00
U 100 x 40 x 2,00	Montantes	ASTM A572 GR50	1080,00	29,00
U 100 x 40 x 2,65	Montantes	ASTM A572 GR50	240,00	7,00
U 100 x 50 x 2,25	Diagonais	ASTM A572 GR50	1519,00	51,00
U 100 x 75 x 2,65	Banzos	ASTM A572 GR50	812,00	40,00
U 100 x 75 x 3,00	Diagonais	ASTM A572 GR50	1013,00	57,00
U 100 x 75 x 3,35	Banzos / Diagonais	ASTM A572 GR50	2537,00	158,00
U 100 x 75 x 3,75	Banzos	ASTM A572 GR50	812,00	56,00
U 100 x 75 x 6,30	Banzos	ASTM A572 GR50	812,00	63,00
Peso total do pórtico (kg)				1.844,00
Área Influência de 24 X 6 m (m <sup>2</sup> )				144,00
Taxa do pórtico (kg/m <sup>2</sup> )				12,81
Taxa da Terça de Cobertura (kg/m <sup>2</sup> )				3,76
Taxa de contraventamento (kg/m <sup>2</sup> )				1,00
<b>Taxa de consumo de aço global (kg/m<sup>2</sup>)</b>				<b>17,57</b>

É ilustrado na Figura 4.30 o arranjo final dos perfis que compõem o modelo G-BP-V24-L6-V35 após conclusão das etapas de análise e dimensionamento.

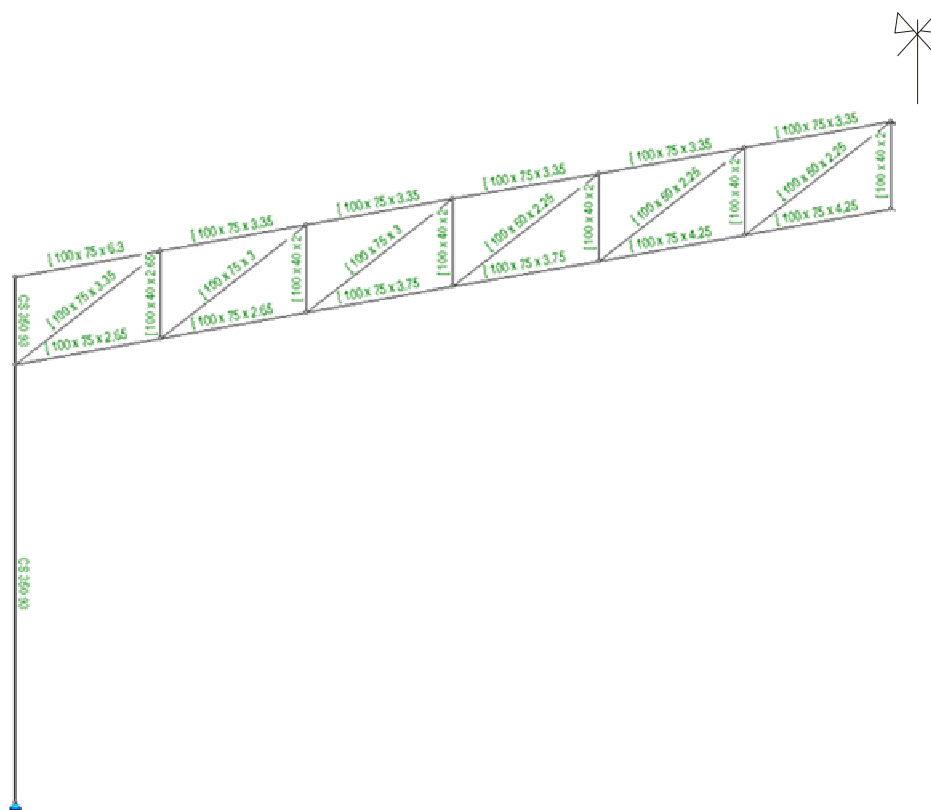


Figura 4.30 - Seções transversais dos elementos que compõem o modelo G-BP-V24-L6-V35.

# 5

## Resultados e Discussão

Apresentam-se neste capítulo os resultados de taxas de consumo de aço, bem como os deslocamentos horizontais e verticais dos diversos modelos estruturais que compõem o estudo paramétrico.

A taxa de consumo de aço é normalmente tomada como critério inicial para comparação das tipologias de galpões de uso geral, conforme apresentado no Capítulo 2. Da mesma forma, no presente trabalho optou-se por utilizar a taxa de consumo de aço como parâmetro de comparação entre tipologias. Além disso, apresenta-se também a variação dos deslocamentos verticais e horizontais dos pórticos transversais, como uma referência para comparação do desempenho estrutural das tipologias.



A taxa de consumo de aço global para cada modelo do estudo paramétrico é obtida a partir da aplicação dos princípios de análises e dimensionamento apresentados no Capítulo 4.

## 5.1. Comparativo da Taxa de Consumo de Aço

No Capítulo 3 foram concebidas as variações paramétricas consideradas na análise numérica dos modelos estruturais e após o dimensionamento do pórtico transversal e terças de cobertura, determinou-se a taxa de consumo de aço para as diversas tipologias.

### 5.1.1. Variação da Taxa de Consumo de Aço para uma Única Tipologia

#### 5.1.1.1. Taxa de Consumo de Aço para Pórticos de Alma Cheia (AC)

Apresenta-se nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 as taxas de consumo de aço para os modelos estruturais em pórtico de Alma Cheia (AC).

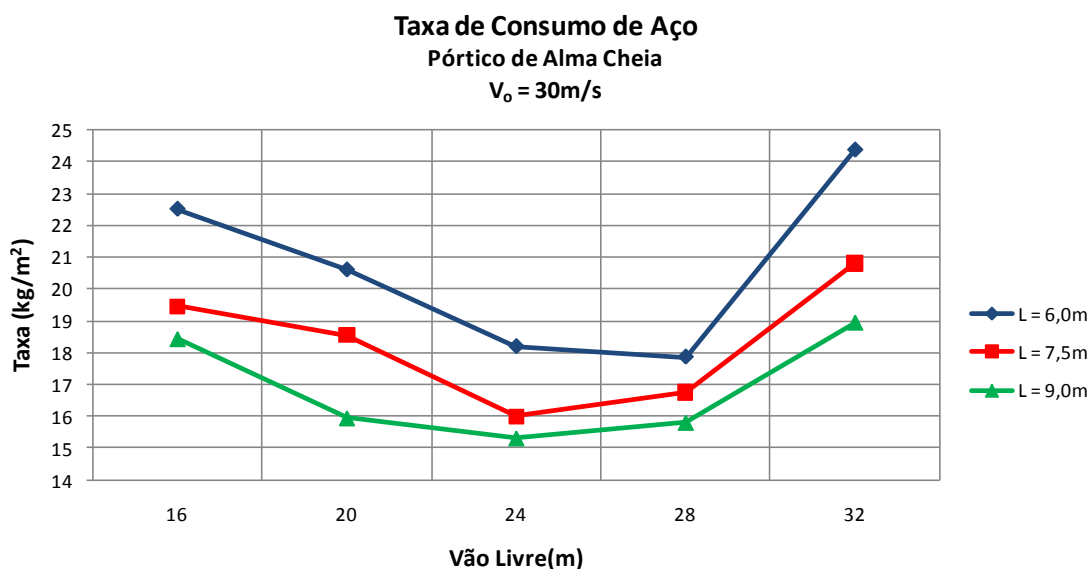


Figura 5.1 - Taxa de consumo de aço global para tipologia AC e  $V_0 = 30\text{m/s}$ .

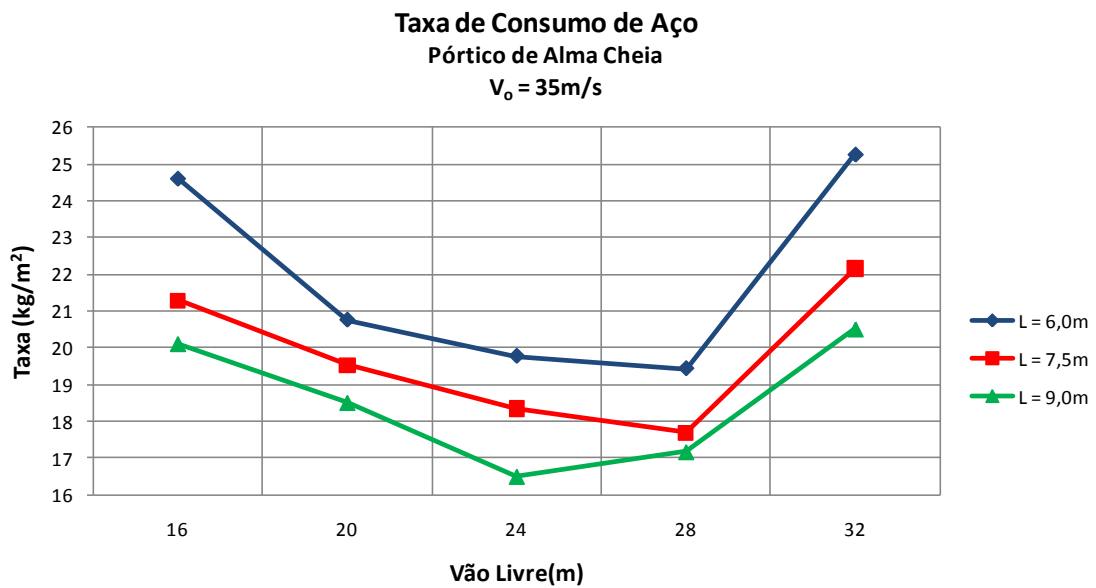


Figura 5.2 - Taxa de consumo de aço global para tipologia AC e  $V_0 = 35\text{m/s}$ .

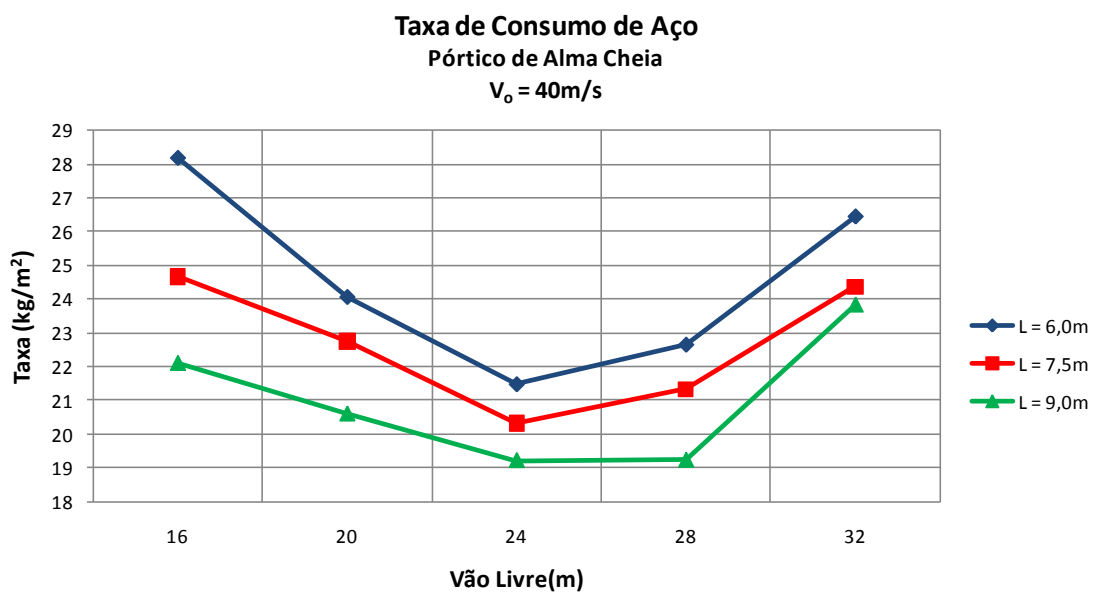


Figura 5.3 - Taxa de consumo de aço global para tipologia AC e  $V_0 = 40\text{m/s}$ .

As Figuras 5.1 a 5.3 mostram que a taxa de consumo de aço aumenta para maiores valores do vão livre do pórtico transversal e do estágio de carregamento devido à ação do vento. Além disso, a variação da distância entre os pórticos afeta a taxa de consumo de aço, de forma que, diminuindo o espaçamento entre os pórticos principais eleva-se a taxa de consumo de aço.

Observou-se também nas Figuras 5.1 a 5.3 que houve uma inversão da tendência de taxas de consumo de aço. No presente estudo não foi feita uma análise específica para esta tendência.

A Figura 5.4 mostra a taxa de consumo de aço somente para o pórtico de alma cheia, com e sem as terças de cobertura, para velocidade básica  $V_0 = 35\text{m/s}$  e diferentes espaçamentos entre os pórticos transversais.

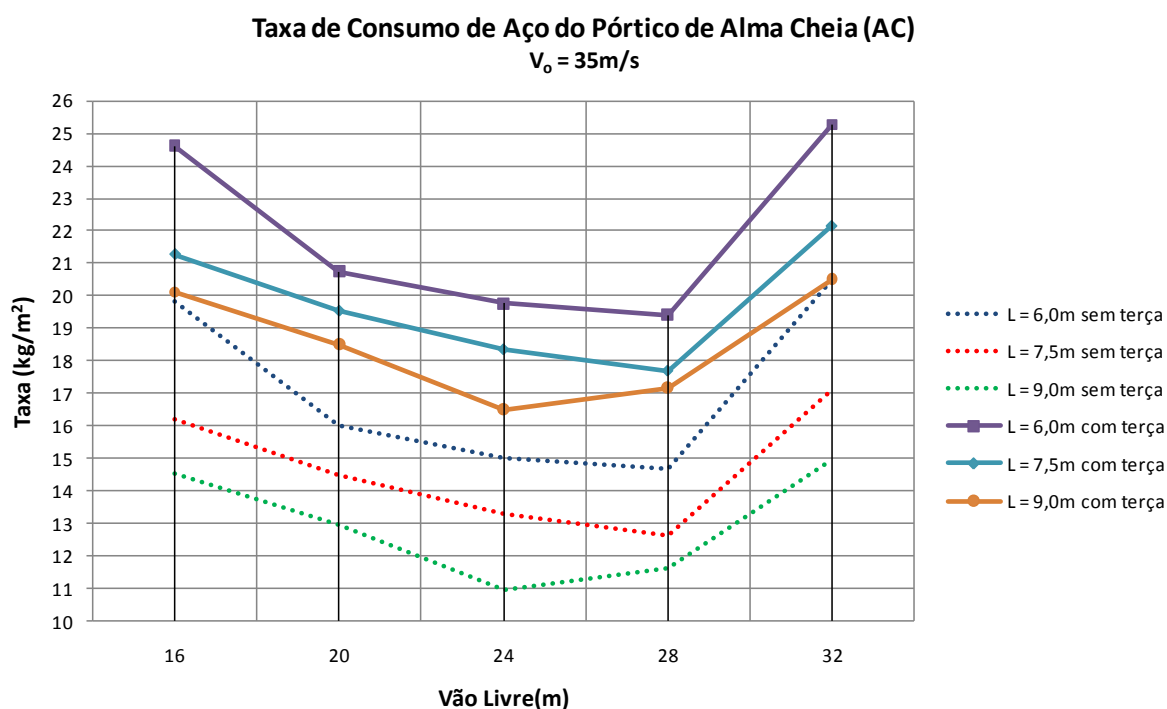


Figura 5.4 - Avaliação da influência da terça de cobertura na taxa de consumo de aço no pórtico de alma cheia.

Analisando a Figura 5.4 pode-se perceber que a terça de cobertura exerce uma relativa influência na diferença entre a taxa de consumo de aço do pórtico principal, ou seja, levando-se em consideração a terça de cobertura a diferença entre as taxas de consumo de aço diminui.

### 5.1.1.2. Taxa de Consumo de Aço para Pórticos de Treliça em Arco (TA)

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam as taxas de consumo de aço para o pórtico transversal de treliça em Arco (TA).

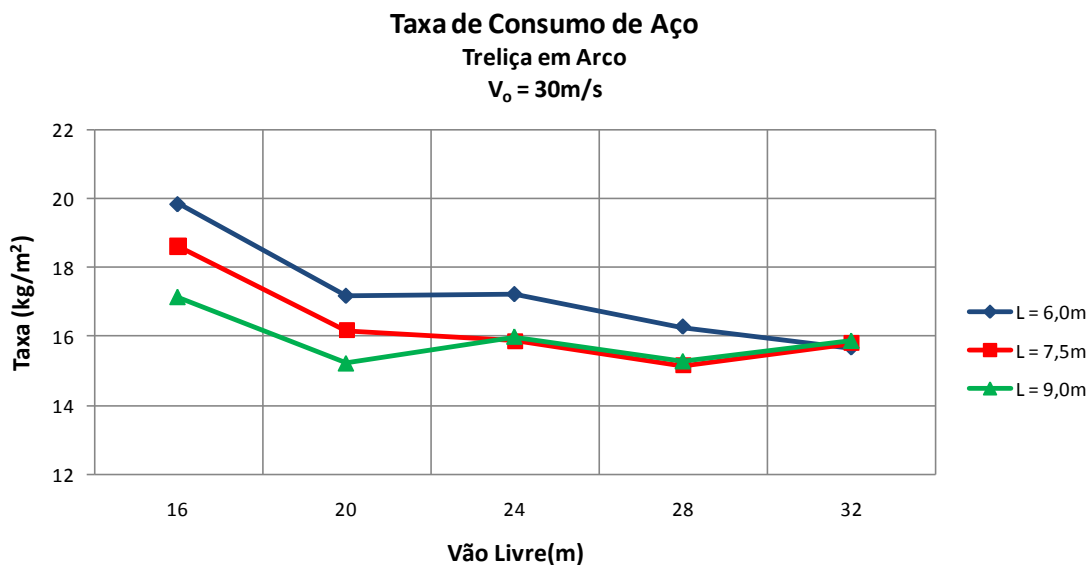


Figura 5.5 - Taxa de consumo de aço global para tipologia TA e  $V_0 = 30\text{m/s}$ .

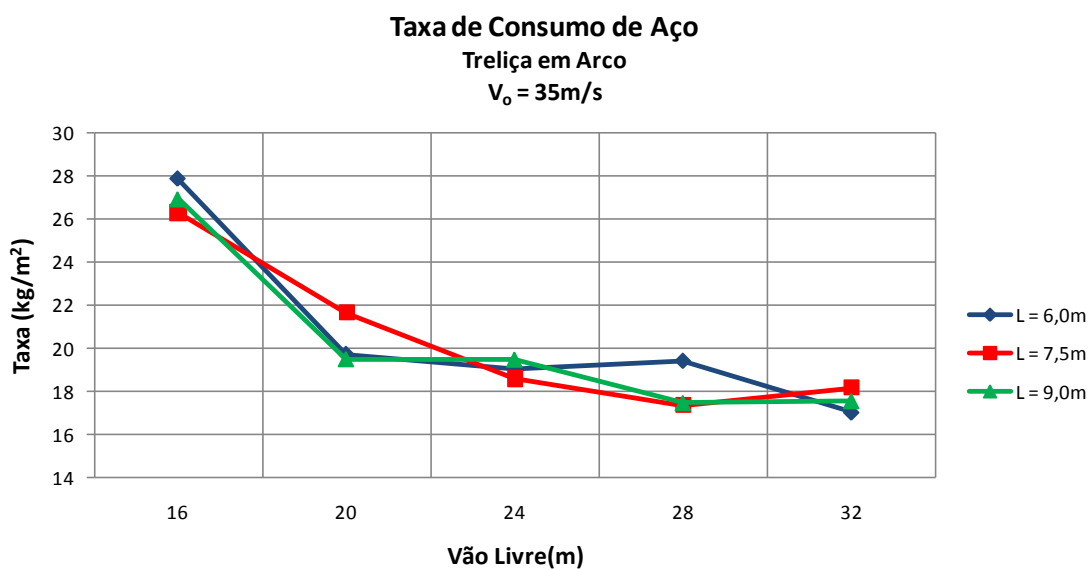


Figura 5.6 - Taxa de consumo de aço global para tipologia TA e  $V_0 = 35\text{m/s}$ .

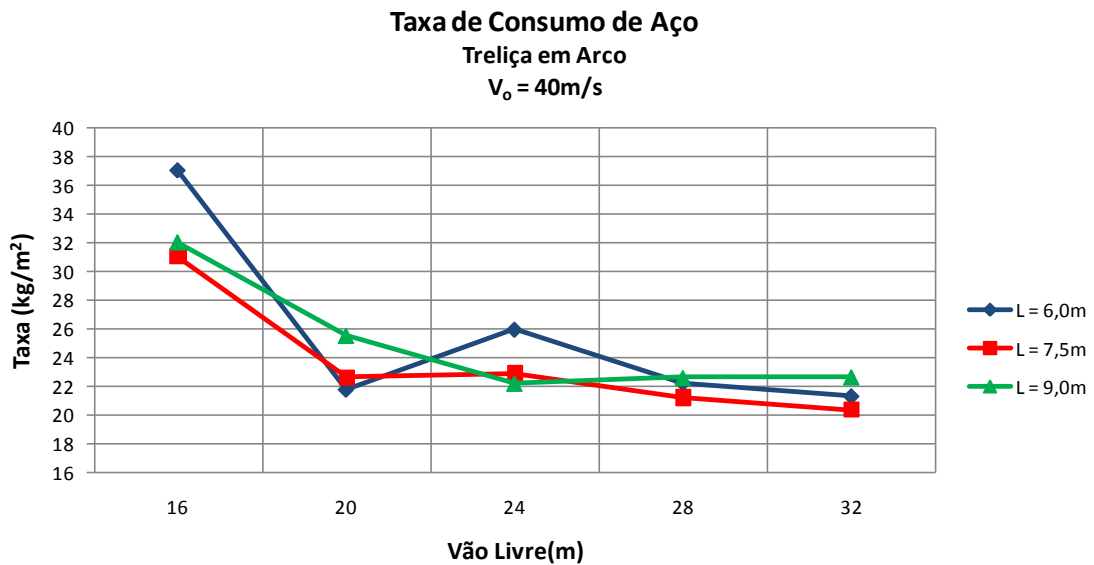


Figura 5.7 - Taxa de consumo de aço global para tipologia TA e  $V_0 = 40\text{m/s}$ .

As Figuras 5.5 a 5.7 mostram que a taxa de consumo de aço diminui à medida que o vão livre do pórtico transversal aumenta.

Para a velocidade básica do vento igual a  $30\text{m/s}$  é mais definida a taxa de consumo de aço em função do espaçamento entre os pórticos principais, enquanto que para as velocidades de  $35$  e  $40\text{m/s}$  a taxa de consumo de aço não é bem definida.

### 5.1.1.3. Taxa de Consumo de Aço para Pórticos de Banzos Paralelos (BP)

As taxas de consumo de aço para o pórtico em treliça de Banzos Paralelos (BP) encontram-se ilustradas nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

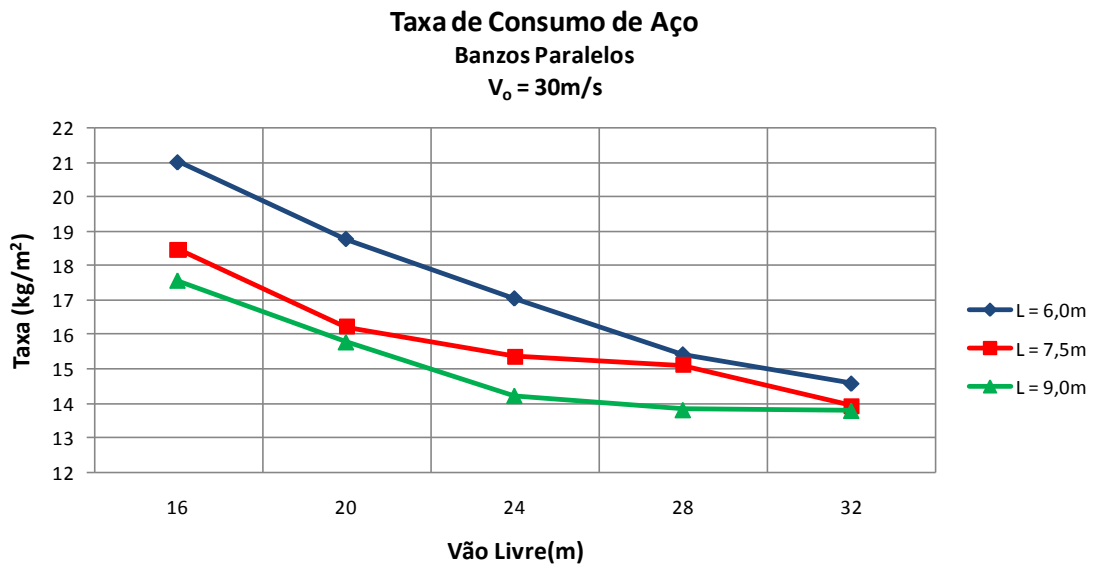


Figura 5.8 - Taxa de consumo de aço global para tipologia BP e  $V_0 = 30\text{m/s}$ .

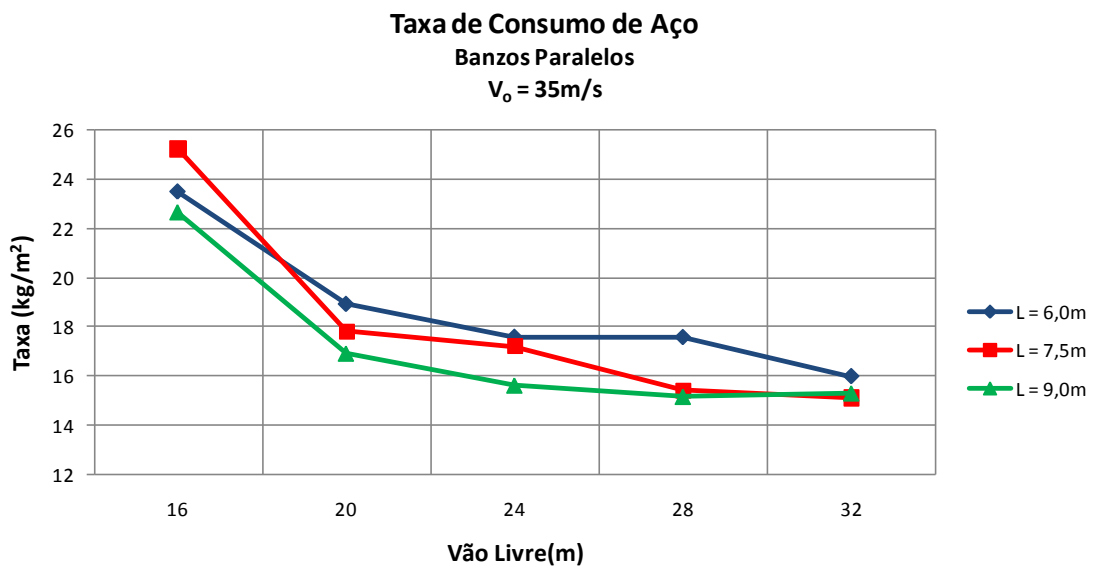


Figura 5.9 - Taxa de consumo de aço global para tipologia BP e  $V_0 = 35\text{m/s}$ .

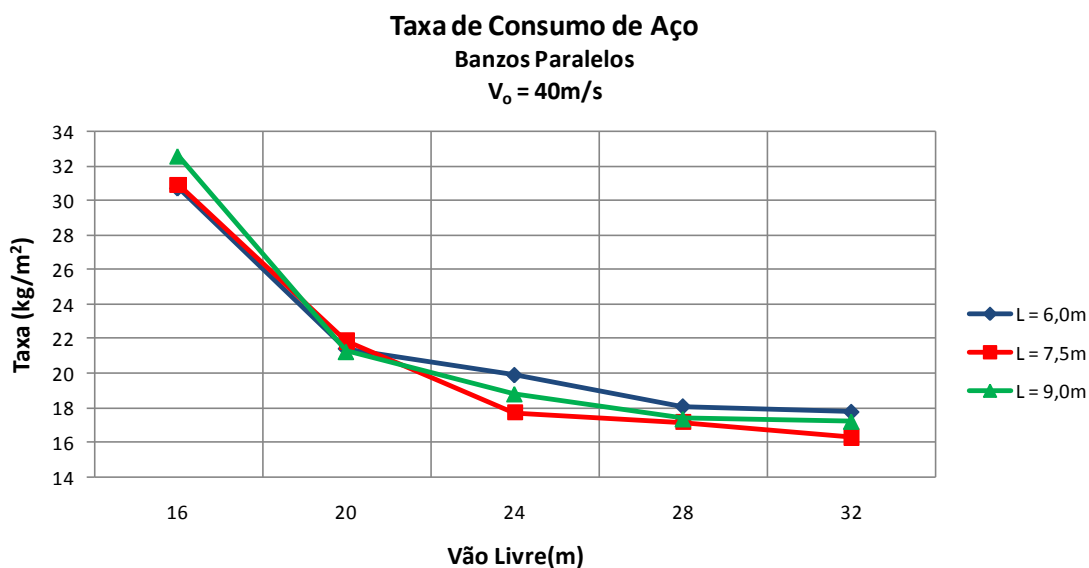


Figura 5.10 - Taxa de consumo de aço global para tipologia BP e  $V_0 = 40\text{m/s}$ .

Analisando as Figuras 5.8 a 5.10 conclui-se que as taxas de consumo de aço diminuem à medida que o vão livre do pórtico transversal aumenta.

Para a velocidade básica do vento igual a  $40\text{m/s}$  a taxa de consumo de aço é semelhante para qualquer espaçamento entre os pórticos principais. Porém, para a velocidade básica do vento igual a  $30$  e  $35\text{m/s}$  registra-se uma maior dispersão entre os valores da taxa de consumo de aço e ainda, que as menores taxas ocorrem para o espaçamento entre os pórticos igual a  $9\text{m}$ .

#### 5.1.1.4. Taxa de Consumo de Aço para Pórticos de Treliça Trapezoidal (TP)

As taxas de consumo de aço para o pórtico de Treliça Trapezoidal (TP) encontram-se ilustradas nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13.

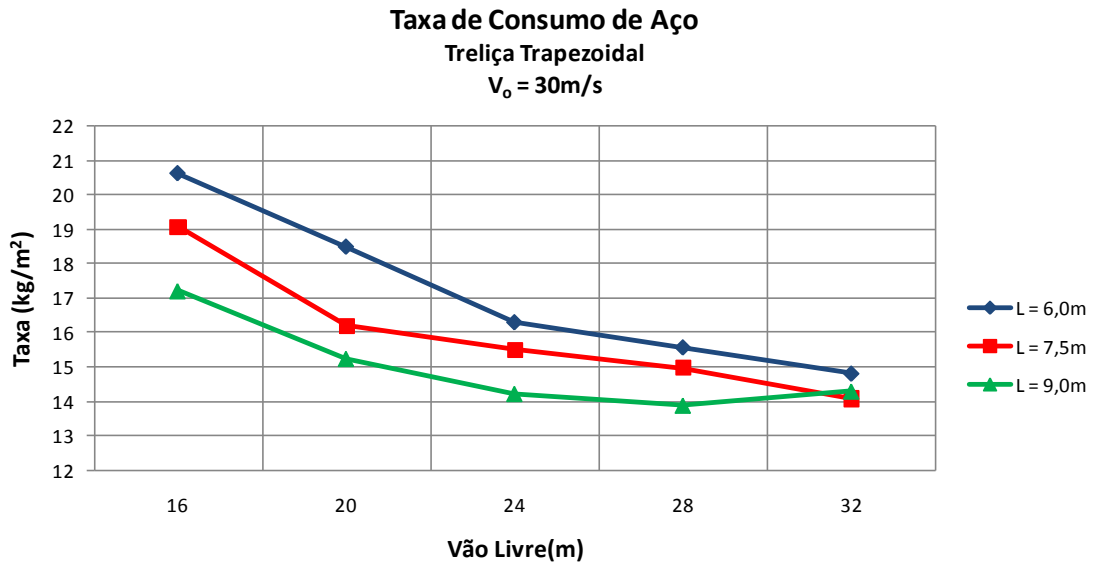


Figura 5.11 - Taxa de consumo de aço global para tipologia TP e  $V_0 = 30\text{m/s}$ .

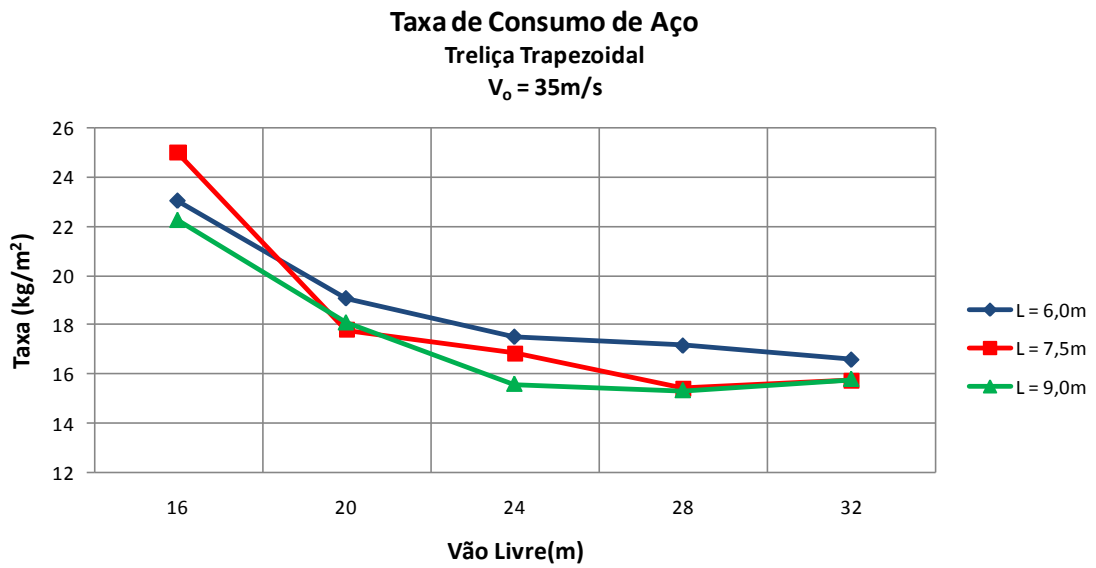


Figura 5.12 - Taxa de consumo de aço global para tipologia TP e  $V_0 = 35\text{m/s}$ .



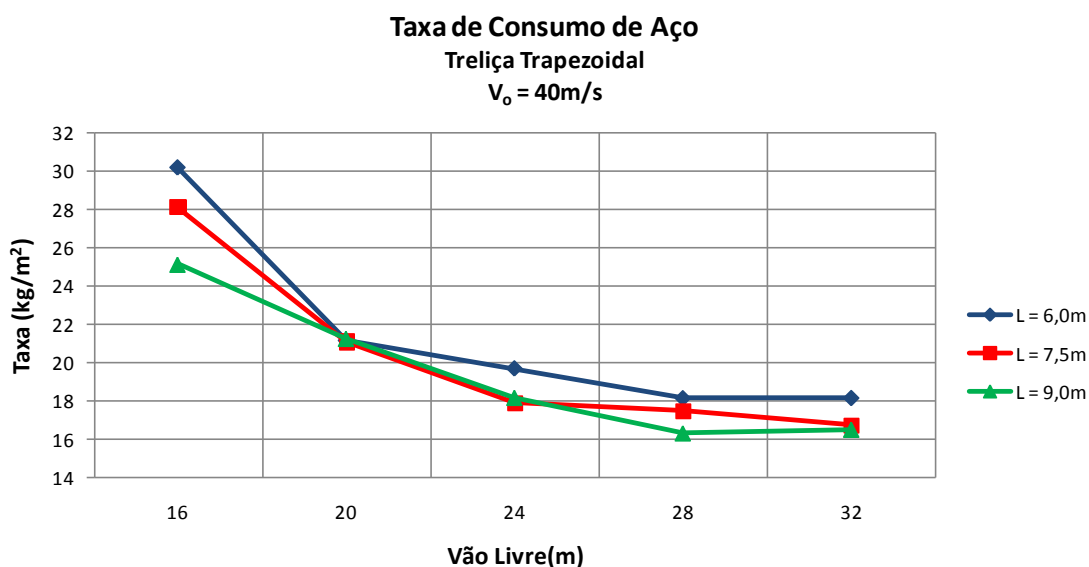


Figura 5.13 - Taxa de consumo de aço global para tipologia TP e  $V_0 = 40\text{m/s}$ .

Observa-se nas Figuras 5.11 a 5.13 o mesmo comportamento apresentado nos pórticos de treliça de banzos paralelos, ou seja, as taxas de consumo de aço diminuem à medida que o vão livre do pórtico transversal aumenta. Verifica-se ainda que para velocidade básica do vento igual a  $40\text{m/s}$  a taxa de consumo de aço é semelhante para os diferentes valores do espaçamento entre os pórticos principais, enquanto que para a velocidade básica do vento igual a  $30$  e  $35\text{m/s}$  fica evidente que a taxa de consumo de aço é menor para espaçamento entre os pórticos igual a  $9\text{m}$ .

#### 5.1.1.5. Taxa de Consumo de Aço para Pórticos de Treliça Triangular (TT)

As Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 ilustram as taxas de consumo de aço para o pórtico de Treliça Triangular (TT).

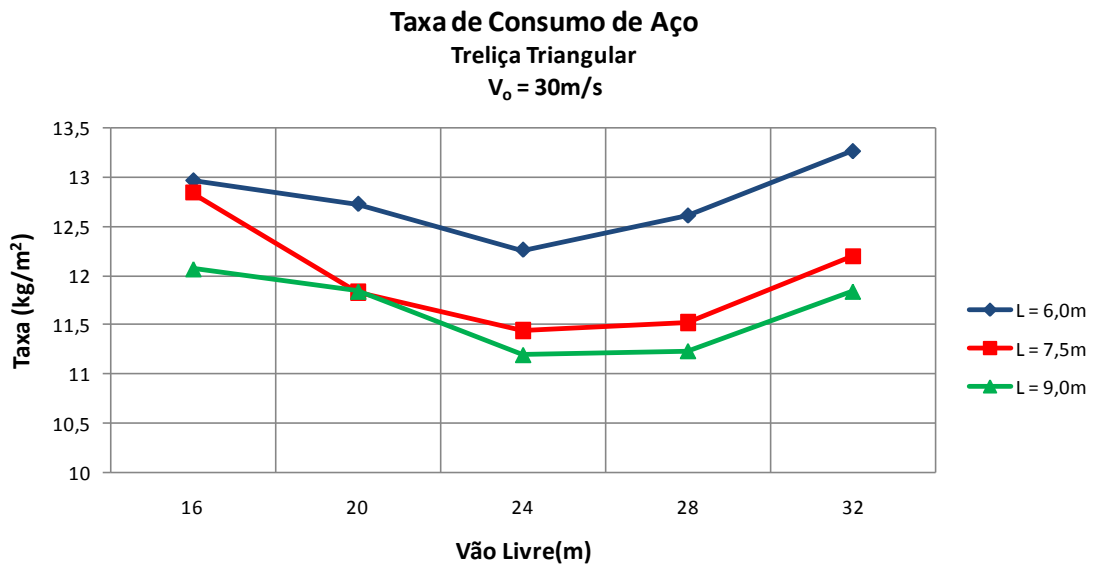


Figura 5.14 - Taxa de consumo de aço global para tipologia TT e  $V_0 = 30\text{m/s}$ .

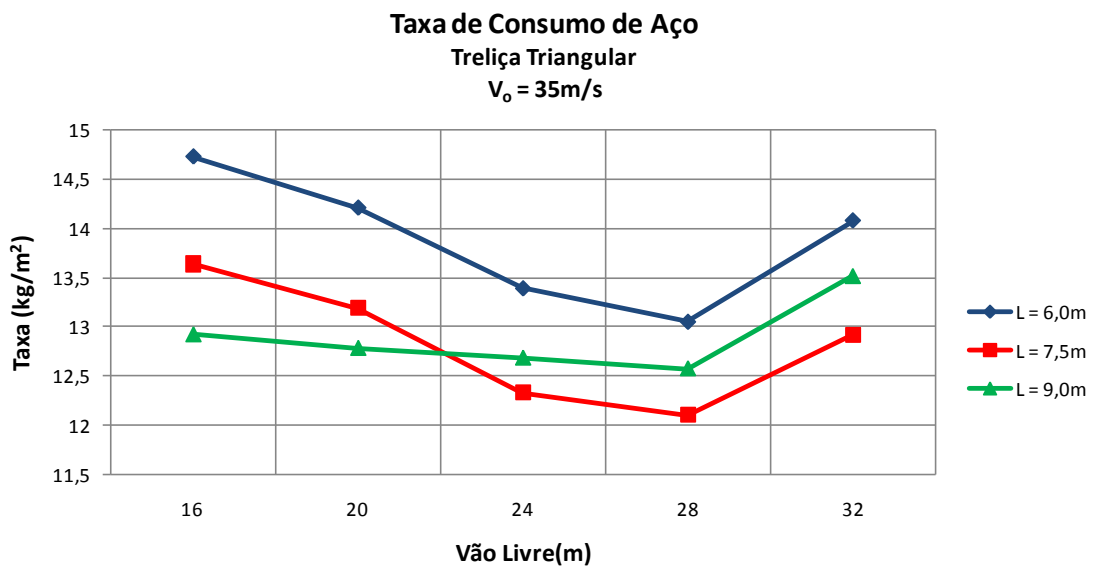


Figura 5.15 - Taxa de consumo de aço global para tipologia TT e  $V_0 = 35\text{m/s}$ .

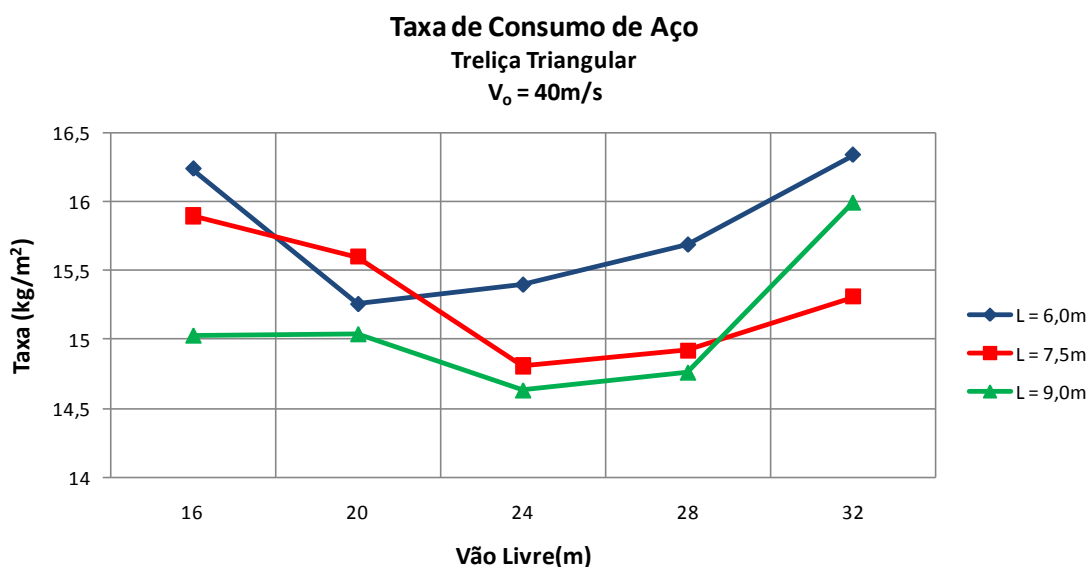


Figura 5.16 - Taxa de consumo de aço global para tipologia TT e  $V_0 = 40\text{m/s}$ .

A maior taxa de consumo de aço observada nas Figuras 5.14 a 5.16 foi para o espaçamento entre os pórticos igual a 6 metros. Analisando os efeitos da ação do vento, verifica-se que a menor taxa de consumo de aço ocorre para espaçamento entre os pórticos transversais igual a 9 metros, para vãos livres menores. Para vãos livres maiores a taxa de consumo de aço foi menor para espaçamentos entre pórticos transversais igual a 7,5 metros, conforme ilustra as Figuras 5.15 e 5.16.

### 5.1.2. Variação da Taxa de Consumo de Aço para Diversas Tipologias

Apresenta-se nas Figuras 5.17 a 5.34 uma sobreposição dos resultados da taxa de consumo global de aço para as diferentes tipologias em função das variações paramétricas consideradas no capítulo 3, visando avaliar o desempenho estrutural em relação ao consumo de aço.

A título de ilustração são apresentados gráficos em linhas e em histogramas, para a mesma tipologia e parâmetros, conforme mostram as Figuras 5.17 e 5.18.

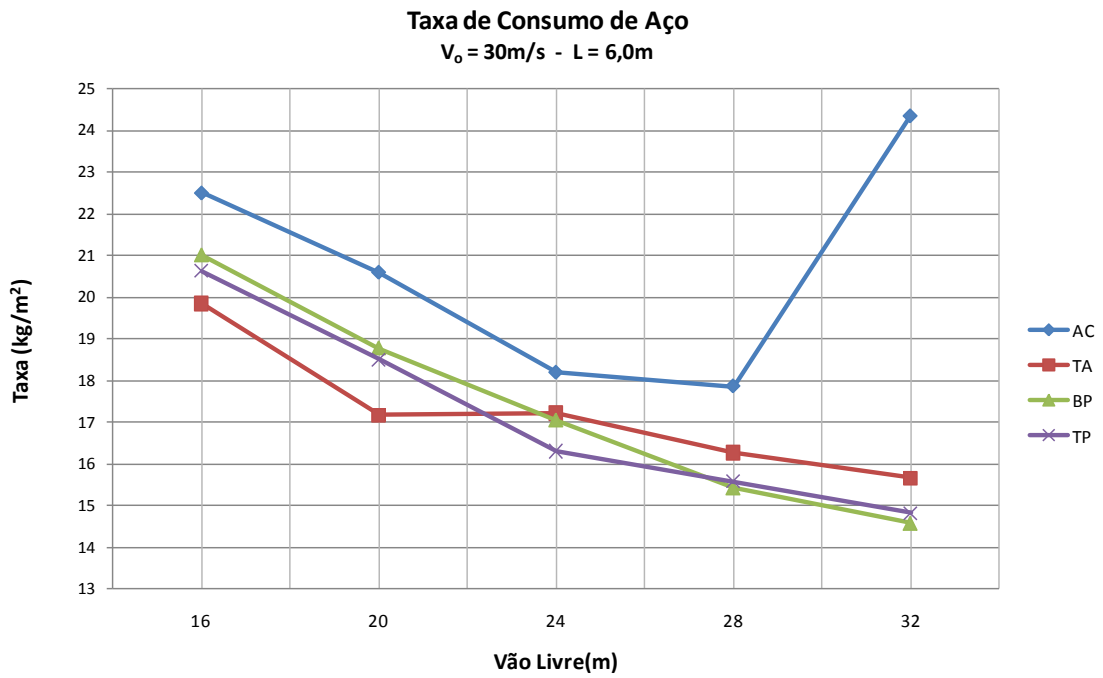


Figura 5.17 - Taxa de consumo de aço global para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 30\text{m/s}$  e  $L = 6\text{m}$ .

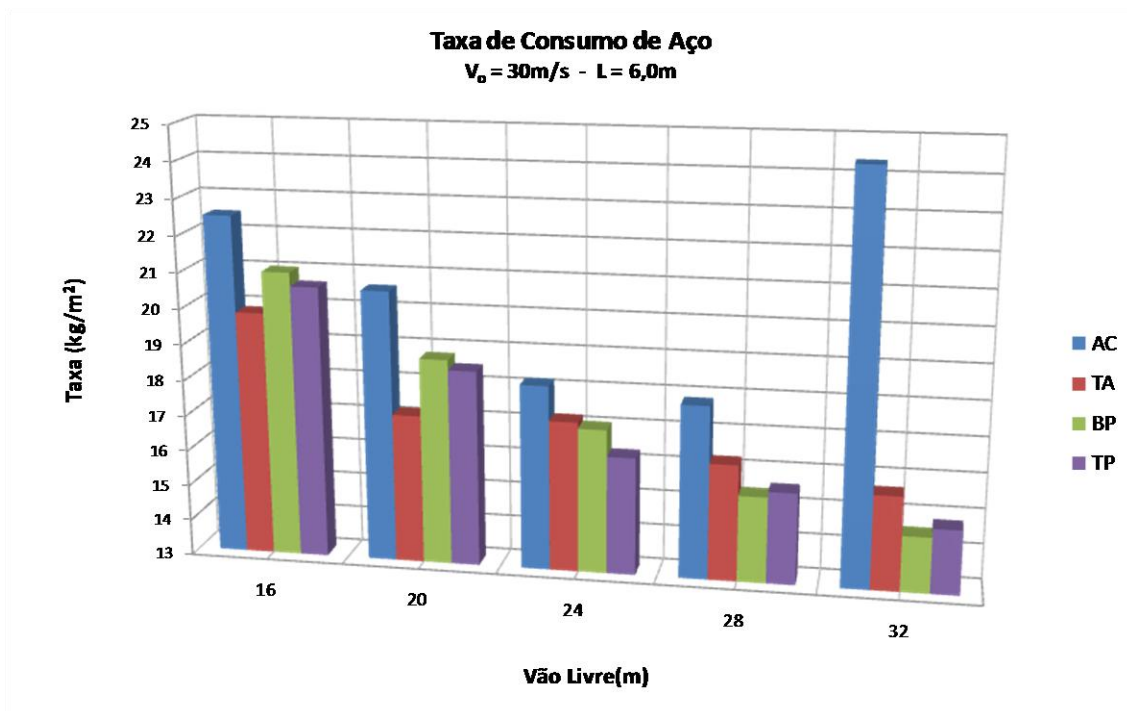


Figura 5.18 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre, para,  $V_0 = 30\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

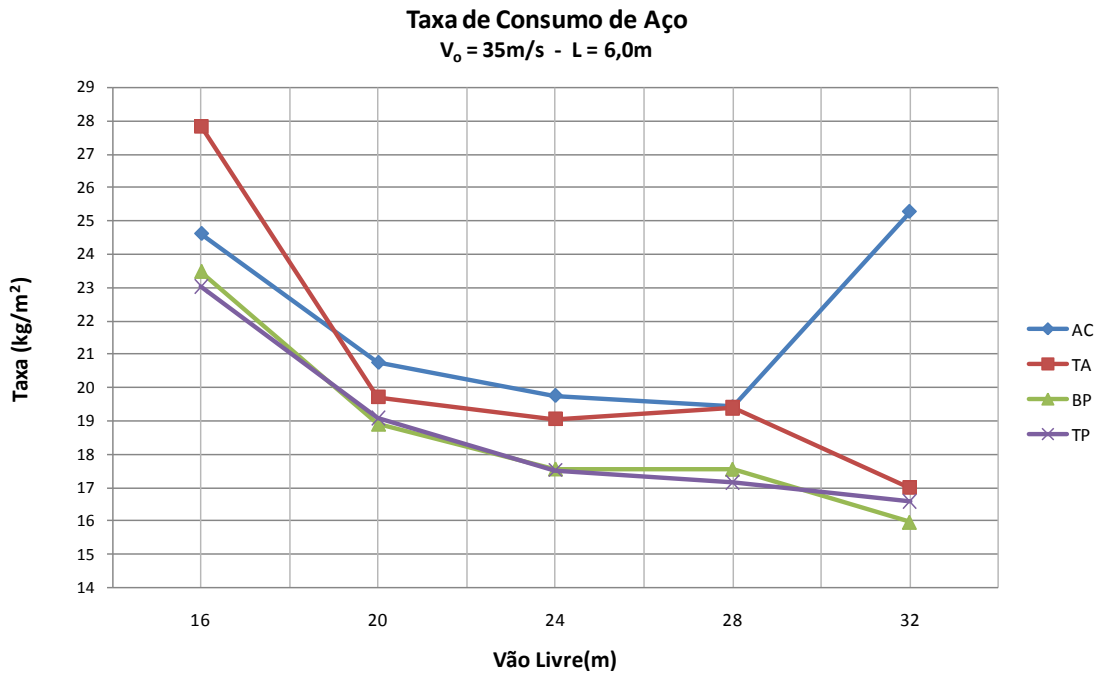


Figura 5.19 - Taxa de consumo de aço global para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 6\text{m}$ .

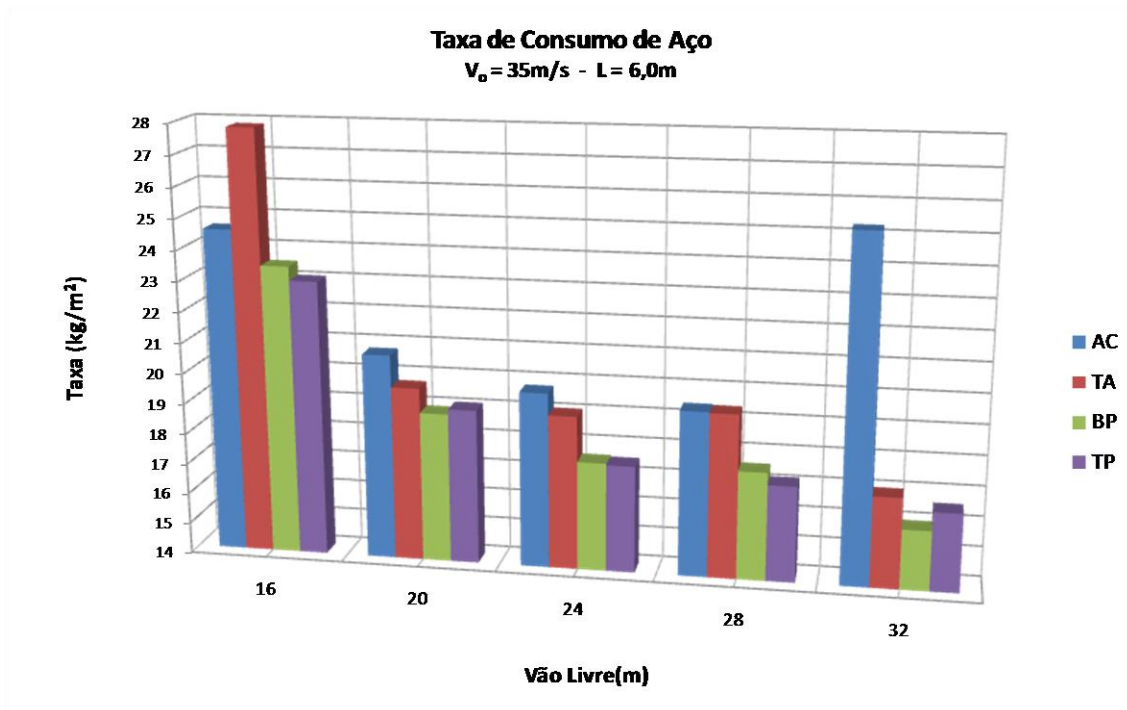


Figura 5.20 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

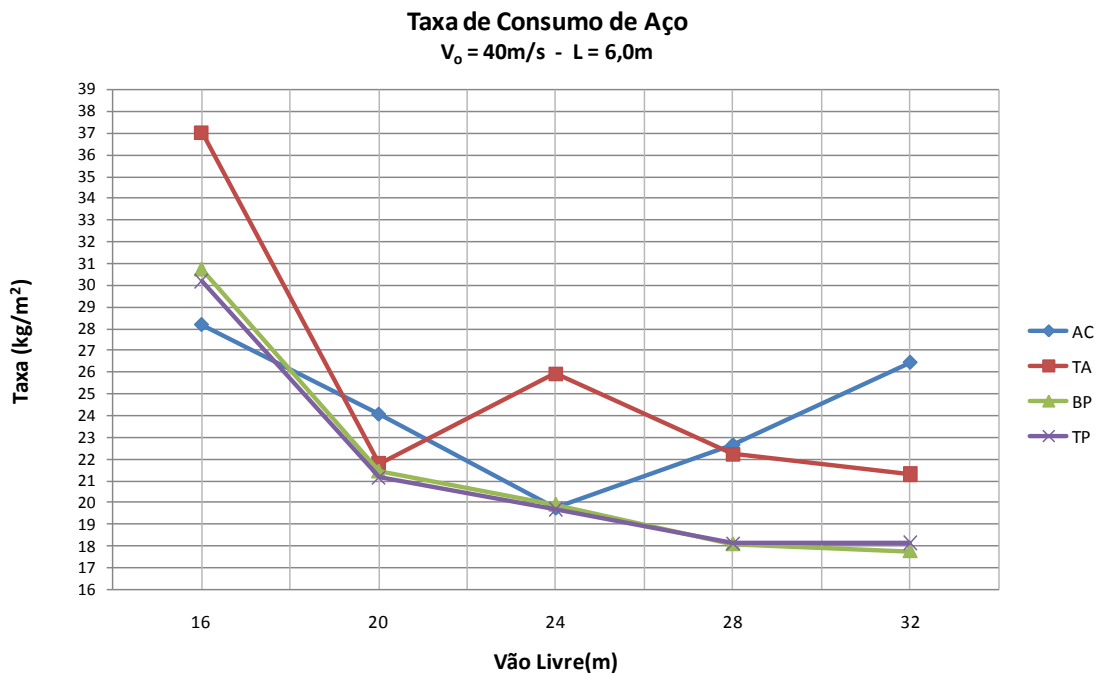


Figura 5.21 - Taxa de consumo de aço global para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 40\text{m/s}$  e  $L = 6\text{m}$ .

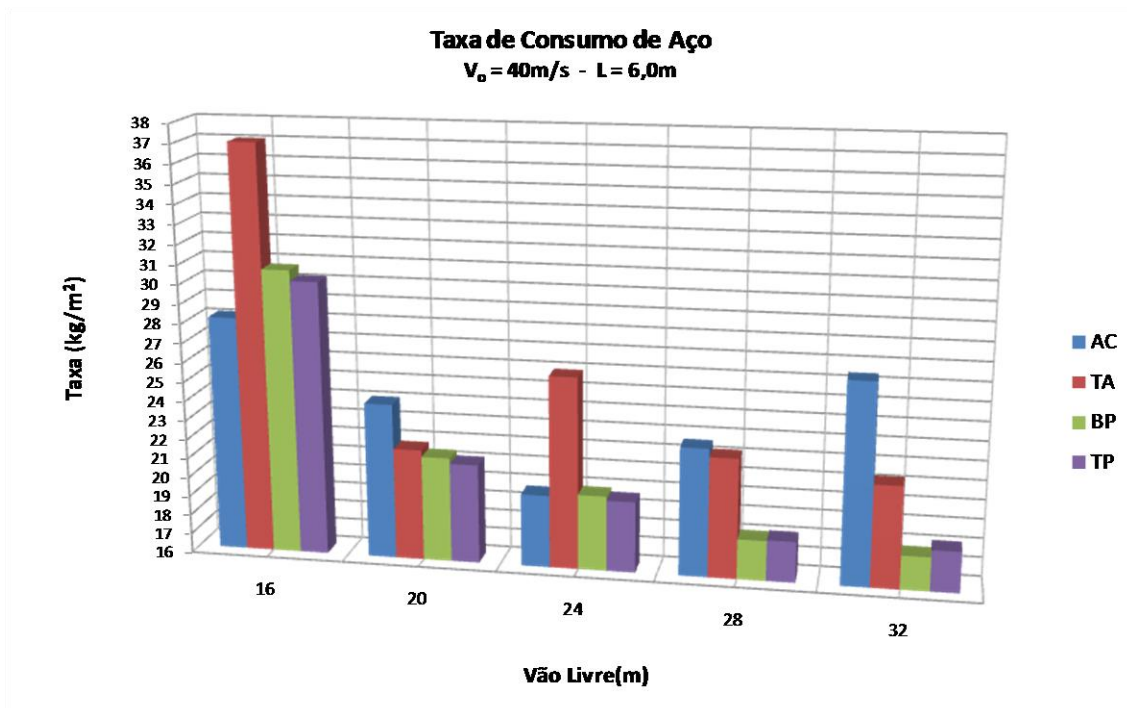


Figura 5.22 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre,  $V_0 = 40\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

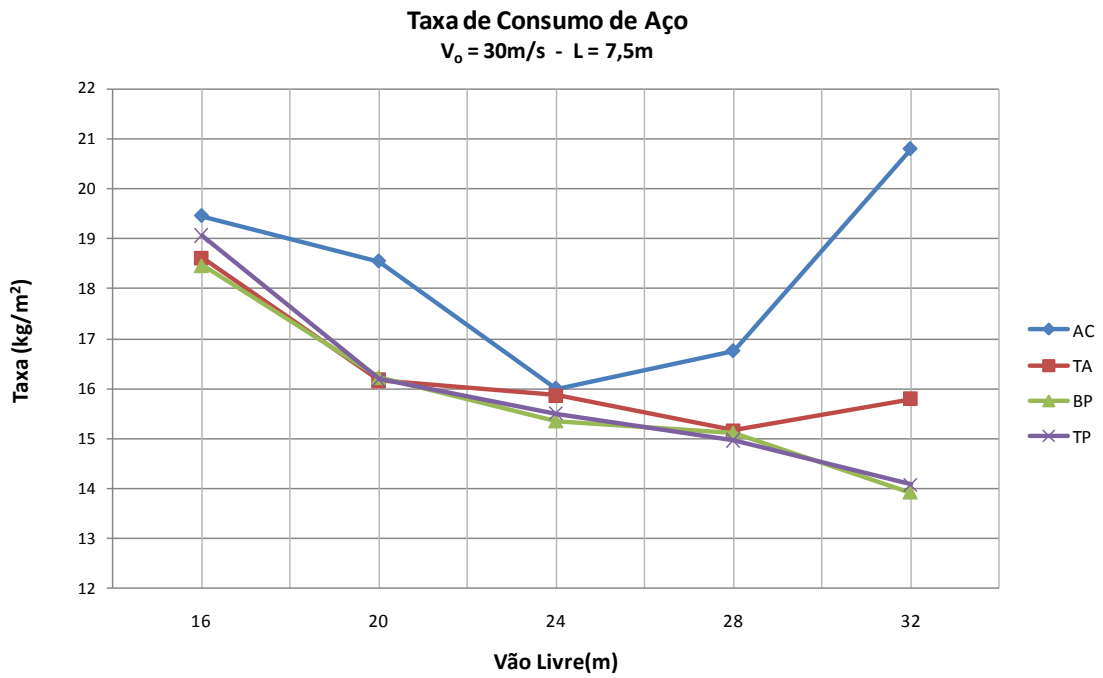


Figura 5.23 - Taxa de consumo de aço global para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 30\text{m/s}$  e  $L = 7,5\text{m}$ .

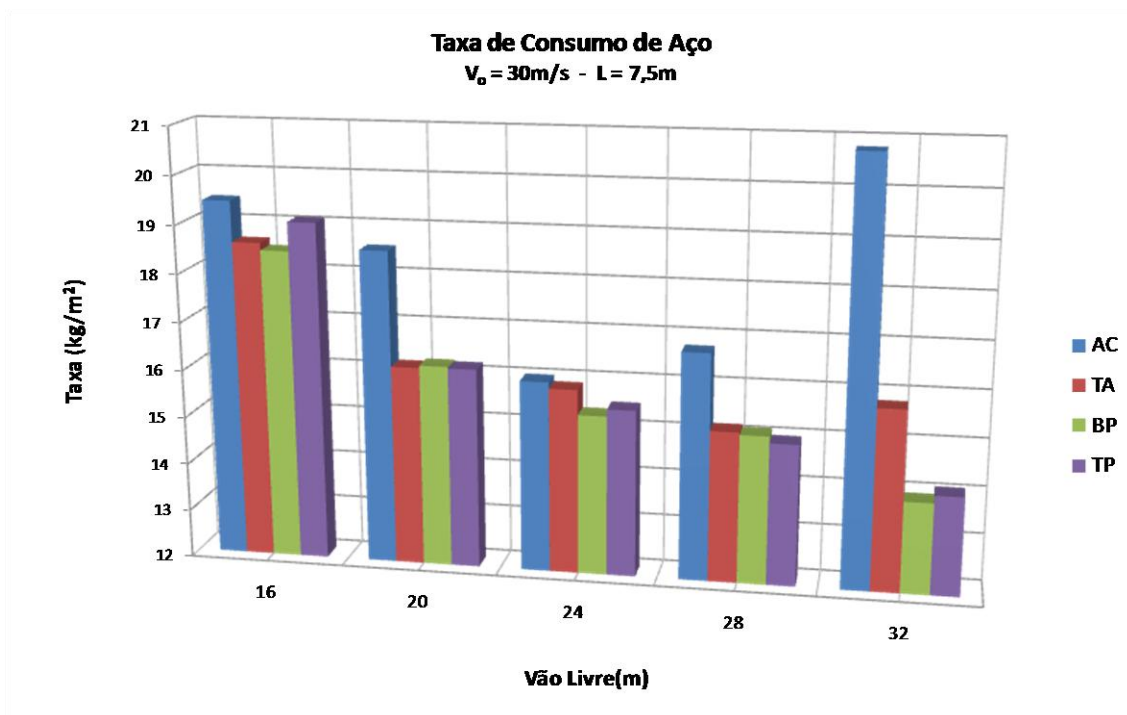


Figura 5.24 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre,  $V_0 = 30\text{m/s}$  e  $L = 7,5\text{m}$ .

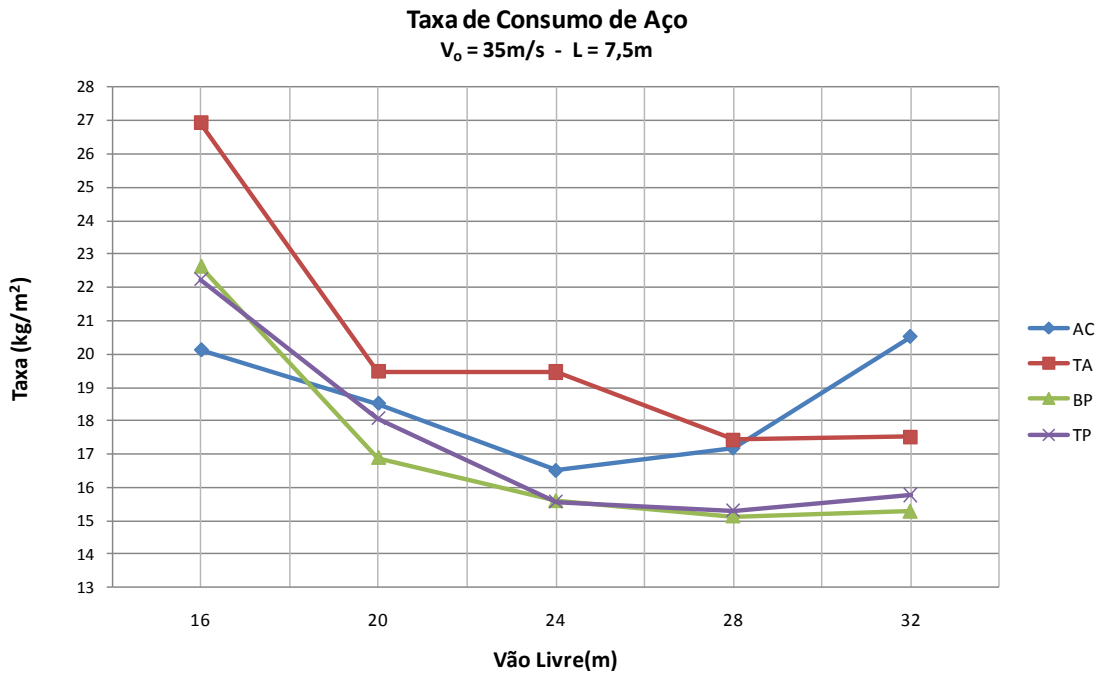


Figura 5.25 - Taxa de consumo de aço global para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 7,5\text{m}$ .

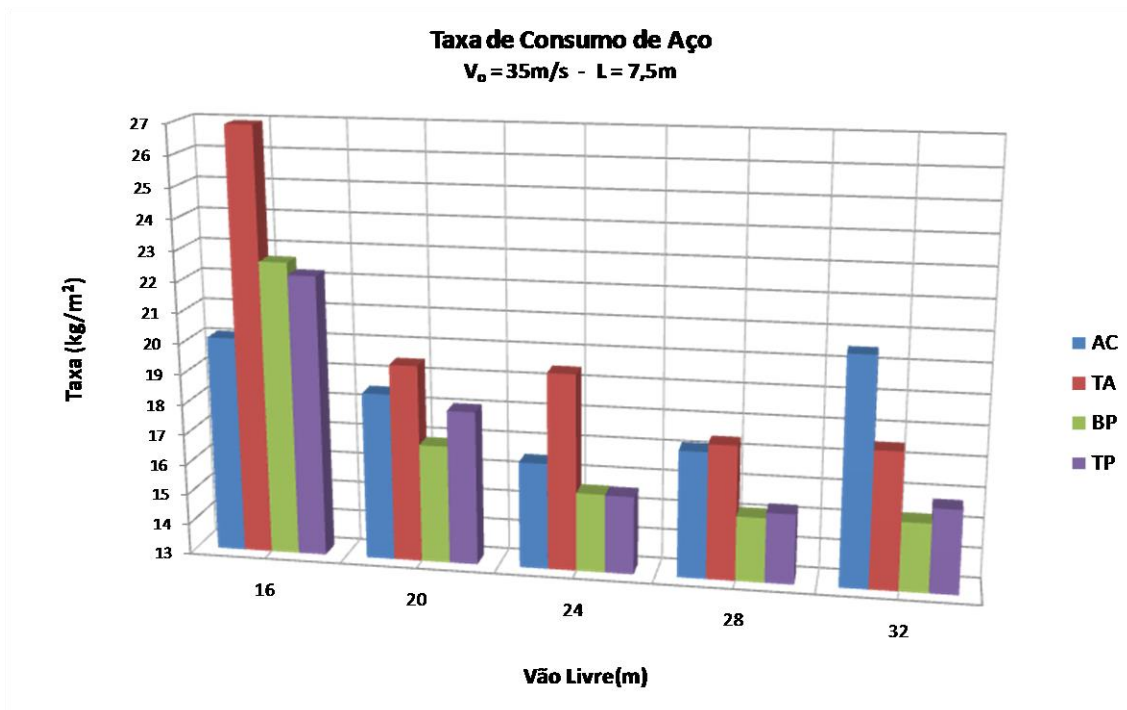


Figura 5.26 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 7,5\text{m}$ .



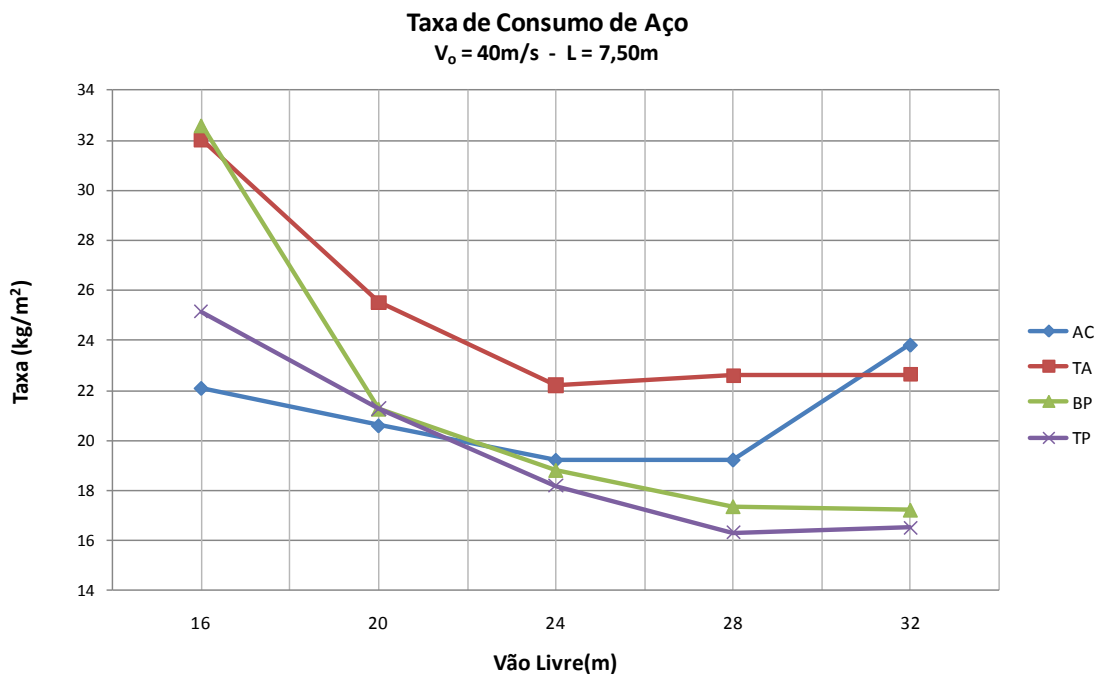


Figura 5.27 - Taxa de consumo de aço global para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 40\text{m/s}$  e  $L = 7,5\text{m}$ .

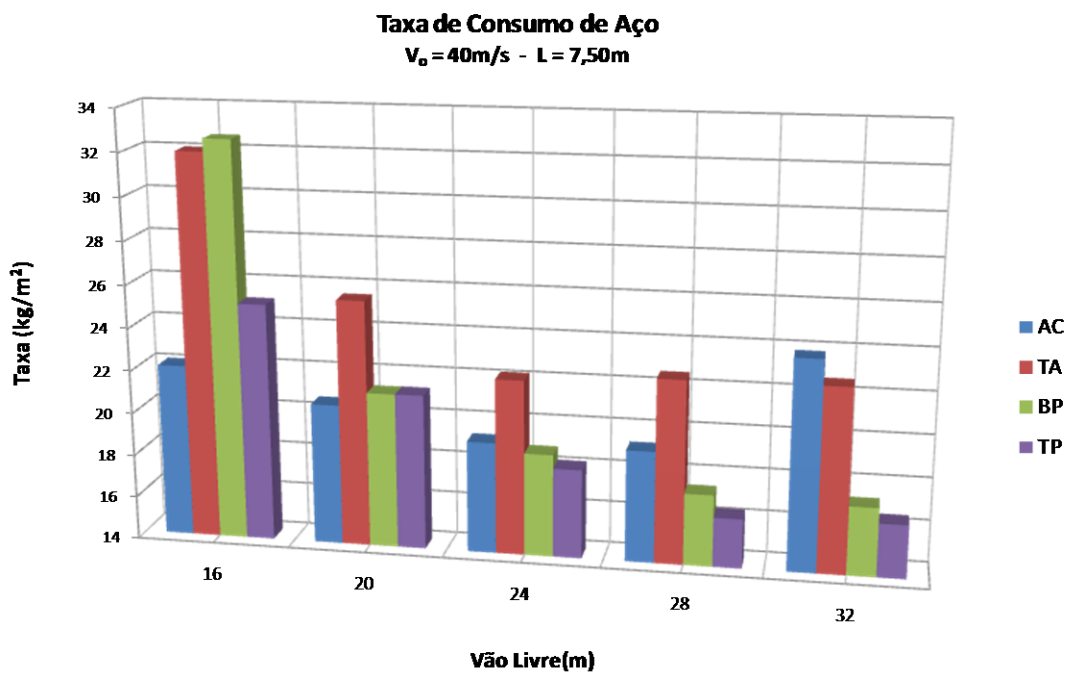


Figura 5.28 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre,  $V_0 = 40\text{m/s}$  e  $L = 7,5\text{m}$ .

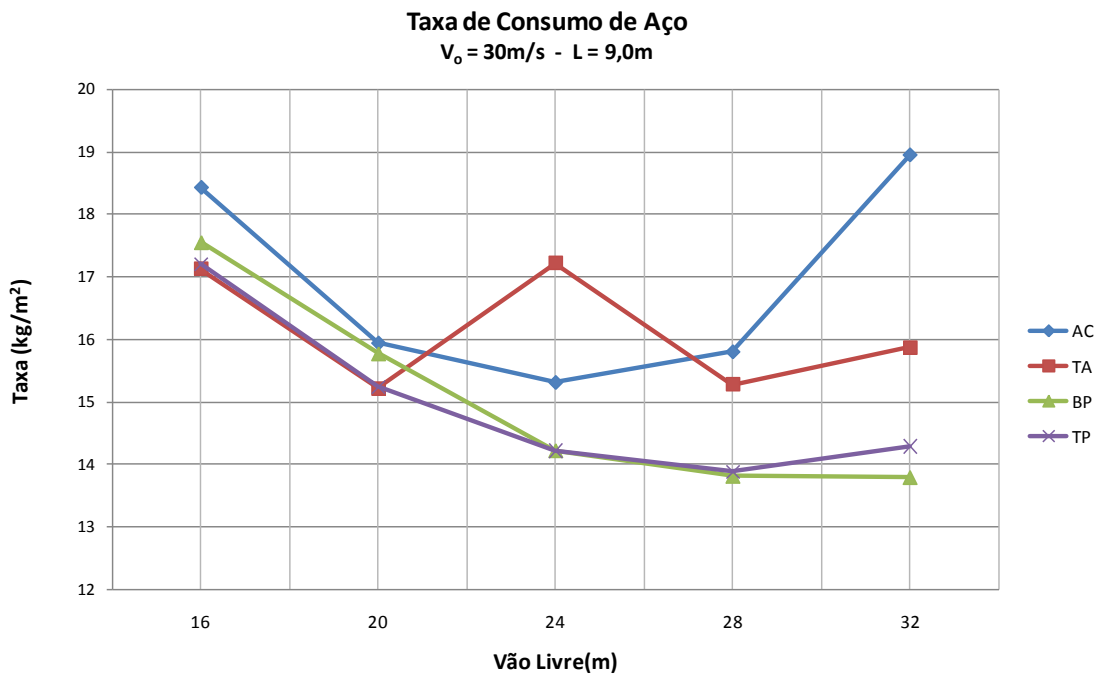


Figura 5.29 - Taxa de consumo de aço global para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 30\text{m/s}$  e  $L = 9,0\text{m}$ .

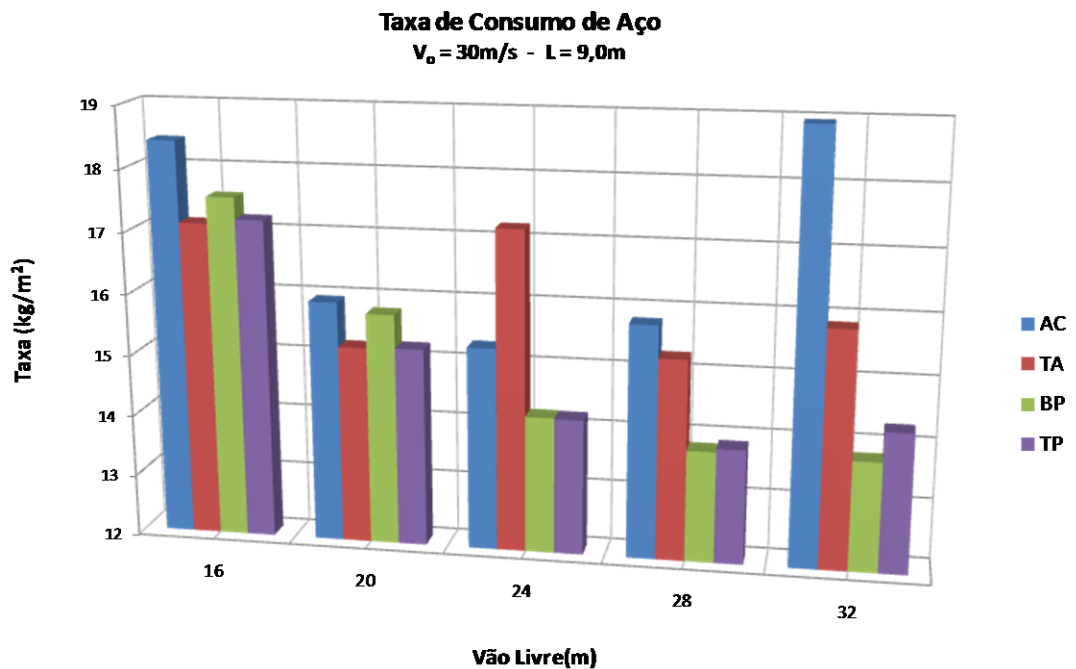


Figura 5.30 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre,  $V_0 = 30\text{m/s}$  e  $L = 9,0\text{m}$ .

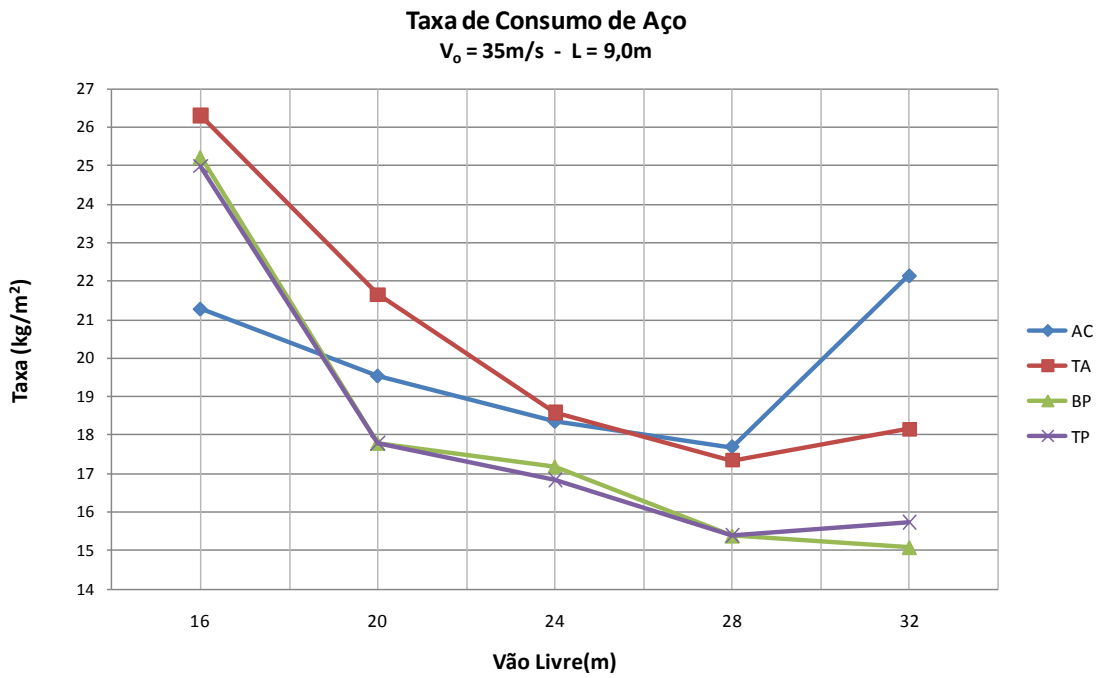


Figura 5.31 - Taxa de consumo de aço global para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 9,0\text{m}$ .

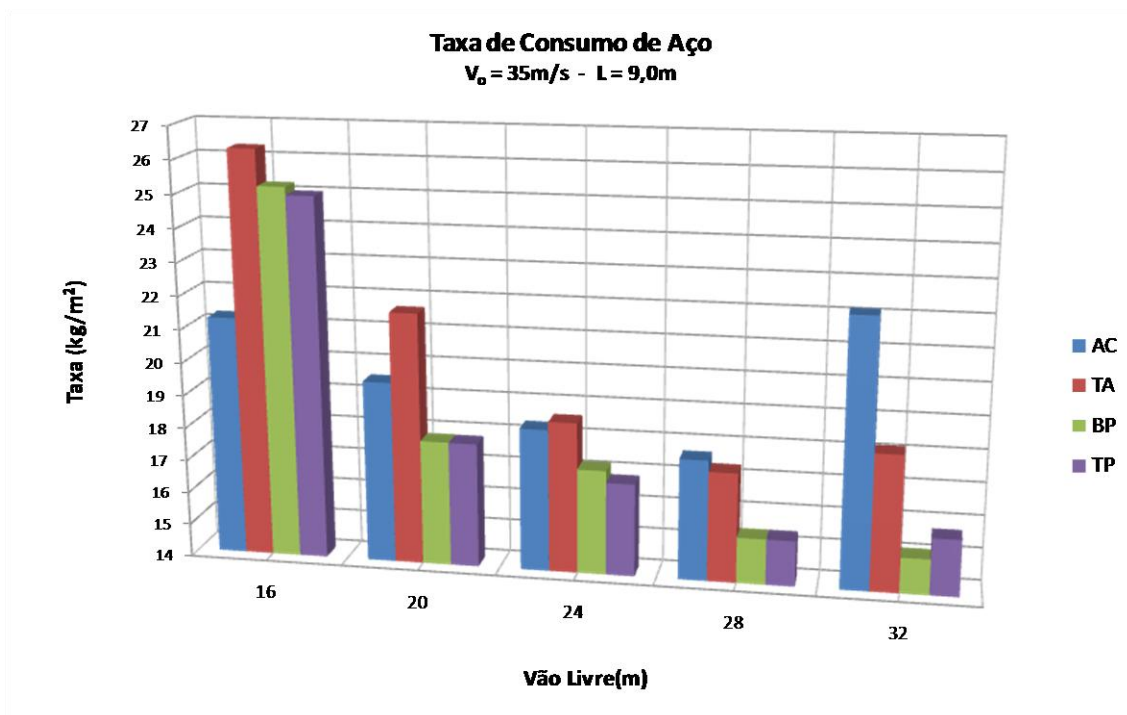


Figura 5.32 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 9,0\text{m}$ .

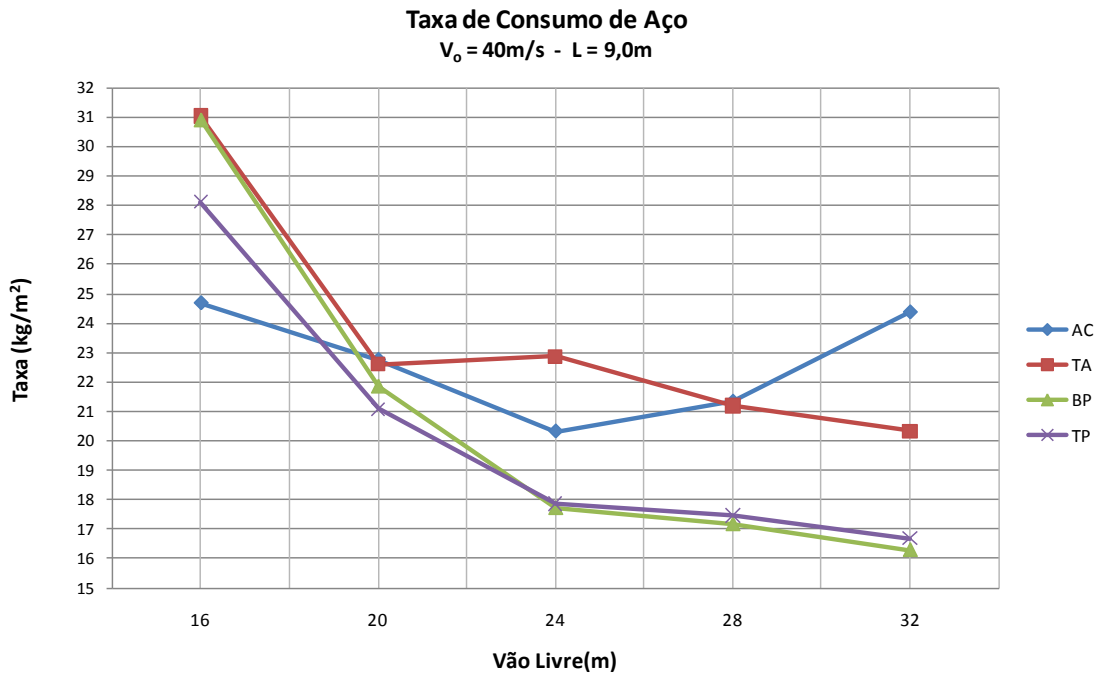


Figura 5.33 - Taxa de consumo de aço global para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 40\text{m/s}$  e  $L = 9,0\text{m}$ .

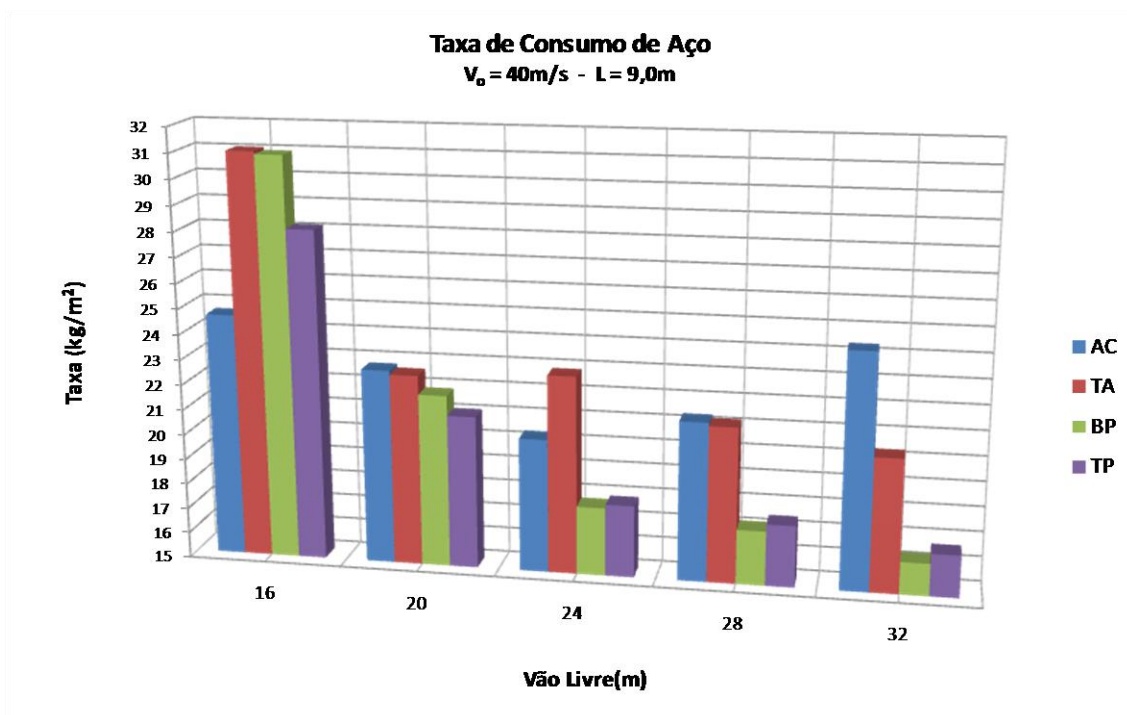


Figura 5.34 - Variação da taxa de consumo de aço global por tipologia, em função do vão livre,  $V_0 = 40\text{m/s}$  e  $L = 9,0\text{m}$ .

Analisando as figuras anteriores verifica-se que para vãos livres maiores que 20m as tipologias em pórticos de treliça de banzos paralelos (BP) e de treliça trapezoidal (TP) apresentam menor taxa de consumo de aço.

A tipologia em pórtico de alma cheia apresenta um bom desempenho, em termos de taxa de consumo de aço, para vãos livres na faixa de 20m a 28m, conforme mostra as Figuras 5.19 e 5.20. Para o mesmo espaçamento entre os pórticos, variando apenas a velocidade básica do vento verifica-se que a taxa de consumo de aço aumenta consideravelmente.

Para a velocidade básica do vento igual a 30m/s os pórticos de treliça trapezoidal e de treliça de banzos paralelos apresentam uma semelhança quanto à taxa de consumo de aço, conforme ilustra a Figura 5.17.

Verifica-se por meio de análises dos gráficos mostrados nas Figuras 5.17 a 5.34, que a taxa de consumo de aço é influenciada pelo acréscimo da ação do vento nos pórticos de treliças em arco.

### **5.1.3. Variação da Taxa de Consumo de Aço para Diferentes Tipos de Vinculação das Bases**

Para avaliar a influência do tipo de vinculação das bases das colunas do pórtico na taxa de consumo de aço foram analisados e dimensionados novos modelos estruturais compostos pelas quatro (04) tipologias, analisadas anteriormente com as bases rotuladas, para os cinco (05) vãos livres em estudo e velocidade  $V_0 = 35\text{m/s}$ , totalizando 20 modelos com as bases engastadas. As Figuras 5.35 a 5.38 mostram em gráfico os resultados da taxa de consumo de aço global das diferentes tipologias em função do tipo de vinculação das bases (engastada e rotulada). Na Figura 5.39 está apresentada a sobreposição da taxa de consumo aço global para as diversas tipologias, inclusive para o pórtico com treliça triangular que foi definido somente com base engastada, em virtude do afunilamento produzido pelo arranjo das barras.

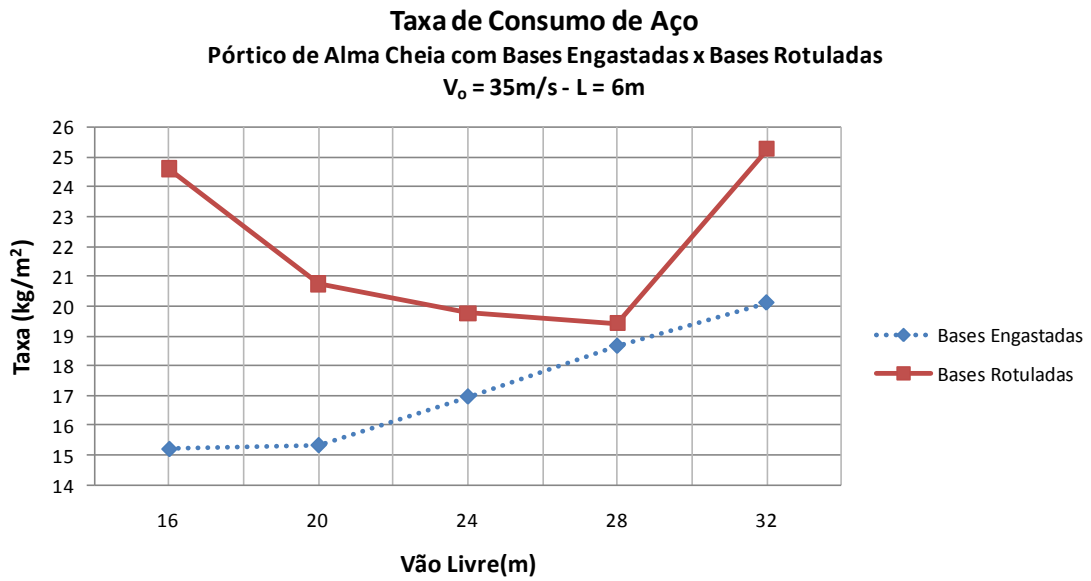


Figura 5.35 - Variação da taxa de consumo de aço global para tipologia AC, em função do tipo de vinculação das bases,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

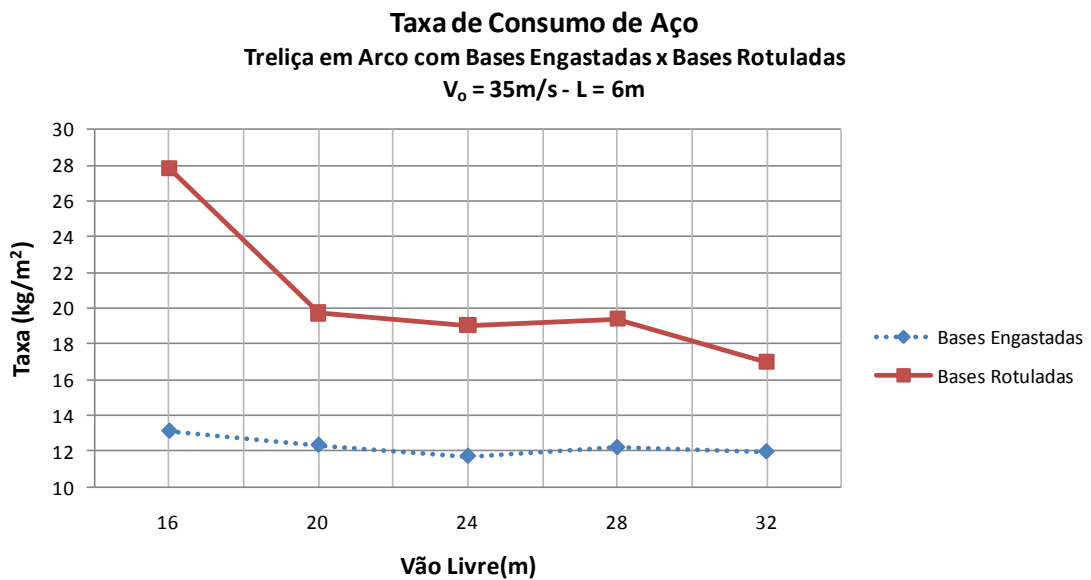


Figura 5.36 - Variação da taxa de consumo de aço global para tipologia TA, em função do tipo de vinculação das bases,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

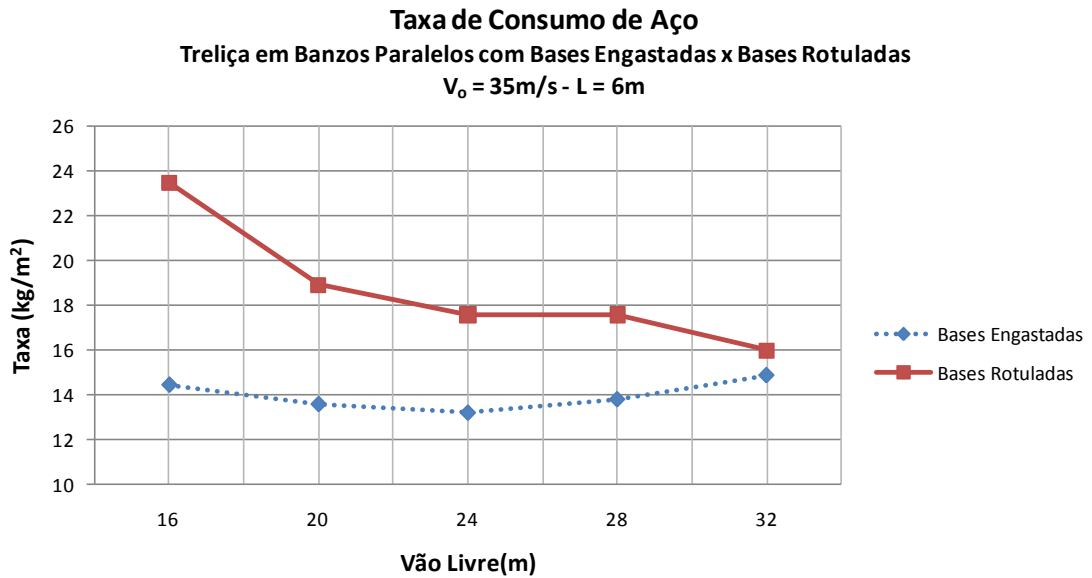


Figura 5.37 - Variação da taxa de consumo de aço global para tipologia BP, em função do tipo de vinculação das bases,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

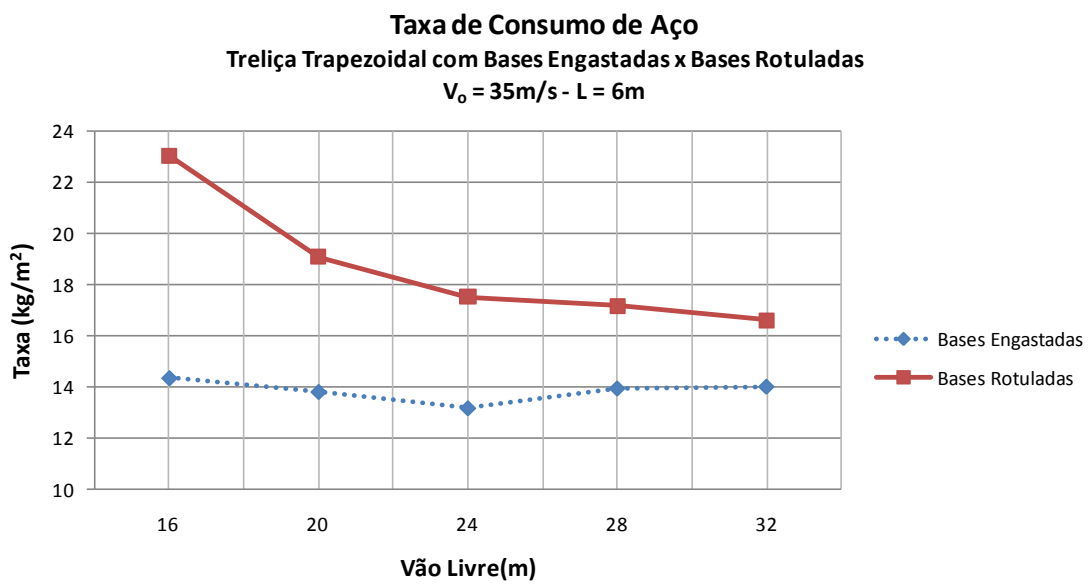


Figura 5.38 - Variação da taxa de consumo de aço global para tipologia TP, em função do tipo de vinculação das bases,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

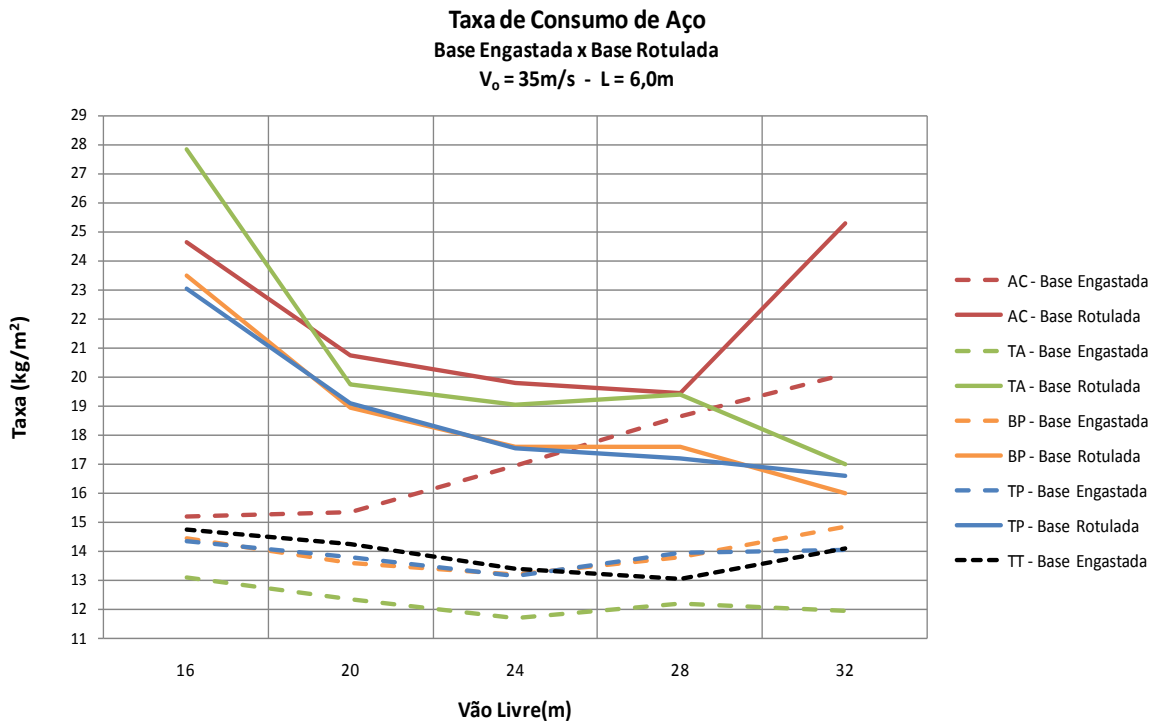


Figura 5.39 - Variação da taxa de consumo de aço global para as tipologias AC, TA, BP, TP e TT, em função do tipo de vinculação das bases,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

Após análise comparativa dos resultados apresentados nas Figuras 5.35 a 5.39 pode-se verificar que a taxa de consumo de aço é fortemente influenciada pelo tipo de vinculação das bases das colunas dos modelos estruturais. No pórtico em alma cheia, a influência do tipo de vinculação é praticamente desprezível para o vão livre de 28 m.

O pórtico formado por treliça em arco com as bases engastadas apresenta melhor o desempenho em termos de consumo de aço, em comparação com as outras tipologias. A Figura 5.36 ilustra que a taxa de consumo de aço para a tipologia composta por treliça em arco é de  $12\text{ kg/m}^2$ . A taxa de consumo de aço para os pórticos constituídos por treliça de banzos paralelos e treliça trapezoidal é aproximadamente igual a  $14\text{ kg/m}^2$ , conforme ilustram as Figuras 5.37 e 5.38.



## 5.2. Comparativo dos Deslocamentos dos Modelos Analisados

### 5.2.1. Sobreposição dos Deslocamentos Horizontais

Apresentam-se nas Figuras 5.40 a 5.48 uma sobreposição dos deslocamentos horizontais ( $\Delta H$ ). De forma semelhante às taxas de consumo de aço, os deslocamentos do pórtico transversal também podem ser utilizados como uma referência para comparação do desempenho das tipologias.

Apresenta-se na Tabela 5.1 os valores limites para o deslocamento horizontal, estabelecidos no presente trabalho, com base nas recomendações da NBR8800: 2008 (ABNT, 2008), Anexo C, que limita o deslocamento horizontal máximo em  $H/300$ , sendo  $H$  a altura da coluna. Estes valores além de limitar os deslocamentos máximos serão possíveis compara os diferentes sistemas estruturais estudados no presente trabalho.

Tabela 5.1 - Deslocamento horizontal máximo para as diversas tipologias

Tipologia	Vão Livre (m)	$\Delta H_{\text{máx}}$ (mm)
AC e TT	16, 20, 24, 28 e 32	2,00
TA	16	2,22
	20	2,31
	24	2,38
	28	2,44
	32	2,50
BP e TP	16	2,27
	20	2,33
	24	2,40
	28	2,47
	32	2,53

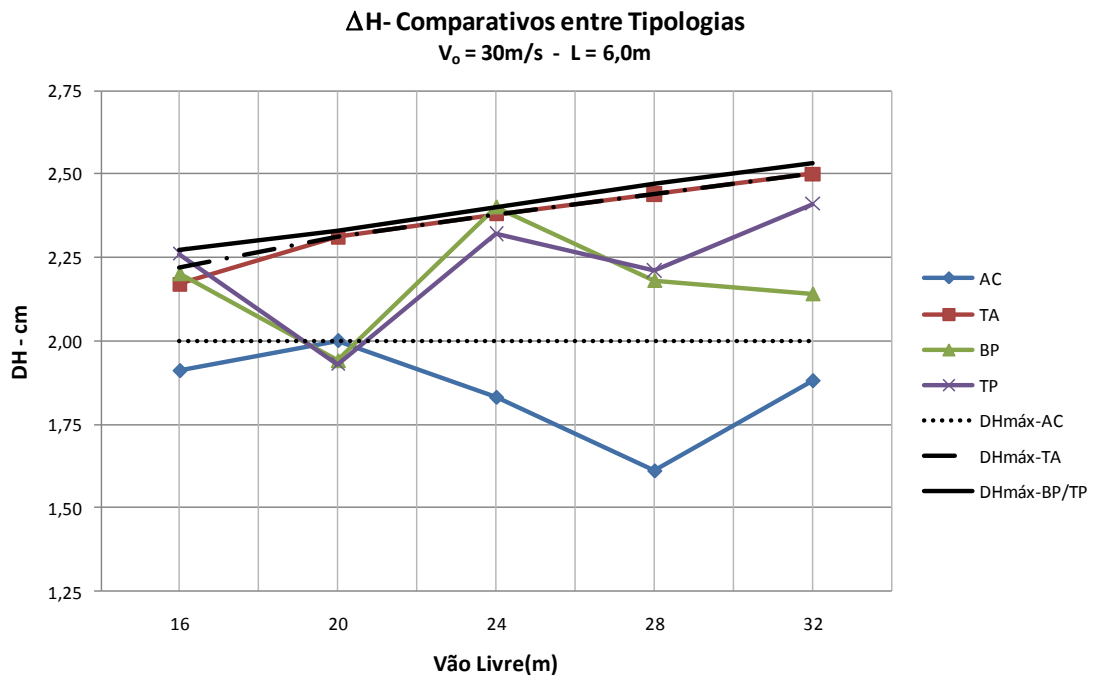


Figura 5.40 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 30\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

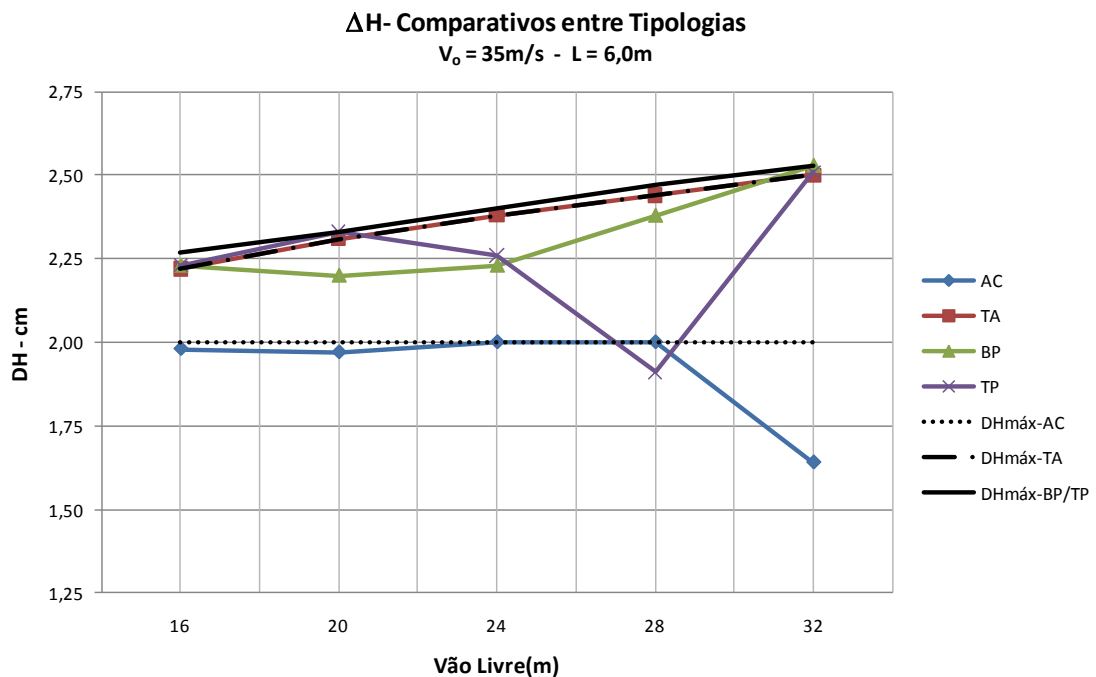


Figura 5.41 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

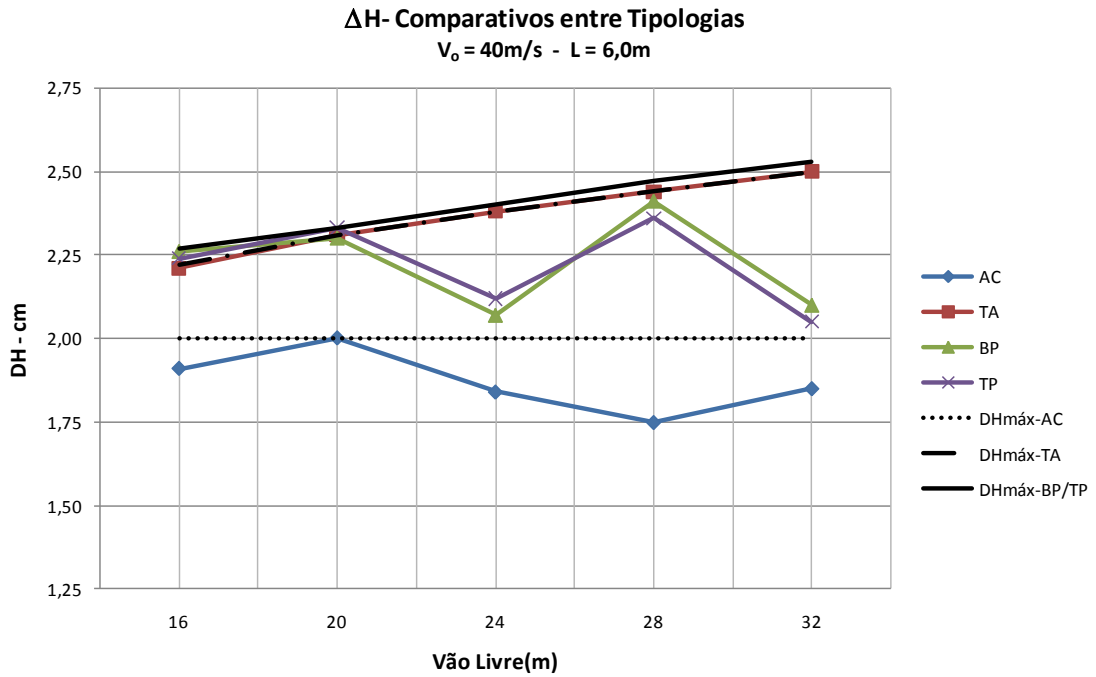


Figura 5.42 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 40\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

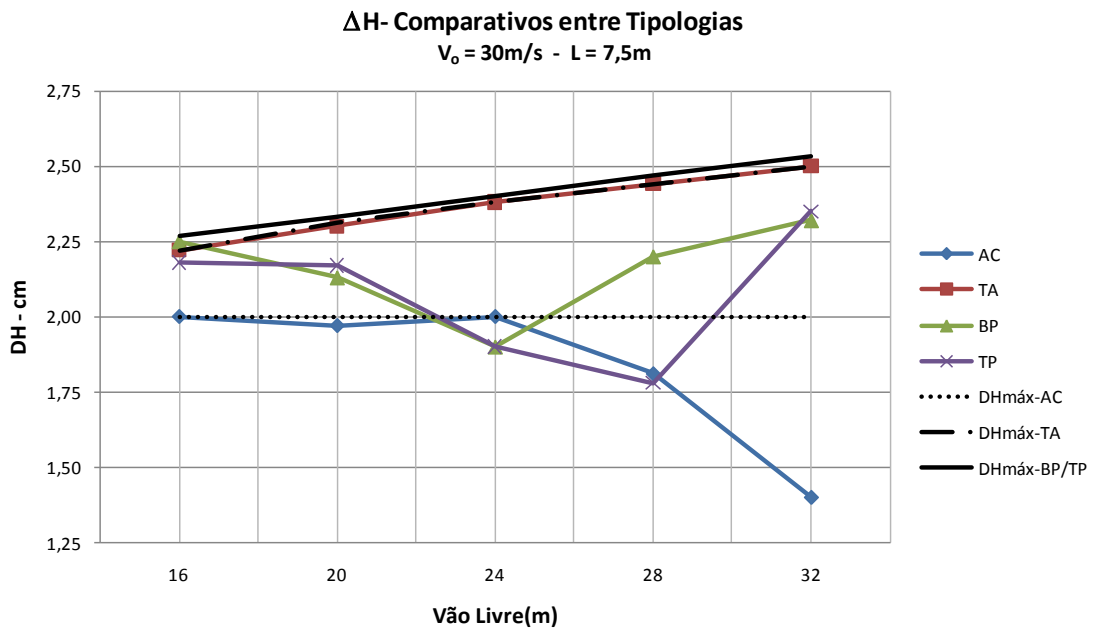


Figura 5.43 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 30\text{m/s}$  e  $L = 7,5\text{m}$ .

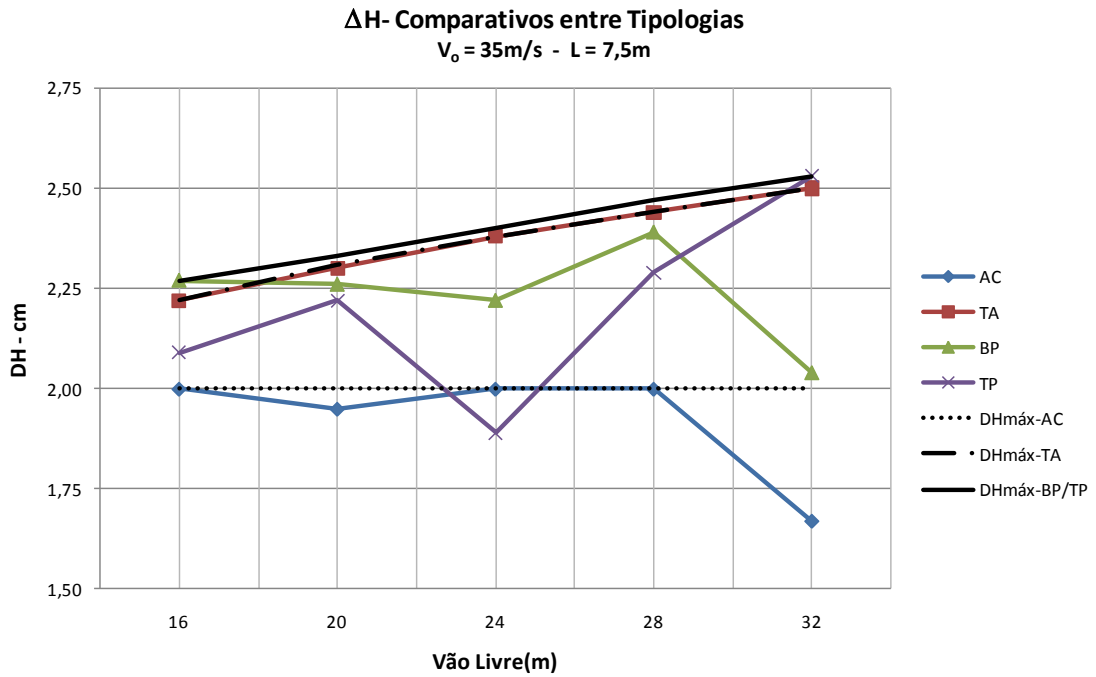


Figura 5.44 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 7,5\text{m}$ .

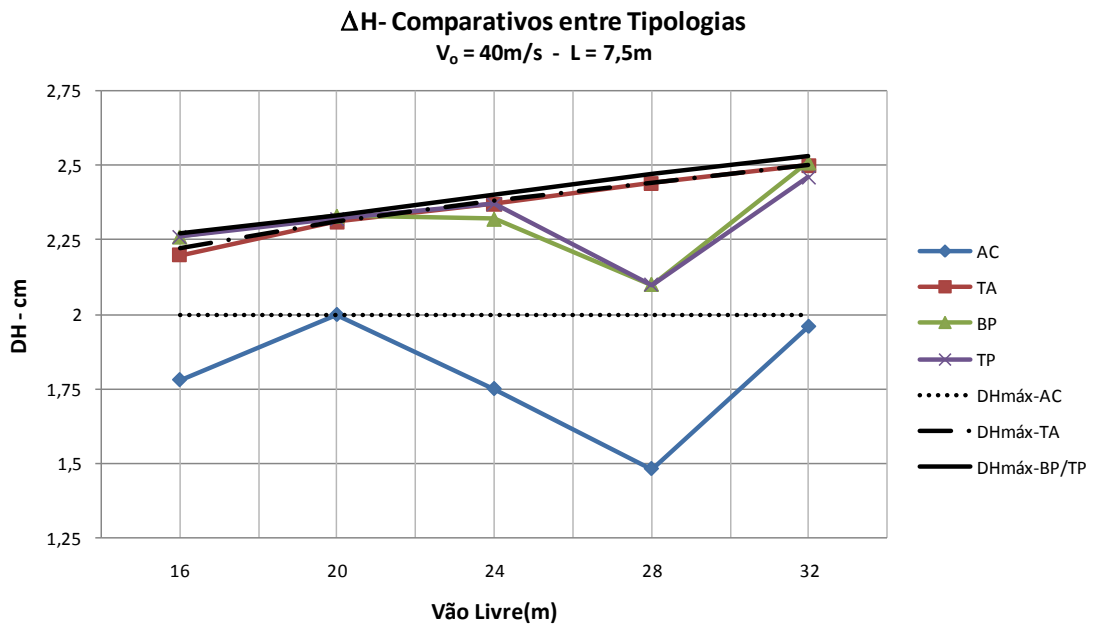


Figura 5.45 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 40\text{m/s}$  e  $L = 7,5\text{m}$ .

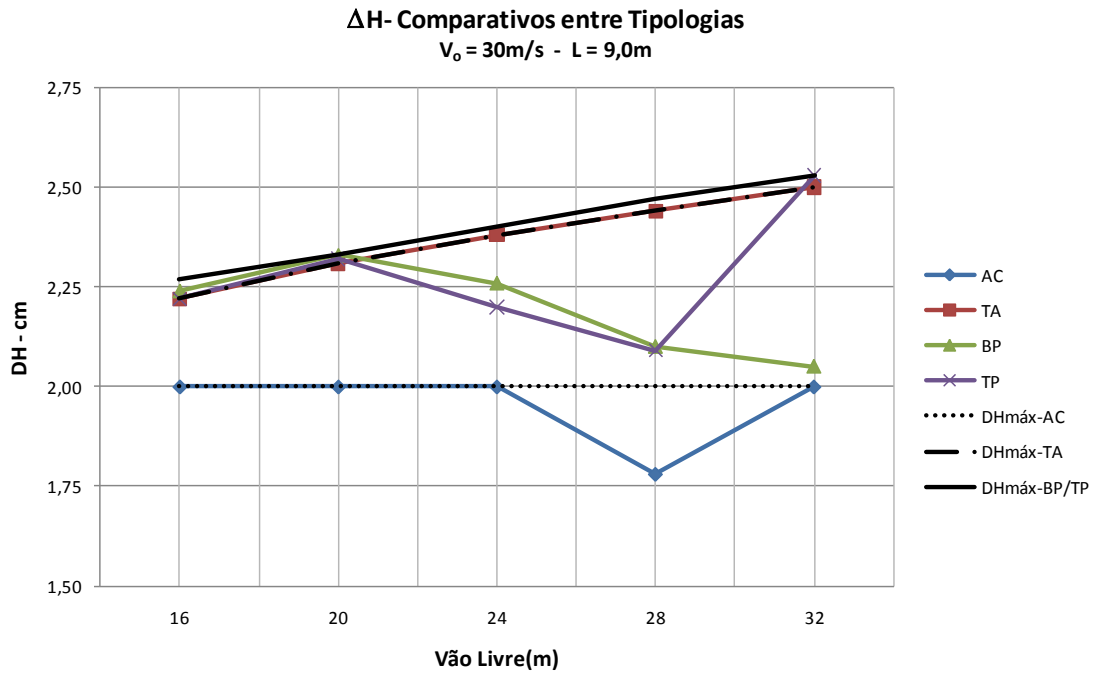


Figura 5.46 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 30\text{m/s}$  e  $L = 9,0\text{m}$ .

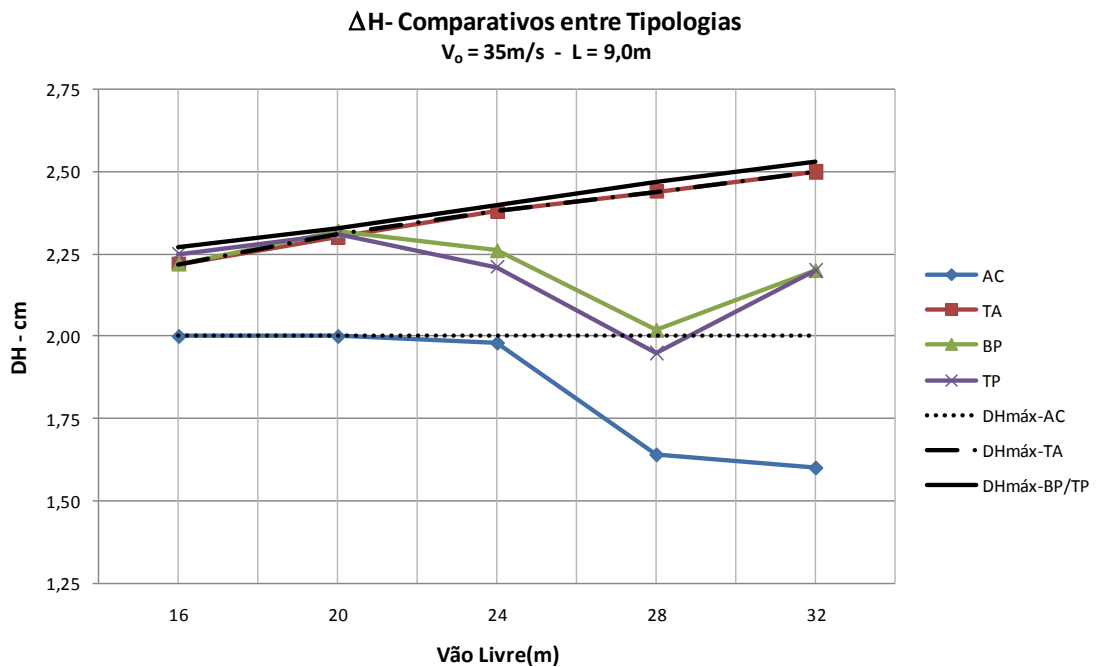


Figura 5.47 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 9,0\text{m}$ .

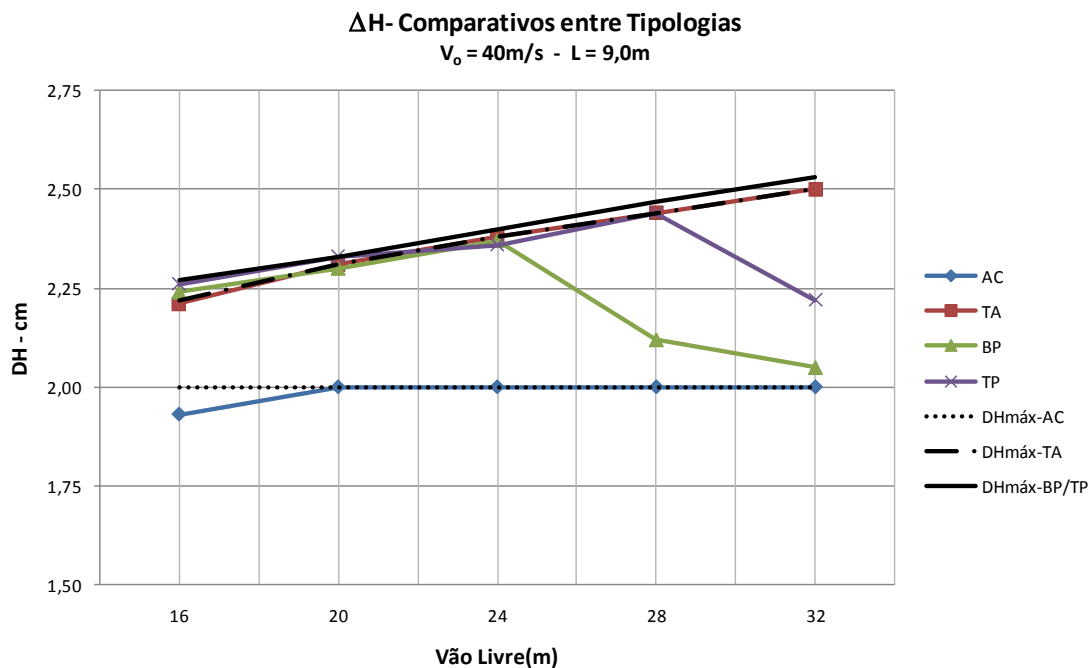


Figura 5.48 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 40\text{m/s}$  e  $L = 9,0\text{m}$ .

Em galpões de uso geral, normalmente, os deslocamentos horizontais são provocados pela movimentação de ponte rolante e pela ação do vento que atua na direção transversal do galpão. Para verificação do deslocamento horizontal máximo, neste trabalho considera-se o critério indicado pela norma da NBR8800: 2008 (ABNT, 2008), Anexo C, que recomenda levar em consideração a ação do vento e estabelece um valor máximo médio da ordem de  $H/300$ .

Analisando as Figuras 5.40 a 5.48 pode-se verificar que todos os modelos estruturais atendem ao Estado Limite de Utilização de deslocamentos excessivos da estrutura, conforme a comparação com os deslocamentos horizontais com os valores limites estabelecidos pela norma NBR8800: 2008 (ABNT, 2008).

Os principais elementos estruturais responsáveis por conter os deslocamentos horizontais nos pórticos transversais são as colunas. A viga de cobertura também contribui para conter esses deslocamentos horizontais, no entanto, essa parcela não é tão representativa.

Como o deslocamento horizontal máximo é em função da altura da coluna, nem todos os modelos os modelos apresentam a mesma altura da coluna (6m), as séries referentes aos deslocamentos horizontais máximos formam uma linha horizontal somente para os pórticos em alma cheia e o pórtico em treliça triangular, nesta tipologia a altura da coluna foi considerada igual para todos os modelos. Nas outras tipologias o deslocamento máximo representa-se uma reta com uma pequena inclinação em função da altura da viga, variando com o aumento do vão livre.

Não há uma definição clara sobre qual tipologia de pórtico é mais eficiente quanto ao deslocamento horizontal. Porém, durante as análises verificou-se que o deslocamento horizontal foi um fator condicionante para o dimensionamento dos pórticos transversais.

### 5.2.2. Sobreposição dos Deslocamentos Verticais

Apresenta-se nas Figuras 5.49 a 5.57 uma sobreposição dos deslocamentos verticais ( $\Delta V$ ). Como mencionado os deslocamentos do pórtico transversal também podem ser utilizados como uma referência para comparação do desempenho das tipologias. Por esta razão, avaliam-se também os deslocamentos verticais.

A norma NBR8800: 2008 (ABNT, 2008), Anexo C, recomenda adotar o valor máximo para o deslocamento vertical igual a  $L/250$ , sendo  $L$  o vão teórico entre apoios. A Tabela 5.2 ilustra os valores limites estabelecidos, no presente trabalho, para as diferentes tipologias.

Tabela 5.2 - Deslocamento vertical máximo para as diversas tipologias

Tipologia	Vão Livre (m)	$\Delta V_{\text{máx}}$ (mm)
AC, TA, BP, TP e TT	16	6,40
	20	8,00
	24	9,60
	28	11,20
	32	12,80

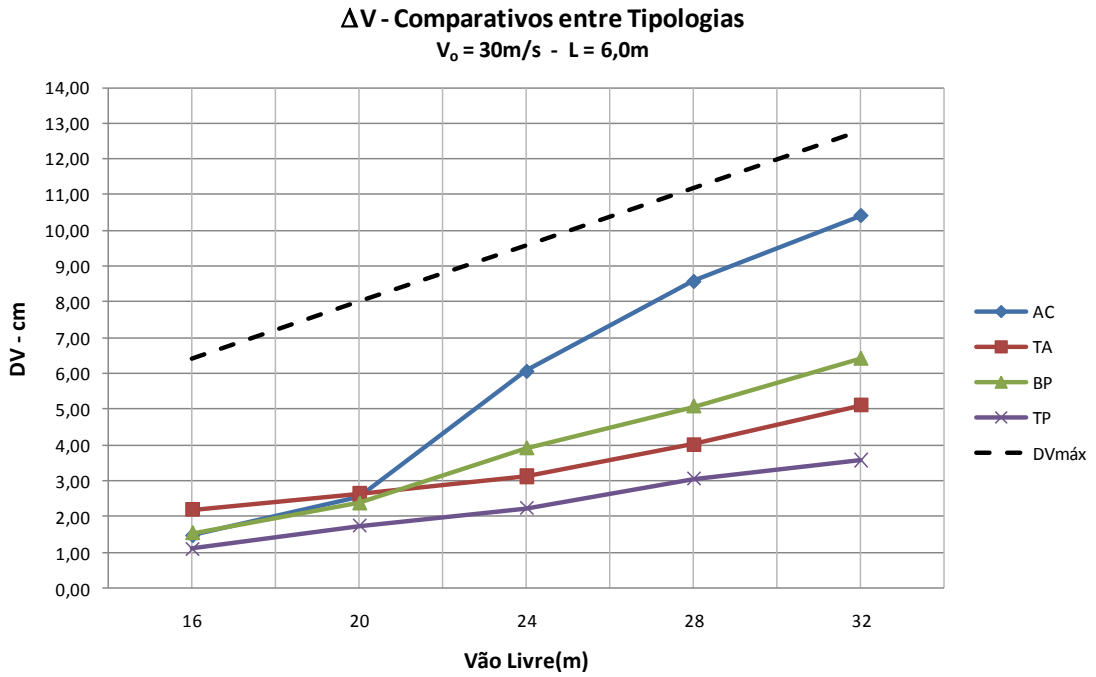


Figura 5.49 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 30\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

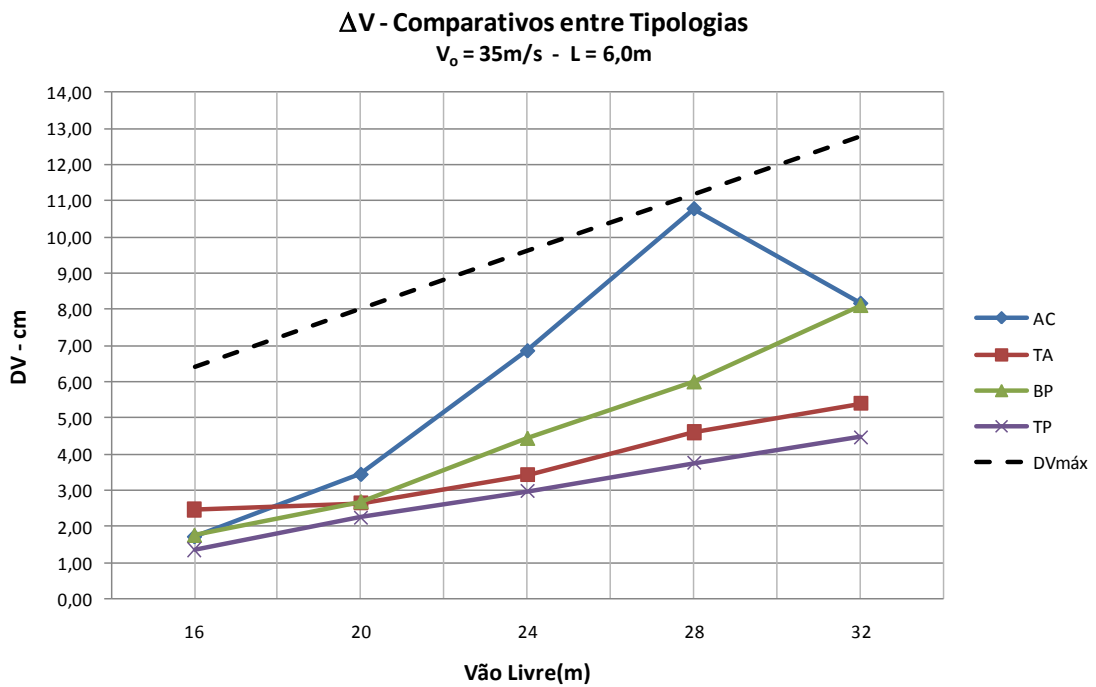


Figura 5.50 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .



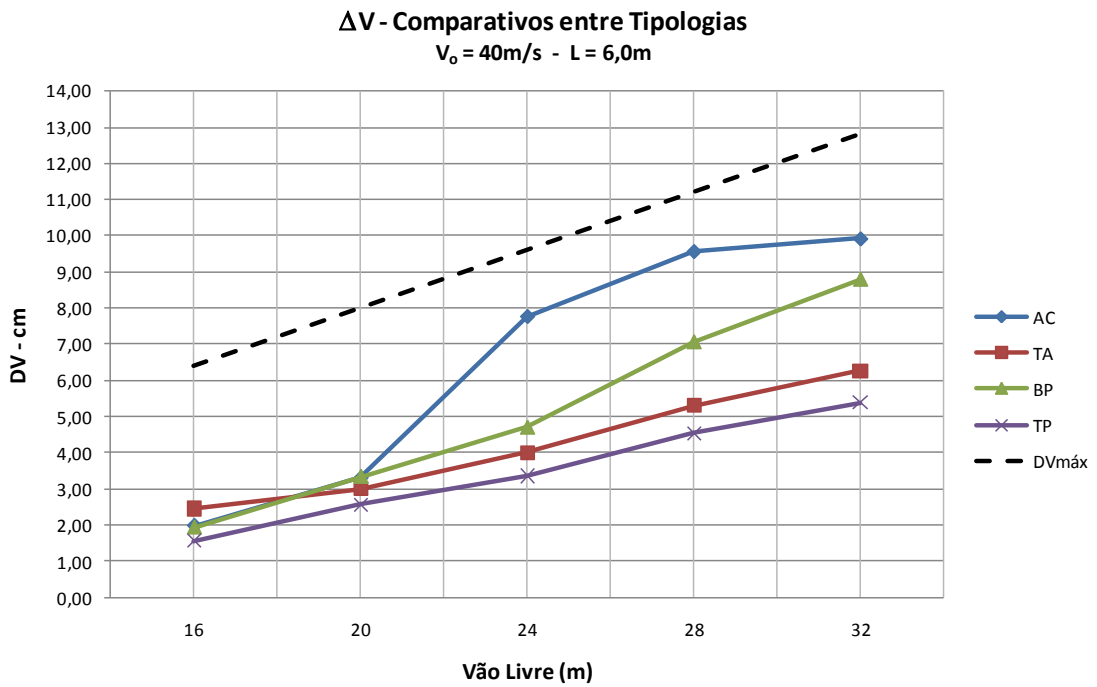


Figura 5.51 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 40\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

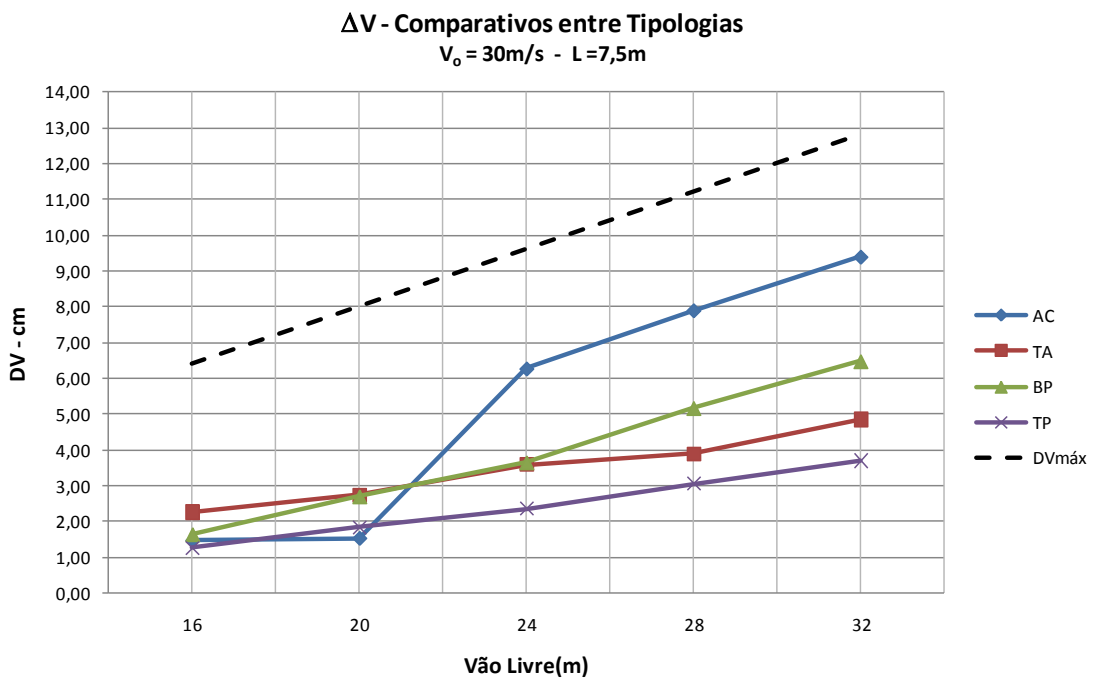


Figura 5.52 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 30\text{m/s}$  e  $L = 7,5\text{m}$ .

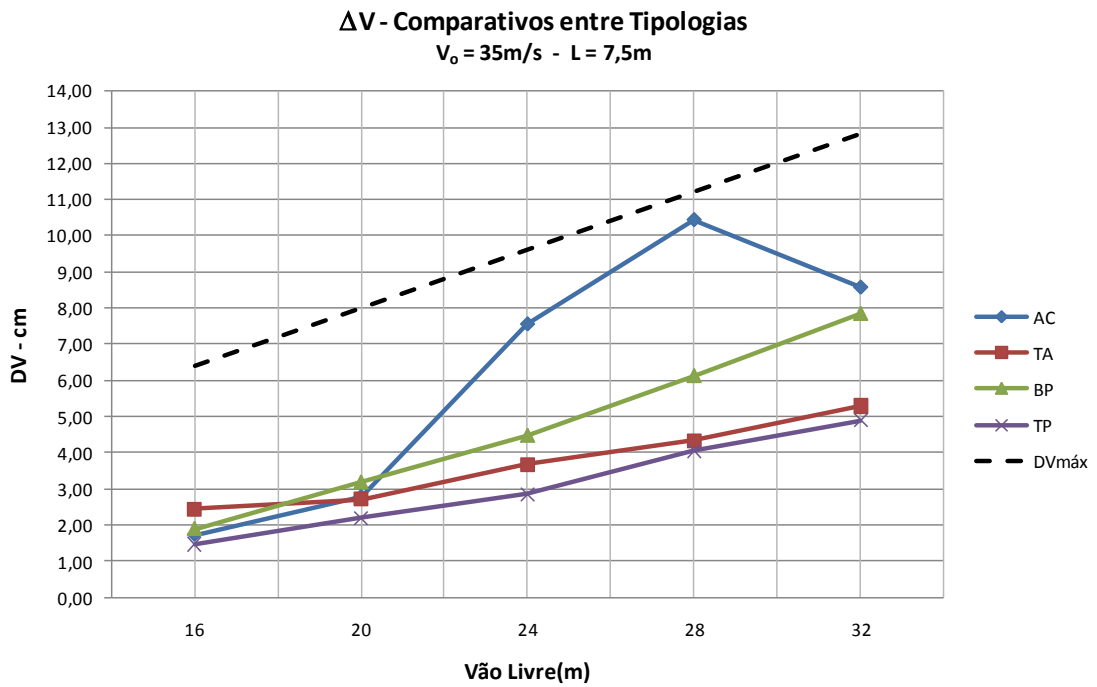


Figura 5.53 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 7,5\text{m}$ .

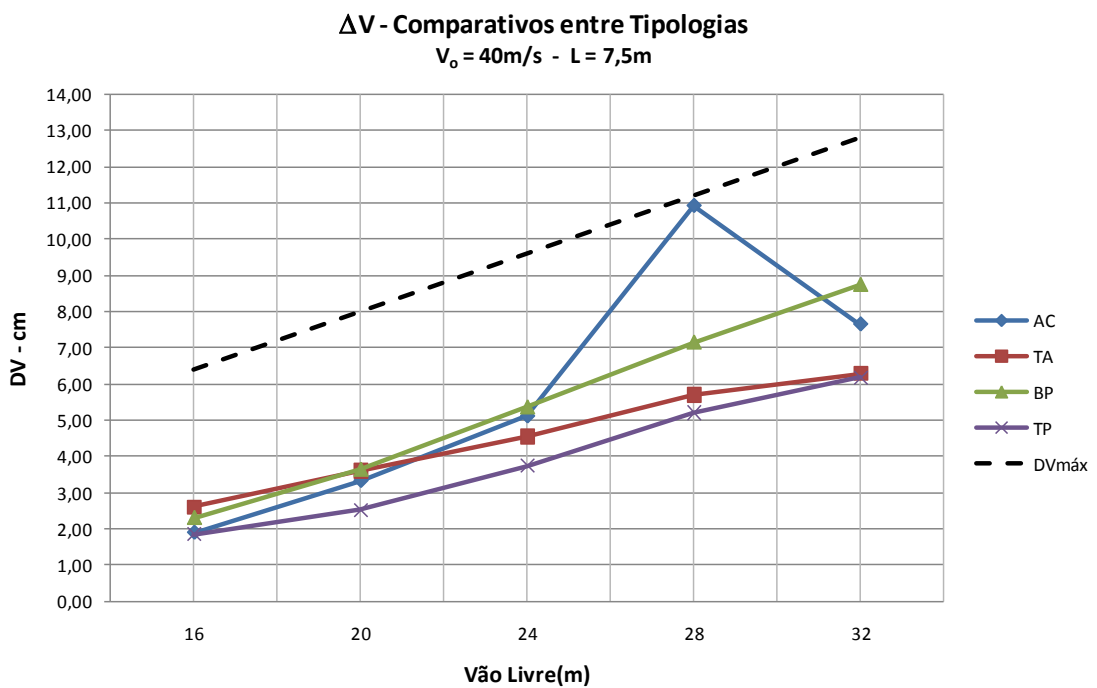


Figura 5.54 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 40\text{m/s}$  e  $L = 7,5\text{m}$ .

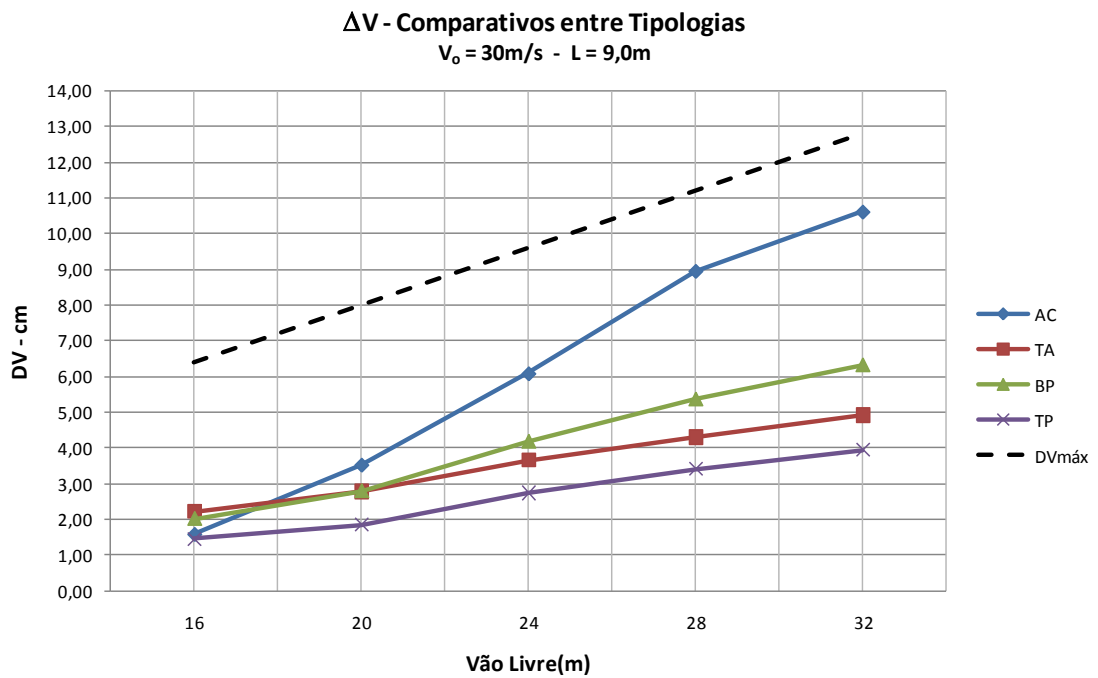


Figura 5.55 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 30\text{m/s}$  e  $L = 9,0\text{m}$ .

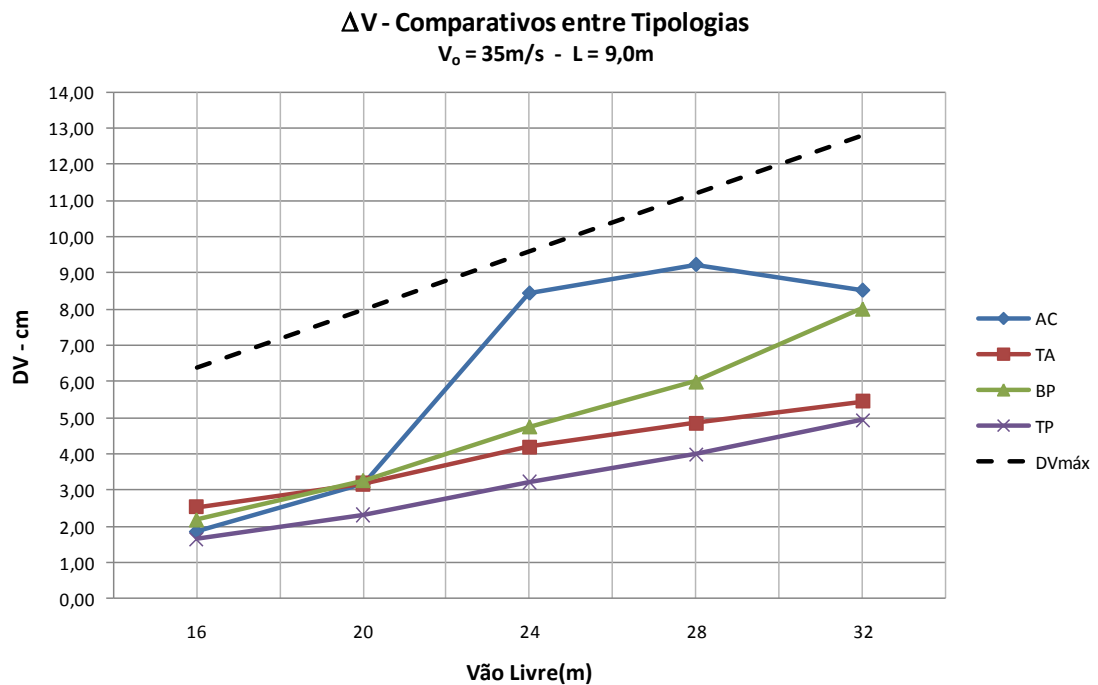


Figura 5.56 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$  e  $L = 9,0\text{m}$ .

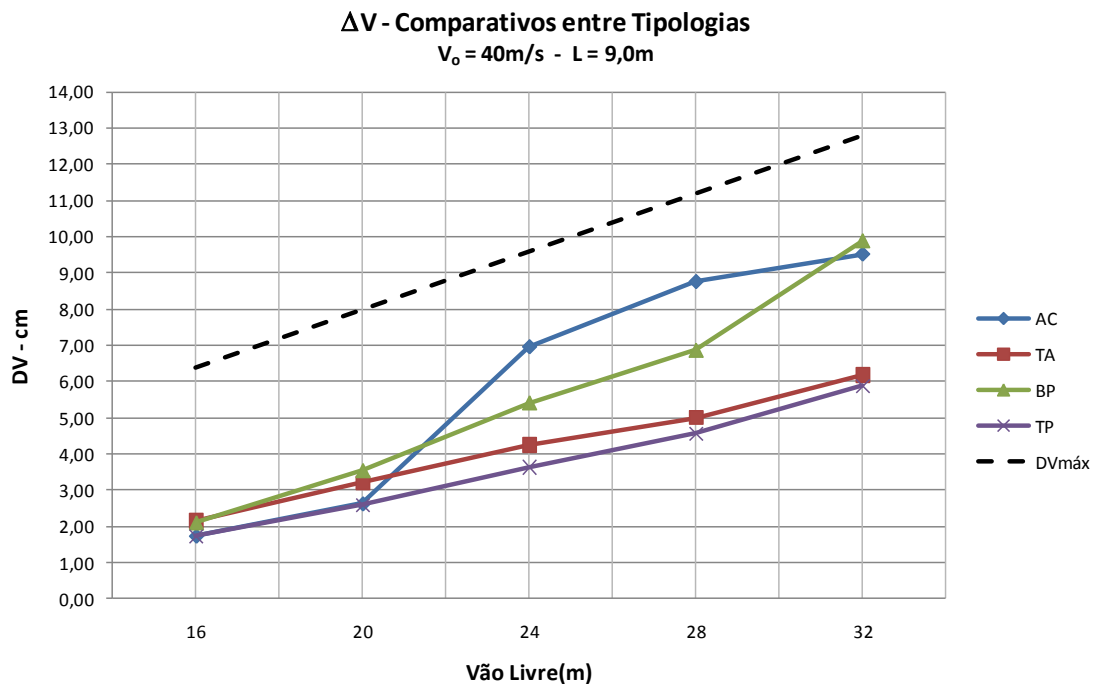


Figura 5.57 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para as tipologias AC, TA, BP e TP, em função do vão livre,  $V_0 = 40\text{m/s}$  e  $L = 9,0\text{m}$ .

Normalmente, os deslocamentos verticais são provocados pela ação das forças devido ao vento, peso próprio e sobrecarga. A norma NBR8800: 2008 (ABNT, 2008), anexo C, recomenda considerar a sobrecarga de cobertura para a verificação do deslocamento vertical máximo em edifícios industriais e estabelece um valor máximo de  $L/180$  para o caso de estruturas biapoiadas suportando elementos de cobertura elásticos. Considerando que atualmente tem sido comum a não utilização de contraflecha nas vigas de cobertura, admite-se uma combinação de peso próprio e sobrecarga ( $\text{COMB4} = G + Q$ ) para essa verificação.

Da mesma forma que para os limites dos deslocamentos horizontais, para os deslocamentos verticais, os modelos atendem ao Estado Limite de Utilização seguindo as prescrições da norma NBR8800: 2008 (ABNT, 2008).

O pórtico em treliça trapezoidal apresenta menor deslocamento vertical. Isto ocorre devido à grande inércia equivalente da viga treliçada trapezoidal e da ligação

viga/coluna. Pode-se então interpretar que o pórtico em treliça trapezoidal é uma viga equivalente com seção variável e ligação rígida com as colunas.

Nas vigas treliçadas em banzos paralelos e treliça em arco, a falta de um elemento para conter o deslocamento horizontal do topo das colunas provoca deslocamentos verticais superiores àqueles produzidos nas vigas treliçadas trapezoidais.

### 5.2.3. Avaliação dos Deslocamentos Horizontais e Verticais para Diferentes Tipos de Vinculação das Bases

Verifica-se que as vinculações nas bases podem gerar bastante influência nos deslocamentos verticais e horizontais nos modelos estruturais analisados. A título de comparação foram representados nas Figuras 5.58 e 5.59 os deslocamentos verticais e horizontais, respectivamente, para modelos pertencentes as quatro (04) tipologias, admitindo a velocidade básica do vento  $V_0 = 35\text{m/s}$  e com o espaçamento entre os pórticos iguais a 6m, totalizando 20 modelos.

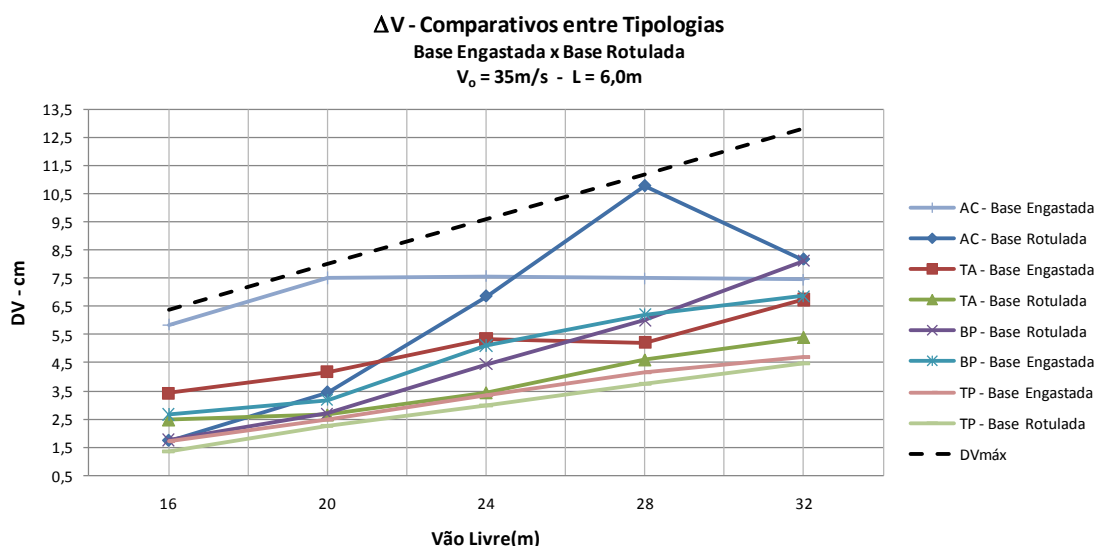


Figura 5.58 - Sobreposição dos deslocamentos verticais, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$ ,  $L = 6,0\text{m}$ , bases engastadas e bases rotuladas.

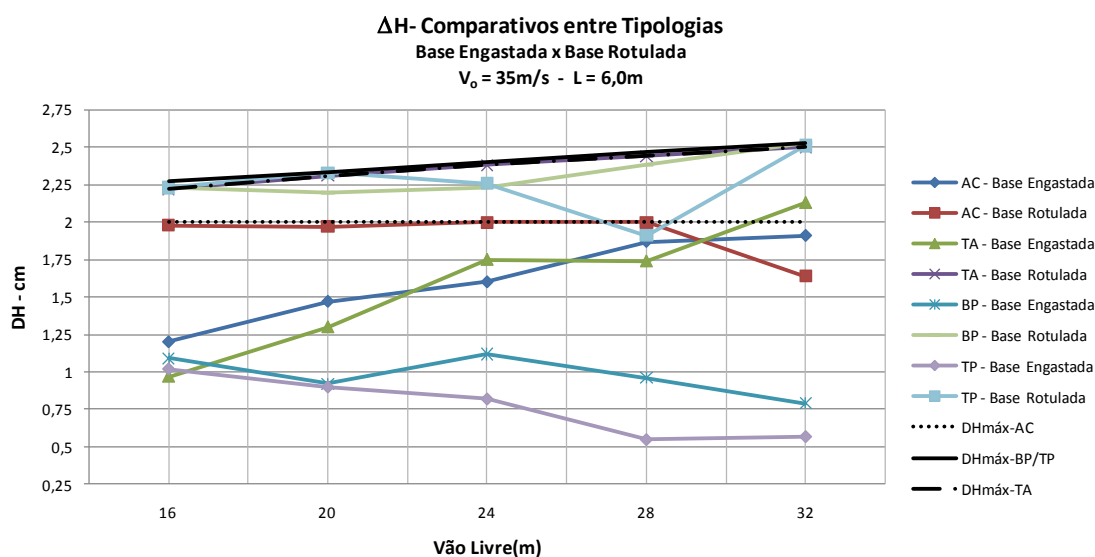


Figura 5.59 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais, em função do vão livre,  $V_0 = 35\text{m/s}$ ,  $L = 6,0\text{m}$ , bases engastadas e bases rotuladas.

Observa-se que os deslocamentos verticais não sofrem grandes influências quanto ao tipo de vinculação das bases (Figura 5.58), porém, em se tratando do deslocamento horizontal o tipo de vinculação altera de forma expressiva o valor do deslocamento. A Figura 5.59 mostra que os pórticos em alma cheia, treliça trapezoidal e de banzos paralelos com as bases engastadas apresentam deslocamentos horizontais bem inferiores aos registrados para estas mesmas tipologias com as bases rotuladas.

O pórtico formado por treliça em arco, com as bases engastadas, apresenta valores baixos para o deslocamento horizontal somente para vãos livre até 24m, a partir de então, equipara ao pórtico em alma cheia com as bases rotuladas e, a partir dos 28m registra-se maiores deslocamentos que o pórtico em alma cheia.

### 5.3. Comparativo da Taxa de Consumo de Aço com os Resultados da Literatura

Apresenta-se neste item uma análise comparativa da taxa de consumo de aço obtida para os modelos estudados com os resultados registrados na literatura.

### 5.3.1. Consumo de Aço para Galpão em Pórtico de Alma Cheia

Comparam-se nesta seção os resultados obtidos para o consumo de aço da tipologia em pórtico de alma cheia (AC) com as taxas registradas nos trabalhos apresentados por CHAVES (2007) e D'ALAMBERT (2004) para modelos estruturais similares, conforme descrição apresentada no Capítulo 2.

A taxa de consumo de aço para pórtico em alma cheia, empregando perfis laminados, apresentado D'ALAMBERT (2004) leva em consideração o peso das terças e contraventamento e, o modelo estrutural foi constituído com as bases engastadas. No presente trabalho considera-se os mesmos parâmetros e o mesmo estágio de carregamento, portanto, a análise comparativa é válida e indica um bom desempenho dos pórticos em alma cheia com as bases engastadas.

A Figura 5.60 ilustra os resultados obtidos por D'ALAMBERT (2004) em comparação com os resultados obtidos no presente trabalho levando-se em consideração os diferentes tipos de vinculações com a base (engastado e rotulado).

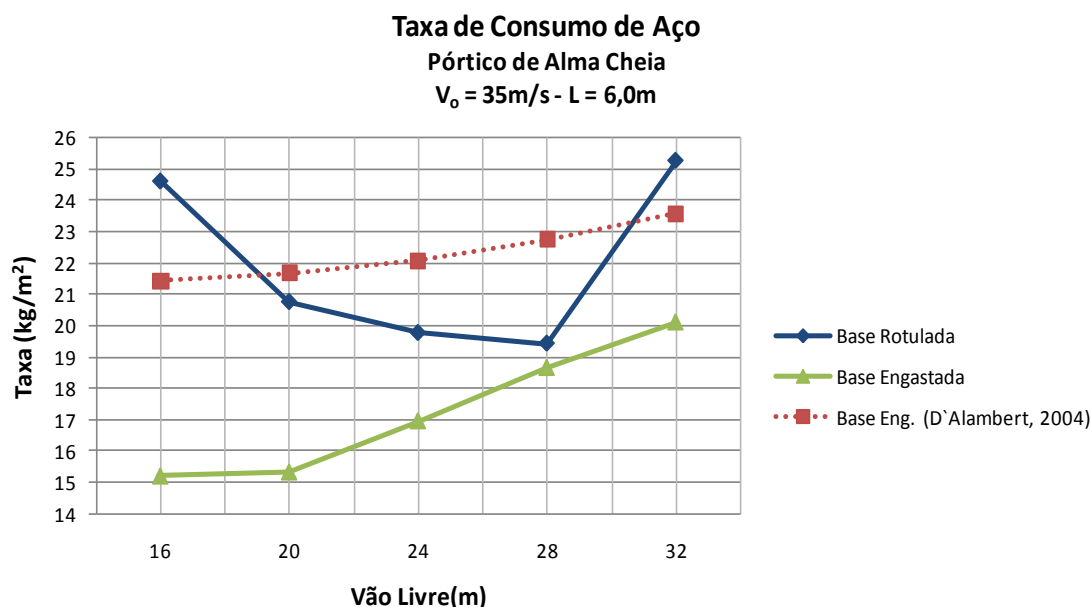


Figura 5.60 - Comparativo da taxa de consumo de aço dos pórticos transversais com os resultados de D'ALAMBERT (2004) para pórticos de alma cheia (AC),  $V_0=35\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

Os modelos estruturais em pórtico transversal de alma cheia, em estudo, foram constituídos por perfis soldados da série CS nas colunas e VS nas vigas. Analisando a Figura 5.60 verifica-se que apenas para o vão livre de 16m e 32m, a taxa de consumo de aço para modelos com as bases rotuladas é superior à taxa para modelos por perfis laminados. Observa-se que modelos com bases engastadas apresentam um excelente desempenho, quando comparados tanto com os modelos compostos por perfis laminados quanto com os constituídos por perfis soldados, porém, com bases rotuladas.

Na Figura 5.61 está ilustrada a taxa de consumo de aço do pórtico principal apresentado por CHAVES (2007), com as bases engastadas, os modelos analisados são constituídos por perfis eletro soldados CVE nas colunas e VE nas vigas, admitindo o mesmo estágio de ação do vento e o mesmo espaçamento entre os pórticos transversais (6m).

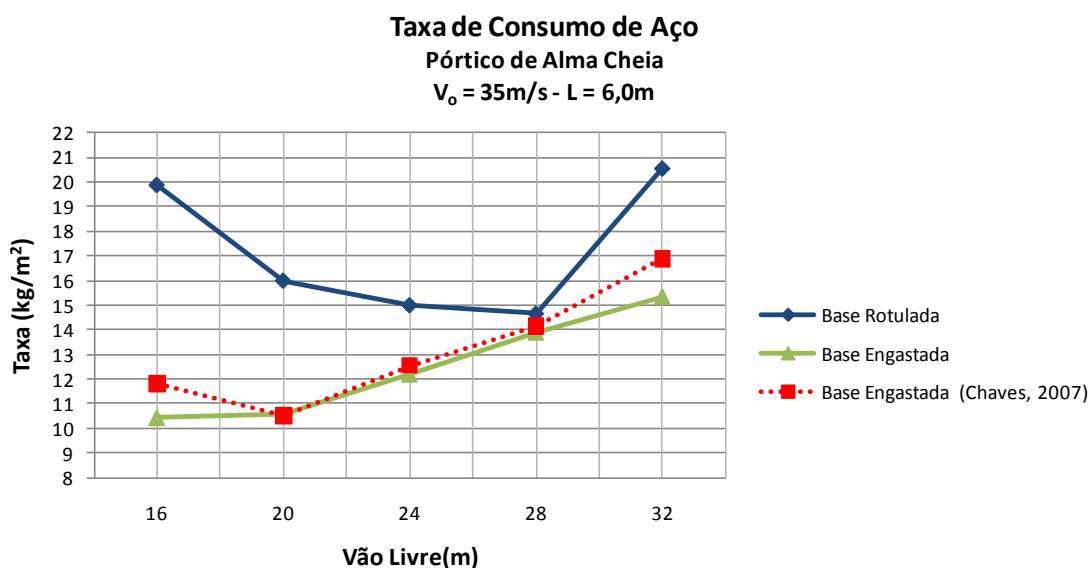


Figura 5.61 - Comparativo da taxa de consumo de aço dos pórticos transversais com os resultados de CHAVES (2007) para pórticos de alma cheia (AC),  $V_0=35\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

Verifica-se na Figura 5.61 que galpões com perfis eletro soldados geram soluções mais econômica do ponto de vista da taxa de consumo de aço quando comparados com os modelos com as bases rotuladas. Porém, a taxa de consumo é praticamente a mesma quando se compara os modelos de CHAVES (2007) e os do presente trabalho, com as bases engastadas.



A diferença na taxa de consumo de aço em função da vinculação das bases foi também comentada por BELLEI (2006), em que, ao se trabalhar com um pórtico engastado nas bases é possível obter uma melhor redistribuição de esforços e um dimensionamento mais econômico.

### 5.3.2. Consumo de Aço para Galpão em Pórtico Treliçado

Em seu estudo CHAVES (2007) avaliou o desempenho de tipologias para galpões formados por pórticos transversais treliçados, admitindo os modelos com as bases engastadas, espaçamento entre pórticos transversais iguais a 6m e vigas compostas por perfis em dupla cantoneira (2L) e perfis eletro-soldado (TE). Na determinação da taxa de consumo de aço não foi considerado o peso das telhas, terças e contraventamento.

Na análise comparativa da taxa de consumo de aço deste trabalho com os resultados de CHAVES (2007) foi considerado apenas o consumo de aço do pórtico principal para as cinco tipologias, mantendo-se o espaçamento entre os pórticos transversais de 6,0m e velocidade básica do vento  $V_0 = 35\text{m/s}$ .

A Figura 5.62 ilustra o comparativo da taxa de consumo de aço do pórtico em treliça triangular, considerando os mesmos parâmetros em ambas as análises.

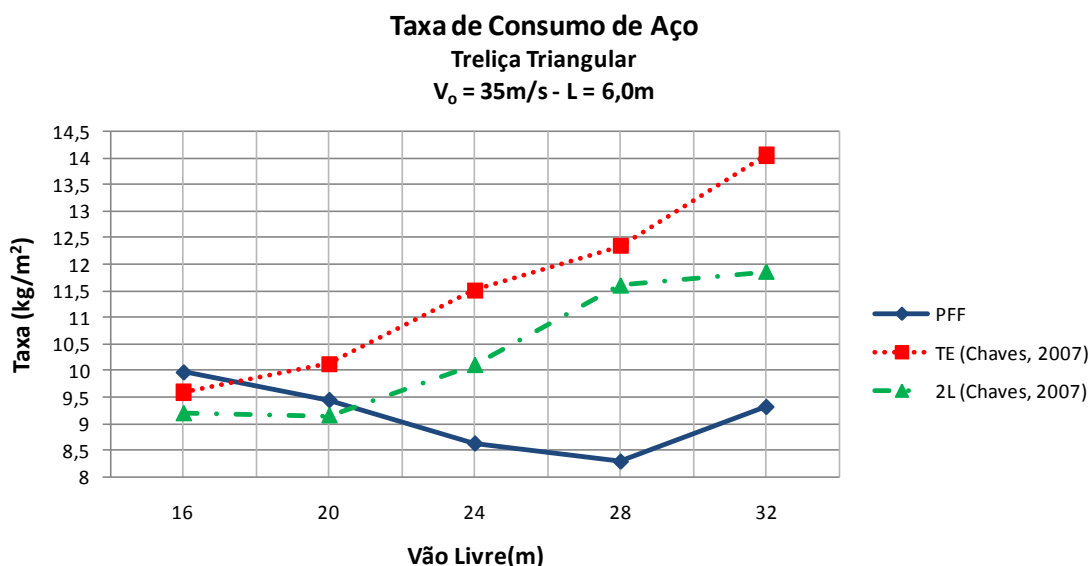


Figura 5.62 - Comparativo da taxa de consumo de aço para pórticos com treliça triangular (TT).

Observa-se na Figura 5.62 que os modelos avaliados por CHAVES (2007) apresentam um desempenho melhor, do ponto de vista de taxa de consumo de aço, somente para o vão livre de 16m. Com o aumento do vão livre a solução empregando perfis formados a frio é mais vantajosa por resulta em uma menor taxa de consumo de aço.

Para uma melhor comparação de resultados do presente trabalho com os apresentados por CHAVES (2007), realizou-se uma retroanálise em mais 20 modelos estruturais formados por pórticos principais empregando vigas treliçadas e a vinculação das bases engastadas. Admitindo-se em todos os modelos, a velocidade básica do vento, para determinação da pressão dinâmica devido a ação do vento, igual a 35m/s e espaçamento entre os pórticos transversais igual a 6m.

Nas Figuras 5.63, 5.64 e 5.65 mostram os resultados, que possibilita compara as taxas de consumo de aço, para a retroanálises propostas.

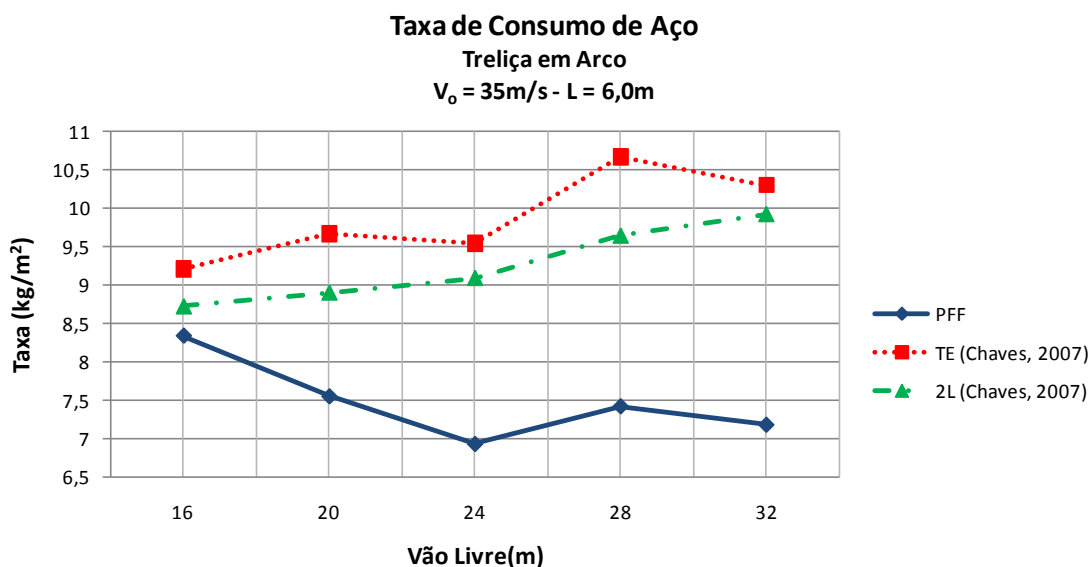


Figura 5.63 - Comparativo da taxa de consumo de aço para pórticos com treliça em Arco (TA).

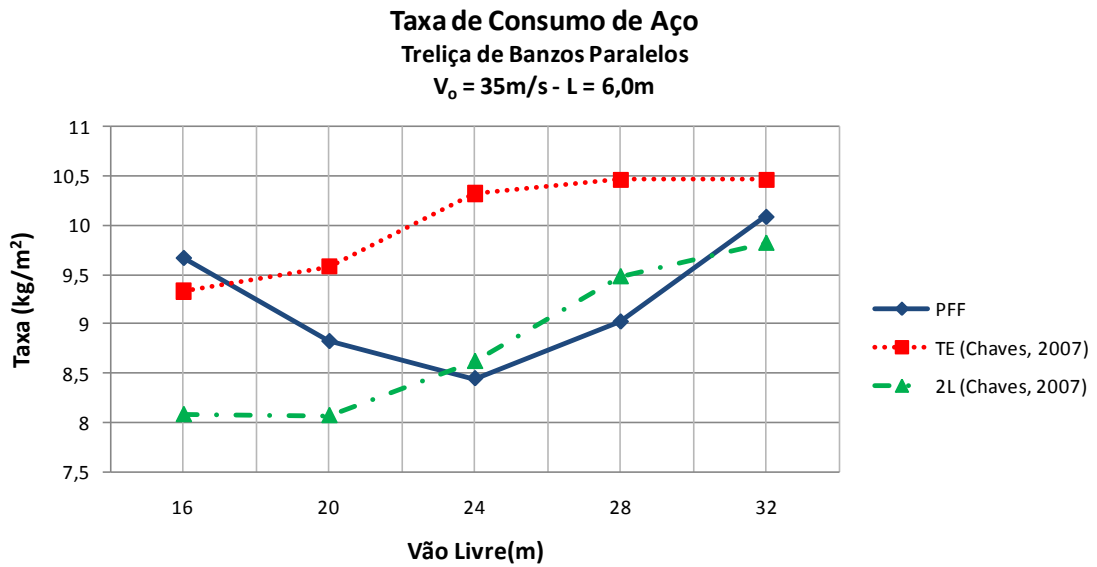


Figura 5.64 - Comparativo da taxa de consumo de aço para pórticos com treliça e Banzos Paralelos (BP).

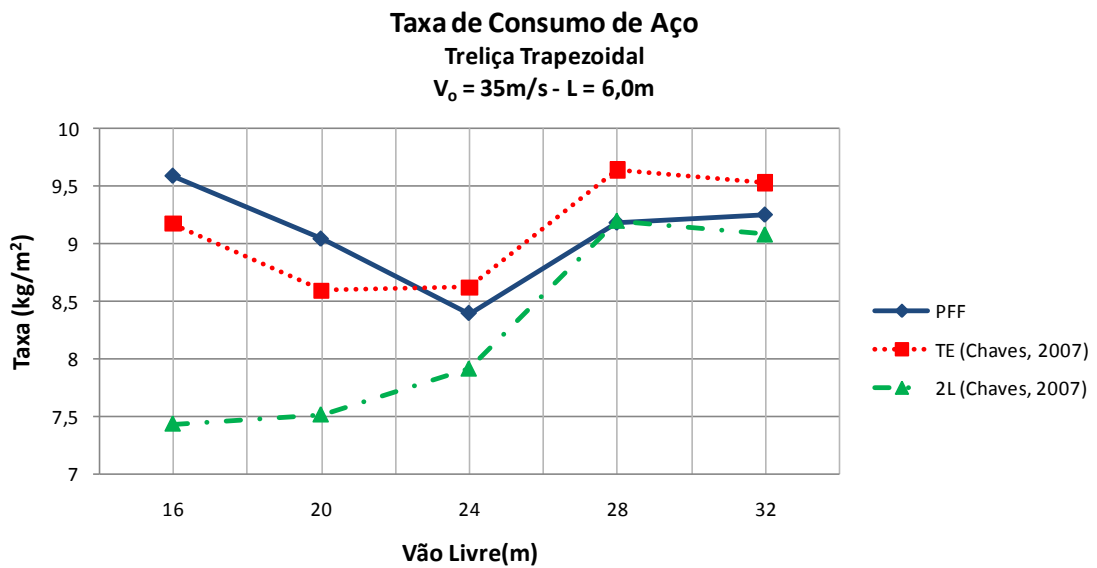


Figura 5.65 - Comparativo da taxa de consumo de aço para pórticos com treliça Trapezoidal (TP).

Verifica-se na Figura 5.63 que a treliça em arco constituída por perfis formados a frio é mais vantajosa quando comparado com as soluções em perfis TE e perfis 2L por apresentar menor taxa de consumo de aço. Enquanto que a treliça em banzos paralelos apresenta uma ligeira vantagem somente para os vãos livres e 24 a 28m (Figura 5.64).

A treliça trapezoidal composta por perfis formados a frio é mais vantajosa quando comparada com a solução em perfis 2L e para a solução em perfis TE, apenas com vãos livre superiores a 24m (Figura 5.65).

Apresenta-se na Figura 5.66 uma sobreposição da taxa de consumo de aço comparando os valores da taxa de consumo dos modelos analisados no presente trabalho, com os resultados apresentados por CHAVES (2007), admitindo, as duas (02) diferentes opções de vinculações, o espaçamento entre os pórticos transversais de 6m e a velocidade básica do vento  $V_0 = 35\text{m/s}$ .

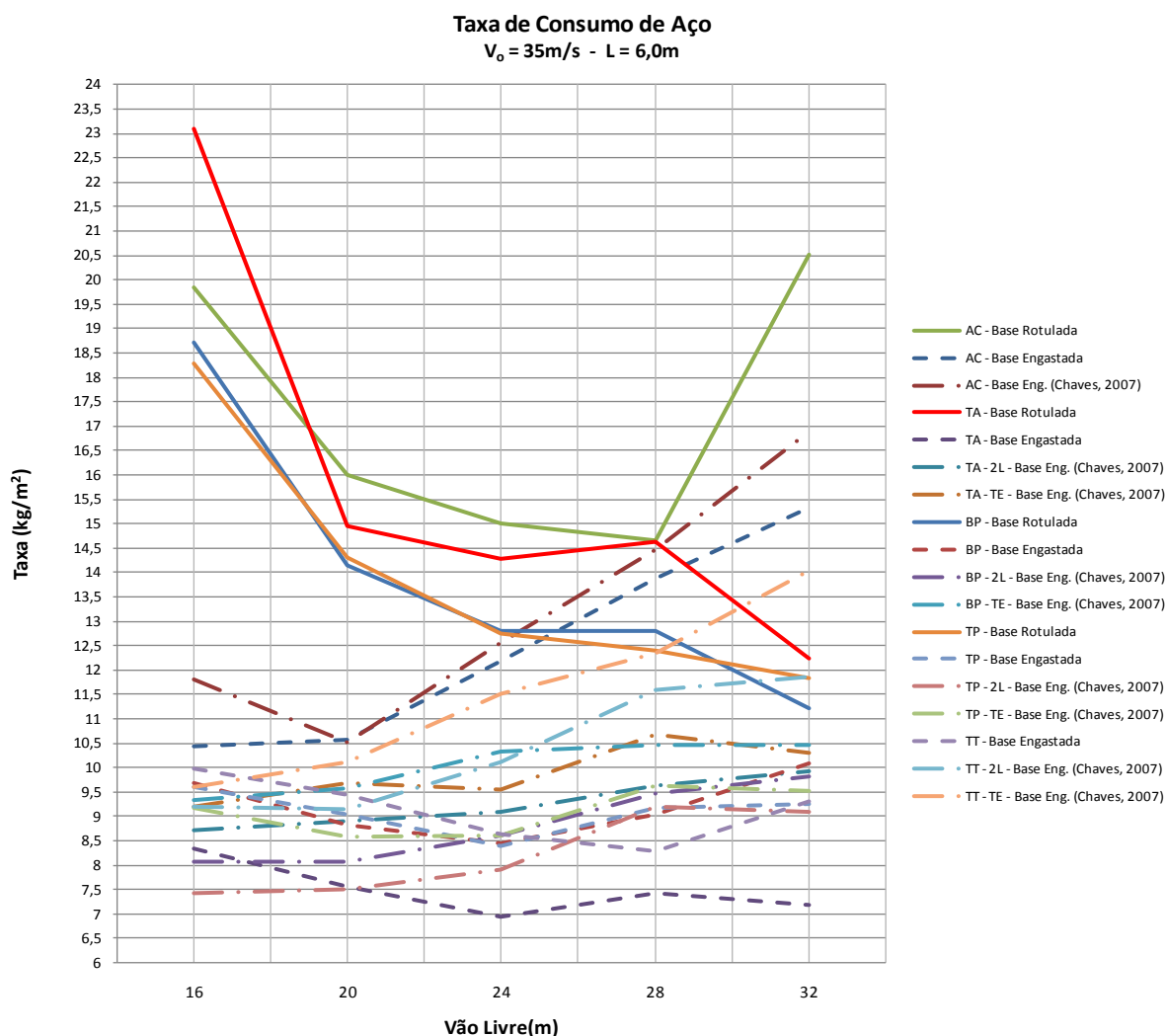


Figura 5.66 - Comparativo da taxa de consumo de aço dos pórticos transversais com os resultados de CHAVES (2007), para  $V_0=35\text{m/s}$  e  $L = 6,0\text{m}$ .

A partir de análise dos resultados apresentados na Figura 5.66 conclui-se que as soluções empregando a vinculação com a base engastada resultam em menores taxa de consumo de aço. Até um vão livre de 20m o pórtico em alma cheia com base rotulada apresenta maior desempenho com relação à taxa de consumo de aço, enquanto que, para vãos superiores a 20m, o pórtico de treliça em arco com as bases engastadas passa à apresentar um menor consumo de aço.

Para uma mesma vinculação, os pórticos compostos por vigas de cobertura treliçadas apresentam menor taxa de consumo de aço que os pórticos formados por perfis em alma cheia.

Analisando comparativamente os valores das taxas de consumo de aço para as tipologias com pórticos transversais constituídos por perfis formados a frio (PFF) e por perfis laminados, pode-se concluir que os primeiros apresentam um bom desempenho justificando-se sua grande utilização em projetos para montagem de galpões industriais leves.

# 6

## Conclusões e Recomendações

Neste Capítulo apresentam-se as conclusões sobre o estudo realizado, abrangendo os aspectos relativos à variação da taxa de consumo de aço para as diversas tipologias, as considerações a respeito dos deslocamentos horizontais e verticais dos modelos, a influência das vinculações nas bases das colunas do pórtico transversal e a eficiência estrutural dos pórticos com vigas em treliças constituídas por perfis formados a frio. Por fim, são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros.

### 6.1. Conclusões

As análises indicam que os pórticos compostos por perfis em alma cheia apresentam taxas de consumo de aço superiores a todas as outras tipologias em pórticos treliçados, com vão livre igual a 32m. Para 16m de vão livre, o pórtico em alma cheia

apresenta o consumo de aço superior às demais tipologias em treliça, quando velocidade do vento for  $V_0 = 30\text{m/s}$ .

Os modelos com as bases das colunas rotuladas indicam que o pórtico formado por treliça em arco é fortemente influenciado pelo acréscimo da ação do vento. Para o vão livre igual 16m e  $V_0 \geq 35\text{m/s}$ , os resultados demonstram que para os modelos estruturais constituídos por treliça em arco a taxa de consumo de aço é superior a todas demais tipologias.

À medida que aumenta o vão livre do pórtico, maior é a influência da tipologia sobre a taxa de consumo de aço, verificando-se um melhor desempenho dos pórticos treliçados quando comparados com os pórticos compostos por perfis de alma cheia. Os resultados da taxa de consumo de aço demonstram que a tipologia em pórtico de alma cheia é competitiva em comparação às tipologias em pórticos treliçados apenas na faixa que compreende os vãos livres iguais a 20, 24 e 28m.

Os pórticos transversais com as vinculações das bases rotuladas apresentam maiores taxas de consumo de aço que os pórticos com as bases engastadas, para todos os modelos estruturais analisados. Para vão livre superior a 20m, observa-se um aumento praticamente linear da taxa de consumo de aço para o pórtico de alma cheia com as bases engastadas e aproximando aos modelos com as bases rotuladas para o vão de 28m. Para as demais tipologias em pórtico treliçado percebe-se uma ligeira tendência de aproximação das taxas de consumo de aço para o vão livre igual a 32m, em modelos estruturais analisados com as bases engastadas e rotuladas.

Variando o tipo de vinculação das bases e mantendo constante a velocidade básica do vento ( $V_0 = 35\text{m/s}$ ) e o espaçamento entre os pórticos transversais ( $L = 6\text{m}$ ), observa-se que o pórtico com as bases engastadas que apresenta, a menor taxa de consumo de aço, é a tipologia com treliça em arco (AC) e o que para o vão livre igual a 32m a tipologia com treliça em banzo paralelo (BP) apresenta os resultados aproximadamente iguais para os modelos analisados com as bases rotuladas e engastadas. Isto permite concluir, numa avaliação prévia, que para grandes vãos, provavelmente as tipologias com pórticos treliçados não apresentam variações significativas da taxa de consumo de aço para modelos analisados com as bases rotulas e engastadas.

Quanto aos deslocamentos horizontais, para os pórticos com bases rotuladas, a tipologia com pórtico de alma cheia apresenta deslocamentos menores que as tipologias com pórticos treliçados, sendo que o pórtico com treliça em arco apresenta maior deslocamento. Quanto ao deslocamento vertical, o pórtico de alma cheia apresenta maiores valores que os pórticos treliçados e, entre as tipologias, a que apresenta menor deslocamento é constituída por pórtico com treliça trapezoidal.

Analisando o emprego de perfis formados a frio nas vigas treliçadas de cobertura, observa-se que para o pórtico com treliça triangular o emprego desses perfis é mais vantajoso para vão livre superior a 20m quando comparado com outras soluções em perfis laminados. A tipologia com pórtico de treliça em arco constituída por perfis formados a frio apresenta melhor desempenho para qualquer vão livre, admitindo com parâmetro de avaliação a taxa de consumo de aço. Para o pórtico com banzos paralelos o uso de perfis formados a frio é ligeiramente significativo, em termos de consumo de aço, para os vãos livres iguais a 24 e 28m. O pórtico com treliça trapezoidal apresenta desempenho satisfatório com o uso dos perfis formados a frio apenas para modelos estruturais com vãos livres entre 24 e 28m, porém, perde para a solução com dupla cantoneira (2L) analisada por CHAVES (2007).

Quanto ao espaçamento entre os pórticos transversais, verifica-se que quanto maior o espaçamento menor é a taxa de consumo de aço, permitindo concluir que é importante buscar soluções no sentido de viabilizar o aumento do espaçamento entre os pórticos transversais, pois além do ganho com a taxa de consumo de aço reduz-se também o número de fundações a serem executadas.

O fato de uma tipologia sobressair-se em relação às outras, não permite afirmar categoricamente que esta seja mais econômica do ponto de vista de projeto. Existem outras variáveis num projeto que condicionam a escolha de uma tipologia. Como exemplo, pode-se citar o pé-direito efetivo, caso haja a necessidade de armazenar objetos que ocupam uma altura maior e, provavelmente a tipologia que melhor irá atender aos requisitos de projeto será o pórtico com treliça em arco ou o pórtico com treliça de banzos paralelos.

De forma geral, o menor custo de uma estrutura deve ser avaliado sob o ponto de vista do projeto global. Acredita-se que este trabalho possa contribuir com engenheiros



e arquitetos, oferecendo uma diretriz para a escolha dos sistemas estruturais mais adequados.

Sobre o ponto de vista estrutural, conclui-se que dentre as tipologias e os parâmetros considerados nas análises, os pórticos treliçados apresentam melhor desempenho que os pórticos em perfis de alma cheia. Das tipologias em pórticos treliçados, admitindo os modelos com as bases engastadas, a treliça triangular e a treliça em arco registram menor valor para taxa de consumo de aço, enquanto que, para modelos com as bases rotuladas, a treliça de banzos paralelos e a treliça trapezoidal demonstram ser mais eficientes.

## **6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Sugere-se para o desenvolvimento de futuros trabalhos:

- empregar ferramentas (sistema de suporte a decisão) que permitem otimizar os sistemas estruturais para galpões compostos por perfis formados a frio;
- analisar sistemas estruturais para galpões industriais com ponte rolante;
- analisar sistemas estruturais para galpões compostos por perfis formados a frio com ponte rolante;
- realizar estudos econômicos de sistemas estruturais para galões industriais;
- realizar estudos de vinculação da base das colunas em sistemas estruturais para galpões compostos por perfis formados a frio com e sem ponte rolante;
- realizar estudos da eficiência estrutural e econômica de seções transversais de treliça metálica;
- avaliar as estabilizações de pórticos em 3D para sistemas estruturais em galpões compostos por perfis formados a frio, com e sem, ponte rolante.

## Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *Forças Devidas ao Vento em Edificações - NBR-6123*. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 80p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio. - NBR-14762*. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 80p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio. - NBR-6255*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 37p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *Projeto de Estruturas de Aço e de Estrutura Mistas de Aço e Concreto de Edifícios - Procedimento : NBR-8800*. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 237p.

- BATISTA, E. M. et al. (2000). *Estudos dos modos de instabilidade local de placa e distorcional em perfis de chapa dobrada de aço*. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., Punta Del Este, Uruguay, nov. 2000. Memorias. 14p.
- BELLEI, Ildony H. *Edifícios Industriais em Aço - Projeto e Cálculo*. 5.ed. São Paulo: PINI, 2006.
- BLESSMANN, J. *Acidentes Causados pelo Vento*. 3.ed. revisado. Porto Alegre, Editora da Universidade/UFRGS, (Série Engenharia Estrutural 7), 1986.166p.
- CARVALHO, P. R. M. *Curso Básico de Perfis de Aço Formado a Frio*. et al. Porto Alegre, 2006.
- CFS, *Cold-Formed Steel Design Software – Version 503*. RSG Software, Inc. [www.rsgsoftware.com](http://www.rsgsoftware.com).
- CHAVES, M. R. *Avaliação do Desempenho de Soluções Estruturas para Galpões Leves*. Ouro Preto, Editora da Universidade/UFOP. 2007, 111p.
- COMPUTERS AND STRUCTURES, Inc. *SAP 2000 advanced - Structural Analysis Program - Version 10*. Berkley: COMPUTERS AND STRUCTURES, Inc., 2005.
- D'ALAMBERT, F. *Galpões em Pórticos com Perfis Estruturais Laminados (Coletânea do Uso do Aço)*. Belo Horizonte : GERDAU Açominas, 2004. 2. ed. v.3.
- FISHER, J.M. *Industrial Buildings, Roofs to Column Anchorage*. Steel Design Guide Series, 7. Chicago: AISC. 1993.
- GONÇALVES, R. M., SALES, J. J. de S., MALITE, M. *Ação do Vento nas Edificações: teoria e exemplos*. São Carlos: SET/EESC/USP, 2004.
- GRIGOLETTI, G. DE CAMPOS. *Otimização Via Algoritmos Genéticos de Perfis U Formados a Frio Submetidos à Compressão Utilizando o Método da Resistência Direta*. Porto Alegre: PROMEC/UFRGS, 2008.
- MAIA, W. FERNANDO. *Sobre a estabilidade de cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à compressão*. São Carlos: SET/EESC/USP, 2008.

- MALITE, M., Sáles, J. J., Gonçalves, R. M. (1998). *Algumas considerações sobre a nova norma brasileira de estruturas de aço em perfis formados a frio*. Artigo Técnico, Revista Construção Metálica, n. 33, p. 22-26, 1998.
- MATHCAD (2007). *Mathcad User`s Guide with Reference Manual 2007*. Editora MathSoft Engineering & Educaation, Inc., Cambridge, USA.
- MCALC2008, *Programa para Geração, Análise e Dimensionamento de Estruturas Metálicas— Versão 2008.9.196.814 (May 25 2009)*. Stabile Engenharia Ltda.
- MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO. SECRETARIA DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL (MIC/STI). *Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas*. v.1. Brasília: MIC/STI, 1986.
- PINHO, F. O. *Galpões em Pórticos de Aço*. Construção Metálica, n.70, Mai-Jun, 2005. p.21-27.
- PRAVIA, Z. M. C.; Moacir Kripka. (Org.). *Construção Metálica Estudos e Pesquisas Recentes*. Passo Fundo: Ediora UPF, 2005, v. 1, p. 67-99.
- RUSCH, A.; LINDNER, J. Remarks to the Direct Strength Method. *Thin-Walled Structures*, v. 39, p. 807-820, 2001.
- SANTOS, A.F.dos *Estruturas Metálicas - Projeto e Detalhes para Fabricação*. São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1977. 476p.
- SCHAFER, B. W. CUFISM 2.5 – *Users Manual and Tutorials*, disponível em [www.ce.jhu.edu/cufsm](http://www.ce.jhu.edu/cufsm), 2001.
- SCHULTE, H., YAGUI, T., PITTA, J.A.A. *Estruturas Metálicas para Coberturas. Informações Construtivas para Projetos Escolares*. São Carlos: SET/ESSC/USP, 1978.
- SILVA, E. L., PIGNATTA, V. S. *Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR 6355*. Dados eletrônico. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2008. 119p. – ( Série Manual de Construção em Aço).

## Bibliografia Complementar

- AÇOMINAS. *Galpões em Estrutura Metálica (Coletânea Técnica do Uso do Aço)*. Belo Horizonte: Açominas, 1989. v.VII.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *Perfis estruturais de aço soldados por alta frequência – eletrofusão – Requisitos: NBR-15279*. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 17p.
- CHANG, C. C. *What we Learned from the Tornado of Lubbock, Texas, U.S.A., May 11, 1970*. In: International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, 3, Tóquio, Japão, 1971. Proceedings, Tóquio, 1971, p.471-80.
- MALITE, M.; SÁLES, J.J. (1993). *Estruturas de aço constituídas por perfis de chapa dobrada: dimensionamento de barras*. São Carlos: EESC-USP. 97p.
- PINHEIRO, A. C. da F. B. *Estrutura metálica: cálculo, detalhamento, exercícios e projeto*. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

- SALES, J. J.; MUNAIAR NETO, J.; MALITE, M.; DIAS, A.A.; GONÇALVES, R.M.  
*Sistemas Estruturais: Teoria e Exemplos*. São Carlos: SET/ESSC/USP, 2005. 266p.
- SALES, J. J.; et all. *Cobertura em Arco Metálico Treliçado – Exemplo de Cálculo*. São Carlos: SET/ESSC/USP, 1994. 26p.
- SALES, J. J.; et all. *Edifícios Industriais em Aço com Ponte Rolante – Exemplo de Cálculo*. São Carlos: SET/ESSC/USP, 1994. 64p.
- VAZQUEZ, E. G. (2002). *Análise teórica e experimental da instabilidade torsional de perfis formados a frio sob compressão centrada*. Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- VAZQUEZ, E.G. (1998). *Estudo do comportamento pós-crítico de paredes esbeltas de perfis metálicos*. Dissertação (Mestrado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

# Apêndice A - Comentários Sobre o Programa mCalc2008

## A.1 - Considerações Iniciais

O mCalc2008 é um *software* para geração, análise e dimensionamento de estrutura metálica, desenvolvido pela empresa Stabile Engenharia LTDA.

O sistema mCalc2008 baseia-se na Análise Elástica-Linear empregando-se o Método da Rigidez Direta, que é um sistematização do Método dos Deslocamentos.

As Equações de Compatibilidade relacionam as deformações com os deslocamentos nodais. Introduzindo estas relações nas Equações Constitutivas relacionam-se as forças nos extremos das barras com os deslocamentos nodais. Introduzindo-se estas últimas nas Equações de Equilíbrio, obtém-se um conjunto de equações que relacionam forças com deslocamentos nodais.

Esse conjunto de equações pode ser considerado como o sistema de equações de equilíbrio da estrutura expressas em função dos deslocamentos. A solução desse sistema (objetivo de um programa de análise) fornece os valores das incógnitas do problema: deslocamentos nodais. De posse dos deslocamentos, podem-se obter as solicitações no extremo das barras, bem como as reações nodais.

O processo de análise não interage com o usuário, sendo efetuado automaticamente. Depois de realizado a solução do sistema de equações é possível combinar as ações (ponderar e somar) um estado com outro, com o intuito de reproduzir um carregamento real na estrutura. Sendo possível obter as envoltórias máximas e mínimas de cada combinação de ações, nó por nó, e barra por barra.

O processo de verificação é feito por meio de barras (uma ou um conjunto), após selecionar o tipo de perfil e suas dimensões, e o módulo de dimensionamento permite calcular as resistências de cálculo desse perfil e comparar esses resultados com as solicitações de cálculo obtidas na Análise.

Esse procedimento, embora seja o de verificação, é também conhecido como dimensionamento paramétrico, ou simplesmente dimensionamento de uma barra ou um conjunto de barras.

O dimensionamento dos perfis é definido de acordo com a norma a qual ele se adequou. No caso de selecionar perfis laminados ou soldados, os cálculos serão feitos com base na NBR 8800:2008 (ABNT, 2008). Se for perfis formados a frio os cálculos seguirão os procedimentos prescritos pela NBR 14762:2001 (ABNT, 2008).

## A.2 - Interface Gráfica

Na Figura A.1 é ilustrada a interface gráfica do mCalc2008. Ao iniciar o sistema abre-se o módulo Home, onde são fornecidos os principais dados da estrutura: número de nós, de barras, de nós vinculados, de estados de ações e as unidades (comprimento e de força) adotadas para essa estrutura.

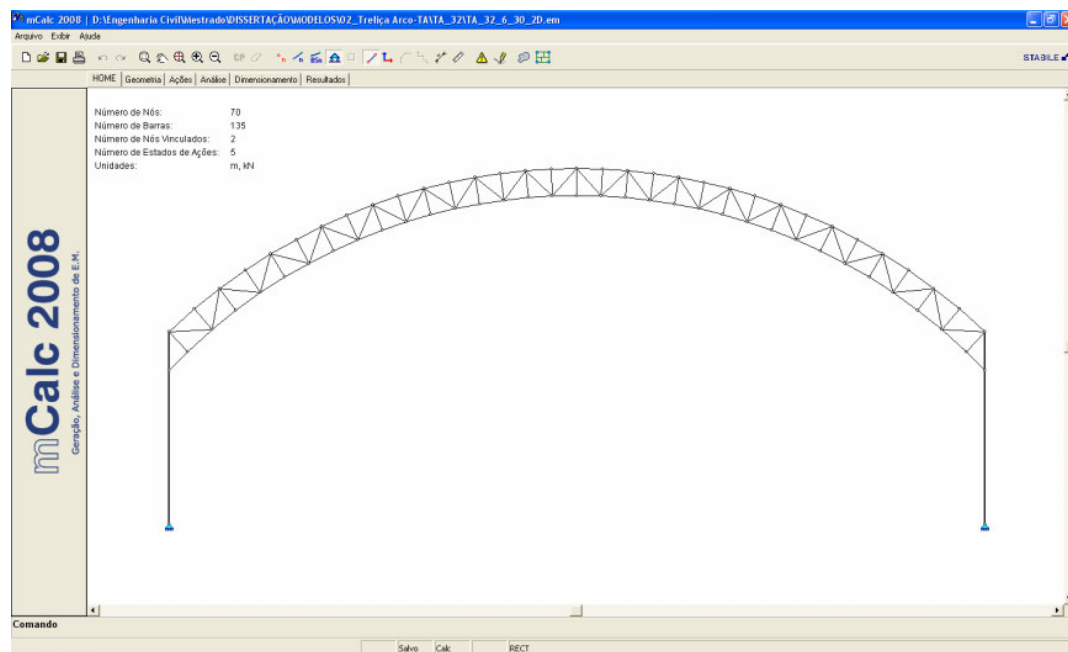


Figura A.1 - Interface gráfica geral do mCalc2008.

## A.3 - Módulos do mCalc2008

O sistema subdivide em módulos independentes. Além do módulo Home, o mCalc2008 possui os módulos:

- Geometria: entrada de dados geométricos;



- Ações: permite atribuir ações concentradas nos nós e ações distribuídas sobre as barras;
- Análise: combinando as ações a serem consideradas;
- Dimensionamento: estabelece e verifica os perfis a serem adotados em determinadas barras da estrutura;
- Resultados: emite relatórios completos das Análises e do Dimensionamento, além de oferecer o desenho da deformada das diversas combinações de ações e os diagramas de esforço normal, cortante e momento fletor.

Na Figura A.2 são ilustradas as interfaces gráficas dos módulos citados anteriormente.

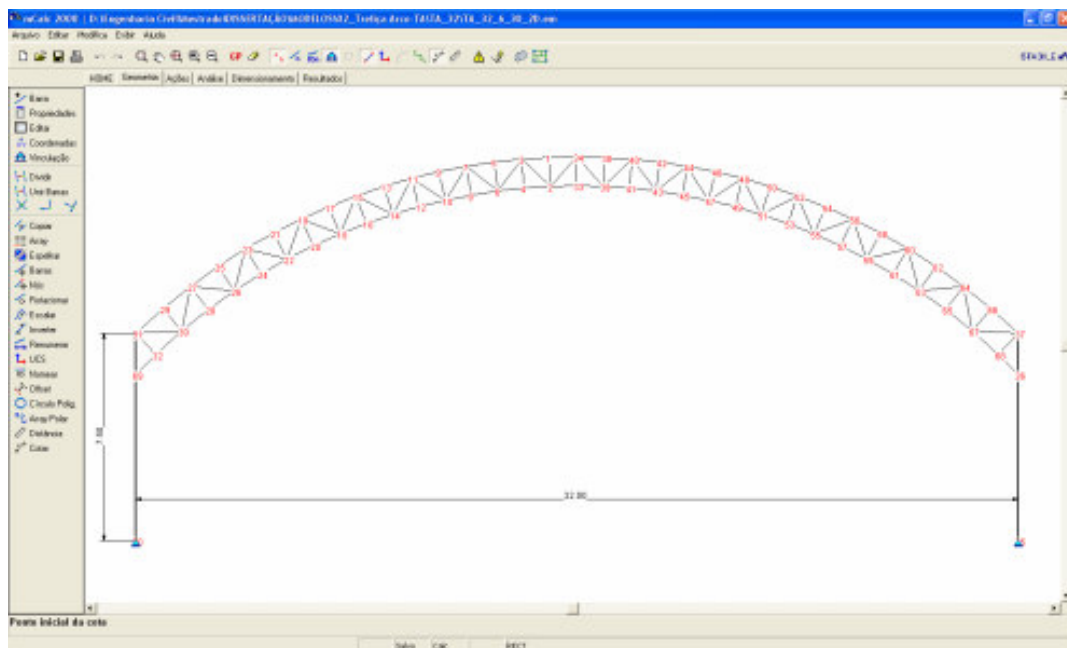


Figura A.2 - Interface gráfica do módulo de Geometria.

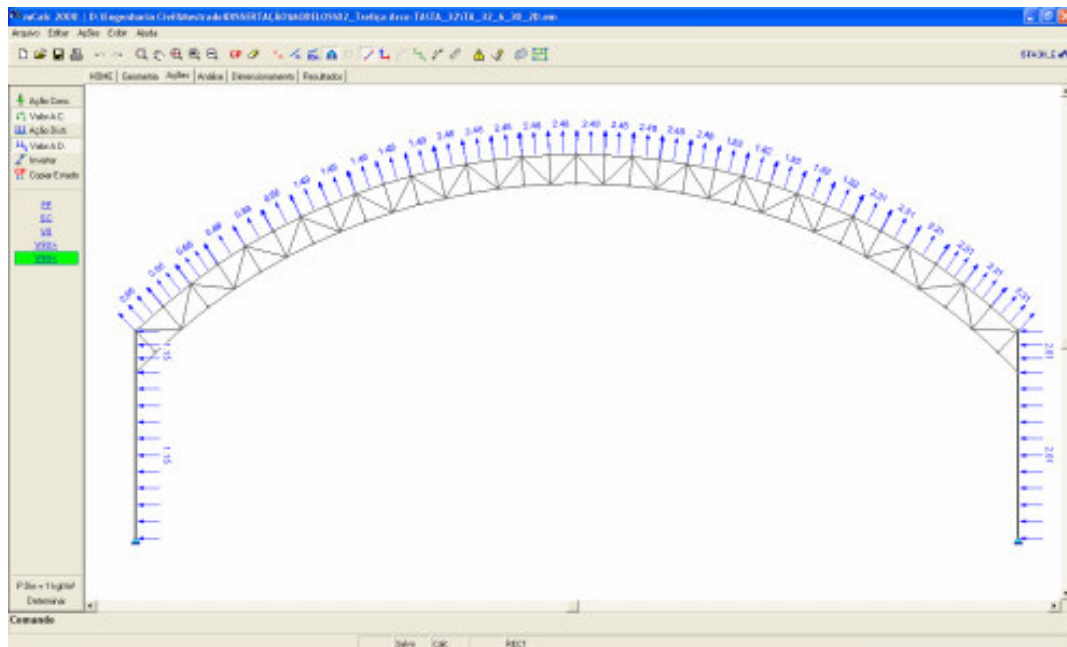


Figura A.3 - Interface gráfica do módulo de Ações.

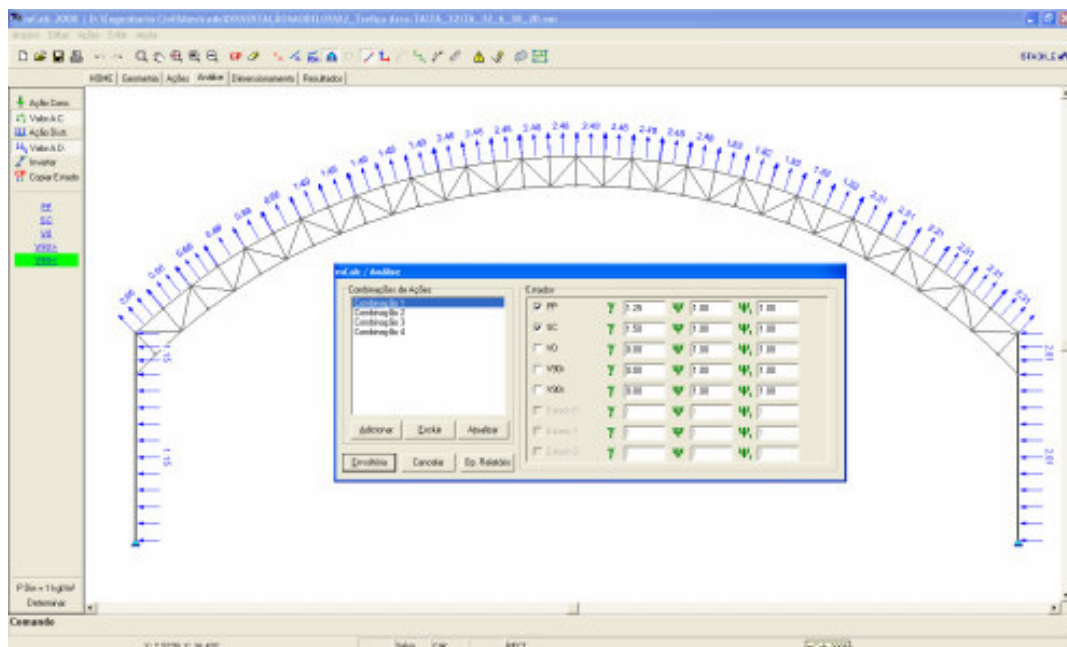


Figura A.4 - Interface gráfica do módulo de análise.

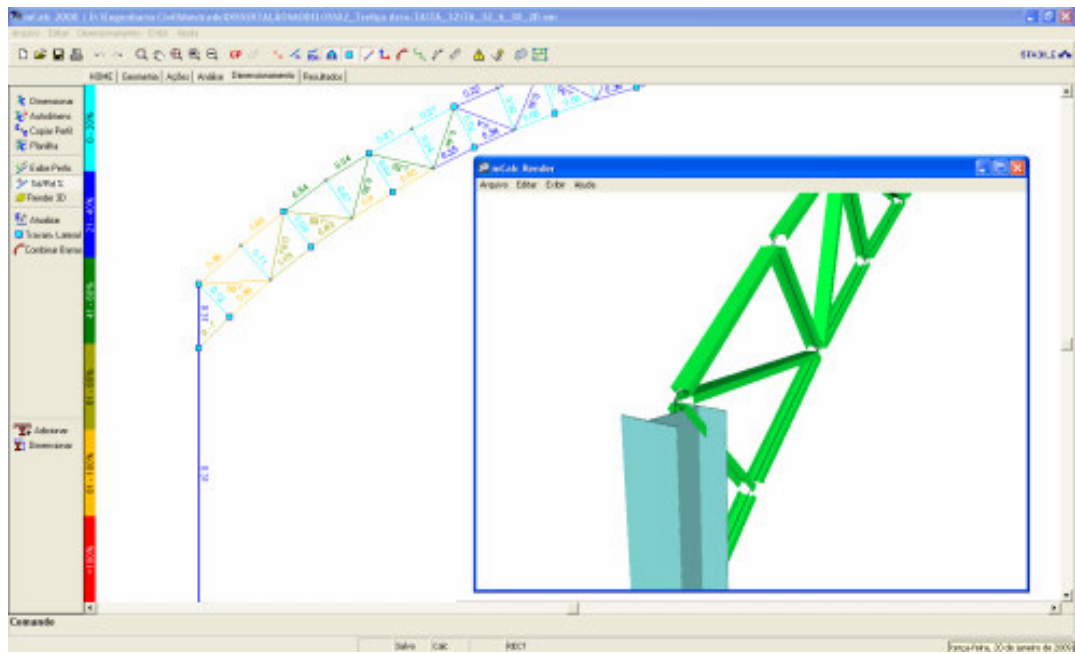


Figura A.5 - Interface gráfica do módulo de dimensionamento.

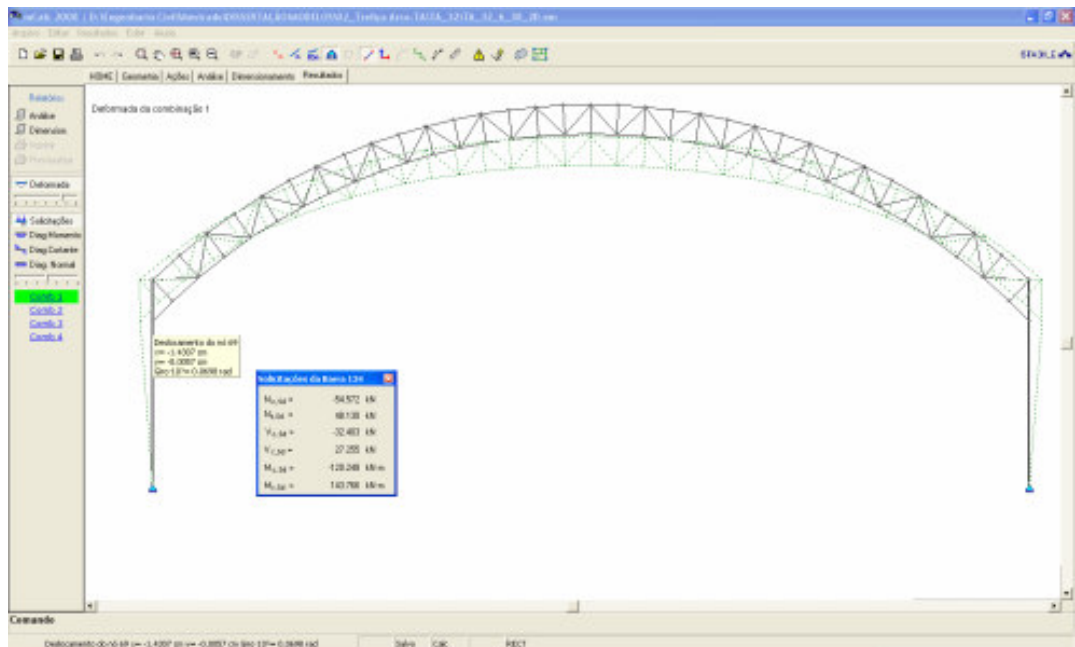


Figura A.6 - Interface gráfica do módulo resultados.

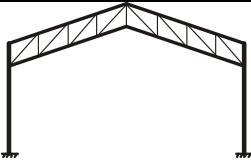
# Apêndice B - Comparação da Análise Estrutural do mCalc2008 com Alguns Programas Computacionais

## B.1 - Parâmetro Fixados para Análise

As avaliações foram concebidas em pórtico plano. Foi garantido que as entradas de dados em todos os modelos foram iguais, como por exemplo, as ações, combinação de ações, materiais e etc.

Está ilustrado na Tabela B.1 o pórtico transversal de banzos paralelos com vão livre de 24 metros considerado na avaliação do programa.

Tabela B.1 - Pórtico transversal avaliado

Tipologia	Vão Livre	Simbologia
 BP Pórtico de Banzos Paralelos	24 m	BP-24

Além da tipologia, foram fixados os seguintes parâmetros:

- altura da coluna igual a 6 metros;
- inclinação da cobertura igual a 10%;
- distância entre os pórticos transversais igual a 6 metros;
- vinculação rotulada nas bases.

Os perfis e aço empregados na composição do pórtico transversal são:

- coluna: perfis CS 350 x 93
- viga treliça:

Banzo superior - U 100x75x6.35

Banzo inferior - U 100x75x4.75

Diagonais - U 100x75x3.75

Montantes - U 100x40x2.25

- aço: ASTM A572 Gr 50

As ações consideradas foram:

- Ação Permanente (G)

O peso próprio dos elementos estruturais do pórtico transversal é determinado automaticamente pelos programas. Já o peso próprio das telhas, terças e elementos secundários de cobertura foi considerado uma ação permanente  $PP = 0,11 \text{ kN/m}$ .

- Ação Variável (Q)

As ações variáveis consideradas foram: sobrecarga de cobertura e a ação do vento. A sobrecarga de cobertura considerada foi de  $0,25 \text{ kN/m}^2$  (Anexo B da NBR8800:2008 (ABNT, 2008)). Já para a determinação da ação do vento foi adotado uma velocidade básica  $V_o = 35 \text{ m/s}$ , coeficiente de pressão interna  $C_{pi} = -0,30$  ou  $0$  (valor mais nocivo), também foi admitido que o galpão possui quatro faces igualmente permeáveis. Na Figura B.1 e B.2 estão ilustradas os sentidos da ação do vento longitudinal e transversal respectivamente, sendo os valores da ação do vento iguais:

$$q = 3,33 \text{ kN/m};$$

$$q_1 = 2,92 \text{ kN/m};$$

$$q_2 = 5,00 \text{ kN/m};$$

$$q_3 = 1,67 \text{ kN/m};$$

$$q_4 = 2,08 \text{ kN/m};$$

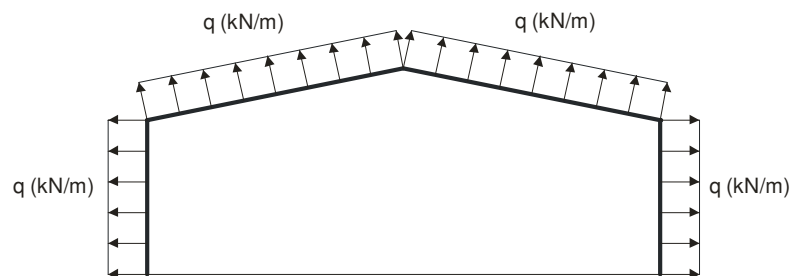


Figura B.1 - Atuação do vento longitudinal (vento  $0^\circ$ ).

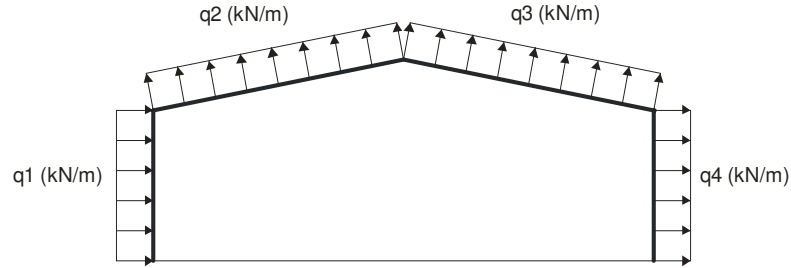


Figura B.2 - Atuação do vento transversal (vento 90°).

As combinações consideradas foram:

- Combinação 01 -  $1,25 \times G$  (peso próprio) +  $1,5 \times Q$  (sobrecarga)
- Combinação 02 -  $1,0 \times G$  (peso próprio) +  $1,4 \times V90^\circ$  (vento transversal)
- Combinação 03 -  $1,0 \times G$  (peso próprio) +  $1,4 \times V0^\circ$  (vento longitudinal)

## B.2 - Programas Computacionais

Apesar de haver uma grande variabilidade de programas de análises e dimensionamento de estrutura metálica, para validação dos resultados da análise estrutural gerados pelo mCalc2008, realizou-se uma comparação dos resultados gerados em outros programas computacionais, como: SAP 2000 v10, STRAP v12.5 e FTool v2.11.

## B.3 - Comparação dos Resultados Computacionais

A Figura B.3 ilustra o pórtico transversal modelado nos programas computacionais e, portanto, será tomada como referência para apresentação dos resultados.

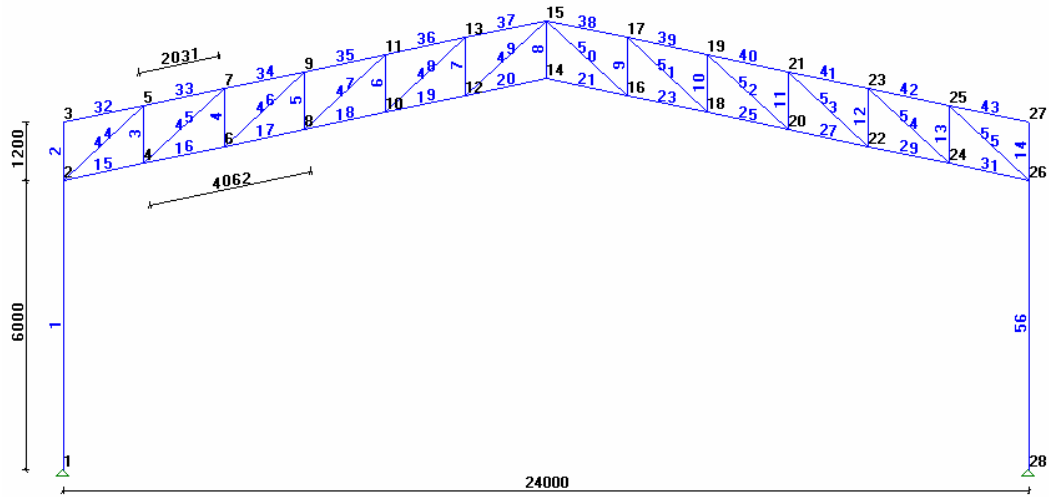


Figura B.3 - Modelo estrutural analisado.

Para comparar os resultados levou-se em consideração uma única ação. Optou-se por considerar a sobrecarga de cobertura  $SC = 0,25 \text{ kN/m}^2$ . Na Figura B.4 estão ilustrados os diagramas de esforços em função da sobrecarga de cobertura.

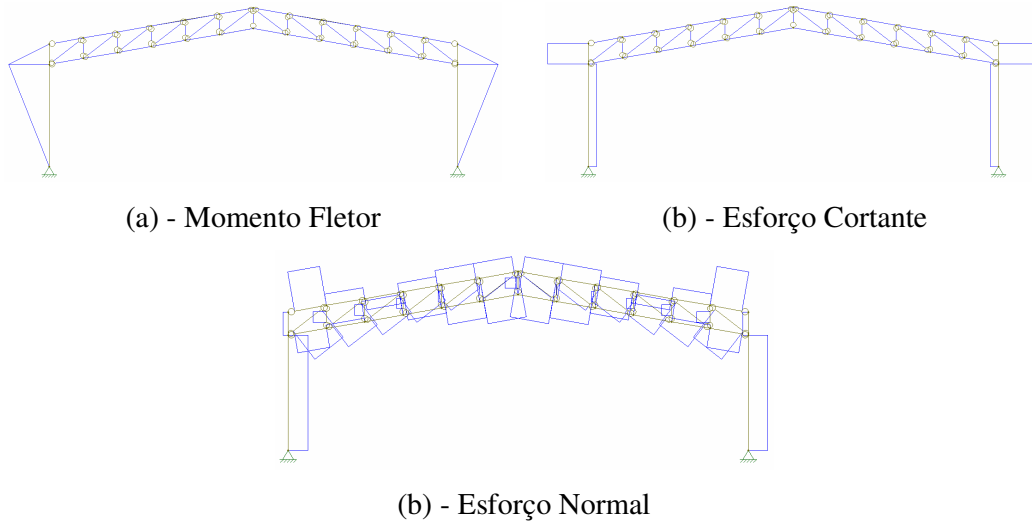


Figura B.4 - Representação dos diagramas dos esforços devido a  $SC = 0,25 \text{ kN/m}^2$ .

Além dos esforços nas barras estão apresentados na Figura B.5 os deslocamentos nodais em consequência da sobrecarga de cobertura.

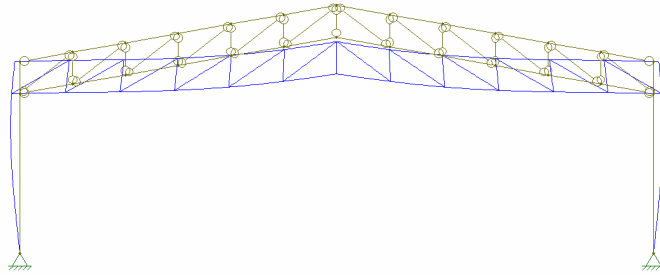


Figura B.5 - Deformada da estrutura devido a sobrecarga de cobertura.

Na Tabela B.2 estão os resultados dos esforços nas barras nos diferentes programas computacionais, além dos esforços nas barras está apresentado a variação dos resultados, em porcentagem, do programa mCalc2008 com os demais programas.

Tabela B.2 - Comparação dos resultados dos esforços nas barras

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS								
Esforço Normal (kN)								
Barra	Elemento Estrutural	Resultados				Variação dos Esforços		
		SAP2000	STRAP	Ftool	mCalc2008	SAP2000 x mCalc2008	STRAP x mCalc2008	Ftool x mCalc2008
1	Coluna	-18,000	-18,278	-18,000	<b>-18,278</b>	1,52%	0,00%	1,52%
2		4,518	4,780	4,793	<b>4,937</b>	8,49%	3,18%	2,92%
3		12,111	12,429	12,223	<b>12,417</b>	2,46%	-0,10%	1,56%
4	Montante	9,280	9,385	9,225	<b>9,371</b>	0,97%	-0,15%	1,56%
5		6,244	6,348	6,234	<b>6,371</b>	1,99%	0,36%	2,15%
6		3,253	3,297	3,230	<b>3,278</b>	0,76%	-0,58%	1,46%
7		0,281	0,285	0,264	<b>0,232</b>	-21,12%	-22,84%	-13,79%
8		12,464	12,612	12,159	<b>12,173</b>	-2,39%	-3,61%	0,12%
15	Banzo Inferior	-16,963	-17,194	-17,550	<b>-18,468</b>	8,15%	6,90%	4,97%
16		3,877	3,805	3,101	<b>2,547</b>	-52,22%	-49,39%	-21,75%
17		19,500	19,705	16,730	<b>18,406</b>	-5,94%	-7,06%	9,11%
18		30,086	30,440	29,273	<b>29,109</b>	-3,36%	-4,57%	-0,56%
19		35,620	36,057	34,776	<b>34,657</b>	-2,78%	-4,04%	-0,34%
20	36,030	36,468	35,154	<b>35,050</b>	-2,80%	-4,05%	-0,30%	
32	Banzo Superior	36,204	36,215	36,156	<b>37,203</b>	2,69%	2,66%	2,81%
33		9,819	9,948	10,316	<b>11,033</b>	11,00%	9,83%	6,50%
34		-10,992	-11,051	-10,335	<b>-9,982</b>	-10,12%	-10,71%	-3,54%
35		-26,621	-26,949	-25,963	<b>-25,841</b>	-3,02%	-4,29%	-0,47%
36		-37,206	-37,685	-36,507	<b>-36,545</b>	-1,81%	-3,12%	0,10%
37	-42,735	-43,296	-42,007	<b>-42,093</b>	-1,53%	-2,86%	0,20%	
44	Diagonais	-32,671	-32,740	-32,208	<b>-32,627</b>	-0,13%	-0,35%	1,28%
45		-25,942	-26,184	-25,750	<b>-26,200</b>	0,98%	0,06%	1,72%
46		-19,487	-19,821	-19,485	<b>-19,772</b>	1,44%	-0,25%	1,45%
47		-13,196	-13,384	-13,145	<b>-13,345</b>	1,12%	-0,29%	1,50%
48		-6,896	-6,999	-6,856	<b>-6,917</b>	0,30%	-1,19%	0,88%
49	-0,519	-0,520	-0,479	<b>-0,490</b>	-5,92%	-6,12%	2,24%	
Esforço Cortante (kN)								
Barra	Elemento Estrutural	Resultados				Variação		
		SAP2000	STRAP	Ftool	mCalc2008	SAP2000 x mCalc2008	STRAP x mCalc2008	Ftool x mCalc2008
1	Coluna	-7,010	-7,132	-7,121	<b>-7,322</b>	-4,45%	-2,66%	-2,82%
2		34,686	35,662	35,605	<b>36,637</b>	-5,62%	-2,73%	-2,90%
Momento Fletor (kN)								
Barra	Elemento Estrutural	Resultados				Variação		
		SAP2000	STRAP	Ftool	mCalc2008	SAP2000 x mCalc2008	STRAP x mCalc2008	Ftool x mCalc2008
1	Coluna	-42,057	-42,795	-42,725	<b>-42,900</b>	-2,00%	-0,25%	-0,41%
2								



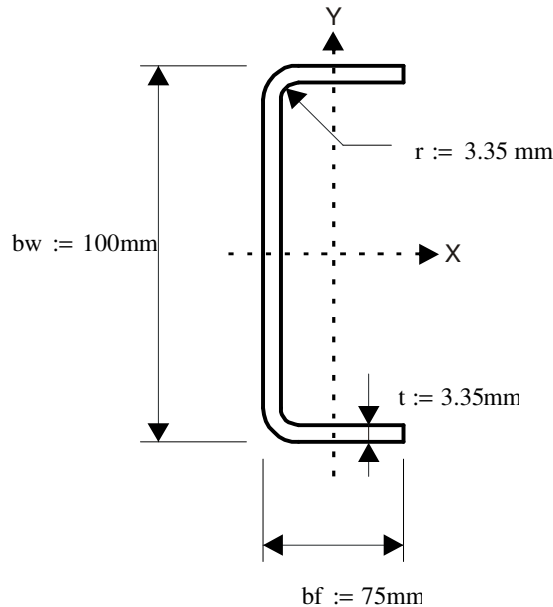
Semelhante aos comparativos dos esforços nas barras, é apresentado na Tabela B.3 os resultados dos deslocamentos nodais, além dos deslocamentos também é apresentado a variação dos resultados, em percentual, do programa mCalc2008 com os demais programas.

Tabela B.3 - Comparação dos deslocamentos nodais

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS														
Nó	SC = 0,25 kN/m <sup>2</sup>								Variação dos Deslocamentos Nodais					
	SAP2000		STRAP		Ftool		mCalc2008		SAP2000 x mCalc2008		STRAP x mCalc2008		Ftool x mCalc2008	
	Δx (cm)	Δy (cm)	Δx (cm)	Δy (cm)	Δx (cm)	Δy (cm)	Δx (cm)	Δy (cm)	Δx (cm)	Δy (cm)	Δx (cm)	Δy (cm)	Δx (cm)	Δy (cm)
<b>1</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
<b>2</b>	-40,800	0,040	-40,188	0,045	-38,790	0,044	-40,066	0,045	-1,83%	11,48%	-0,30%	-0,02%	3,18%	1,75%
<b>3</b>	-25,330	-0,040	-25,379	-0,043	-24,630	-0,042	-25,753	-0,043	1,64%	6,54%	1,45%	0,00%	4,36%	1,17%
<b>14</b>	0,000	-17,620	0,000	-17,379	0,000	-16,780	0,000	-17,501	0,00%	-0,68%	0,00%	0,70%	0,00%	4,12%
<b>15</b>	0,000	-17,432	0,000	-17,193	0,000	-16,600	0,000	-17,316	0,00%	-0,67%	0,00%	0,71%	0,00%	4,13%

# Apêndice C - Dimensionamento Analítico de PFF do Tipo U Submetido à Compressão

## Características Geométricas



$$f_y := 34.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$E := 20500 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$G := 0.384615365 \cdot E$$

$$I_x := 134.825 \text{cm}^4$$

$$I_y := 47.187 \text{cm}^4$$

$$I_t := 0.305 \text{cm}^4$$

$$r_x := 4.124 \text{cm}$$

$$r_y := 2.44 \text{cm}$$

$$A := 7.926 \text{cm}^2$$

$$x_o := 5.216 \text{cm}$$

$$y_o := 0$$

$$C_w := 791.794 \text{cm}^6$$

$$K_x L_x := 253 \text{cm}$$

$$K_y L_y := 253 \text{cm}$$

$$K_t L_t := 253 \text{cm}$$

$$r_o := (r_x^2 + r_y^2 + x_o^2 + y_o^2)^{0.5}$$

$$r_o = 7.083 \cdot \text{cm}$$

## Solicitações

Valores em módulo:  $N_{csd} := 54.46 \text{kN}$

$$N_{tsd} := 131.02 \text{kN}$$

## Verificação da Barra à Tração

$C_t$  = Coeficiente de redução da área líquida = 1,00

$A$  = área bruta do perfil;

$f_y$  = tensão de escoamento;

$\gamma$  = coeficiente de ponderação da resistência  $\gamma := 1.1$

$$N_{trd} := \frac{A \cdot f_y}{\gamma}$$

$$N_{trd} = 248.59 \text{kN}$$

$$\frac{N_{tsd}}{N_{trd}} = 0.527 \quad \text{Verif1} := \text{if} \left( \frac{N_{tsd}}{N_{trd}} \leq 1, \text{"OK"} , \text{"NÃO OK"} \right)$$

Verif1= "OK"

## Flambagem da barra por flexão, por torção ou por flexo-torção [NBR 14762 - 7.7.2]

Cálculo de  $N_e$ :

$$N_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x L)^2} \quad N_{ex} = 426.17 \text{ kN}$$

$$N_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y L)^2} \quad N_{ey} = 149.15 \text{ kN}$$

$$N_{et} := \left( \frac{1}{r_o^2} \right) \cdot \left[ \frac{(\pi^2 \cdot E \cdot C_w)}{(K_t L)^2} + G \cdot I_t \right] \quad N_{et} = 97.824 \text{ kN}$$

Perfil monossimétrico: em relação ao eixo X [NBR 14762 - 7.7.2]

$$N_{ext} := \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot \left( 1 - \frac{x_o^2}{r_o^2} \right)} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex} \cdot N_{et} \cdot \left( 1 - \frac{x_o^2}{r_o^2} \right)}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] \quad N_{ext} = 86.03 \text{ kN}$$

$N_e$  é o menor valor entre  $N_{ey}$  e  $N_{ext}$ :

$$N_{e1} := \text{if}(N_{ex} < N_{ey}, N_{ex}, N_{ey})$$

$$N_{e2} := \text{if}(N_{e1} < N_{et}, N_{e1}, N_{et})$$

$$N_{e3} := \text{if}(N_{e2} < N_{ext}, N_{e2}, N_{ext}) \quad N_e := N_{e3}$$

$$N_e = 86.03 \cdot \text{kN}$$

## Modo de flambagem global: Flexo-Torção

Cálculo da Área Efetiva

$$\text{Área efetiva (Aef)} = \text{Área bruta (A)}$$

$$A_{ef} := A$$

Nos casos de flambagem por torção ou por flexo-torção deve-se tomar a curva b  $\alpha := 0.34$

$$\lambda_0 := \left[ \frac{(A_{ef} \cdot f_y)}{N_e} \right]^{0.5} \quad \lambda_0 = 1.783$$

$$\beta := 0.5 \left[ 1 + \alpha \cdot (\lambda_0 - 0.2) + \lambda_0^2 \right] \quad \beta = 2.36$$

$$\rho := \frac{1}{\beta + (\beta^2 - \lambda_0^2)^{0.5}} \quad \rho = 0.256$$

$$\text{Verif2} := \text{if}(\rho \leq 1, \text{"OK"}, \text{"NÃO OK"})$$

$$\text{Verif2} = \text{"OK"}$$

A área efetiva será calculada na tensão:  $\sigma := \rho \cdot f_y$   $\sigma = 8.84 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

## Cálculo da Largura Efetiva

Elemento A.L.

$$b_1 := (b_f - 2 \cdot t) \quad \text{Rel} := \frac{b_1}{t} \quad \text{Rel} = 20.388 \quad \text{Caso a:} \quad k := 0.43$$
$$\psi := 1 \quad [\text{NBR14762 - Tab05}]$$

$$\lambda_p := \frac{\text{Rel}}{0.95 \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma}}} \quad \lambda_p = 0.68 \quad (\lambda_p > 0.673)$$

$$b_{f1} := \frac{b_1 \cdot \left( 1 - \frac{0.22}{\lambda_p} \right)}{\lambda_p} \quad b_{f1} = 6.8 \cdot \text{cm}$$

$$L_{ret1} := b_1 - b_{f1} \quad L_{ret1} = 0.034 \cdot \text{cm}$$

### Elemento A.A.

$$b_2 := (b_w - 4 \cdot t) \quad \underline{\text{Rel}} := \frac{b_2}{t} \quad \text{Rel} = 25.851 \quad \text{Caso a: } \underline{k} := 4 \quad [\text{NBR14762 - Tab04}]$$

$$\underline{\lambda_p} := \frac{\text{Rel}}{0.95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma}}} \quad \lambda_p = 0.28 \quad (\lambda_p \leq 0.673 - \text{ toda alma é efetiva})$$

$$\text{Aret} := (2 \cdot \text{Lret1}) \cdot t$$

$$\text{Aef1} := A - \text{Aret} \cdot 1$$

$$\text{Aef1} = 7.9 \cdot \text{cm}^2$$

Cálculo de  $\lambda_0$  final

$$\lambda_0 := \sqrt{\frac{\text{Aef} \cdot f_y}{N_e}} \quad \lambda_0 = 1.783$$

$$\underline{\beta} := 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda_0 - 0.2) + \lambda_0^2] \quad \beta = 2.36$$

$$\underline{\rho} := \frac{1}{\beta + (\beta^2 - \lambda_0^2)^{0.5}} \quad \rho = 0.256 \quad \underline{\text{Verif2}} := \text{if}(\rho \leq 1, \text{"OK"}, \text{"NÃO OK"})$$

Verif2= "OK"

Finalmente, a resistência de cálculo devida à flambagem global valerá:

$$\text{Ncrd} := \frac{\rho \cdot f_y \cdot \text{Aef1}}{\gamma} \quad \text{Ncrd} = 63.52 \text{ kN}$$

$$\text{Verif3} := \text{if}(\text{Ncsd} \leq \text{Ncrd}, \text{"OK"}, \text{"NÃO OK"})$$

Verif3= "OK"

$$\underline{R} := \left( \frac{\text{Ncsd}}{\text{Ncrd}} \right) \quad R = 0.857$$

# Apêndice D - Análise e Dimensionamento das Terças de Cobertura do Modelo G-BP-V24-L6-V35

## D.1 - Considerações Preliminares

Para realizar a análise e dimensionamento das terças de cobertura do modelo G-BP-V24-L6-V35 (galpão de pórtico de Banzos Paralelos (BP) com vão livre de 24 metros, distância entre os pórticos transversais de 6 metros e velocidade básica do vento  $V_o = 35\text{m/s}$ ) foram consideradas as mesmas ações adotadas no Apêndice B para avaliação do pórtico principal do mesmo modelo.

De forma geral, o modelo estrutural para o dimensionadas das terças podem ser consideradas como sendo uma viga simplesmente apoiadas ou uma viga contínua. Optou-se por considerar as terças como viga contínua, pois este modelo estrutural resulta em perfis mais econômicos. Na Figura D.1 está representado um esquema em linha do modelo estrutural que será analisado e dimensionado para a terça de cobertura do galpão G-BP-V24-L6-V35.

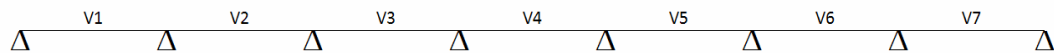


Figura D.1 - Modelo estrutural base para o dimensionamento da terça de cobertura.

É usual empregar perfis formados a frio do tipo “U” e “Z” como estrutura secundária de cobertura. No presente trabalho optou por adotar os perfis do tipo “Z<sub>45</sub>”, pois este perfil permite efetuar, com facilidade, o transpasse entre os elementos o que proporciona a continuidade do mesmo.

## D.2 - Programa Utilizado

Para a análise e dimensionamento das terça de cobertura empregou o programa computacional CFS v5.0, este programa foi desenvolvido pela RSG *Software* para dimensionamento de perfis formados a frio, tendo sua primeira versão lançada em 1987.

O programa permite o cálculo dos perfis formados a frio segundo prescrições das seguintes normas:

- AISI 2007 - E.U. e México (ASD e LRFD)
- 2007 AISI - Canada (LSD) AISI 2007 - Canadá (LSD)
- 2004 AISI - US & Mexico (ASD e LRFD) AISI 2004 - E.U. e México (ASD e LRFD)
- 2004 AISI - Canada (LSD) AISI 2004 - Canadá (LSD)
- 2001 AISI - US & Mexico (ASD and LRFD) AISI 2001 - E.U. e México (ASD e LRFD)
- 2001 AISI - Canada (LSD) AISI 2001 - Canadá (LSD)
- 1999 AISI - ASD e LRFD AISI 1999 - ASD e LRFD
- ASCE 2002 - ASD e LRFD

No CFS é possível criar qualquer forma de perfis formados a frio abertos, fechados e/ou com seções vazadas. Pode-se também atribuir propriedades personalizadas ou utilizar uma lista de propriedade. A aplicação do carregamento no modelo pode ser distribuído na barra, concentrada no nó e perpendicular ou em qualquer ângulo do eixo do perfil. As cargas axiais podem ser adicionadas com ou sem excentricidade.

O programa permite realizar análise para problemas relacionados à viga-coluna, viga-contínua e viga de múltiplos vãos.

### **D.3 – Análise e Dimensionamento**

Para o dimensionamento das terças de cobertura do modelo G-BP-V24-L6-V35 e obter a taxa de consumo de aço foram modelados todos os perfis formados a frio do tipo Z<sub>45</sub> especificações na NBR 6355:2003 (ABNT, 2003). Em seguida criou-se o modelo de viga contínua considerando sete vãos de 6 metros e distância entre terças adjacentes de 2 metros. Na Figura D.2 está representado o modelo gerado no programa CFS.

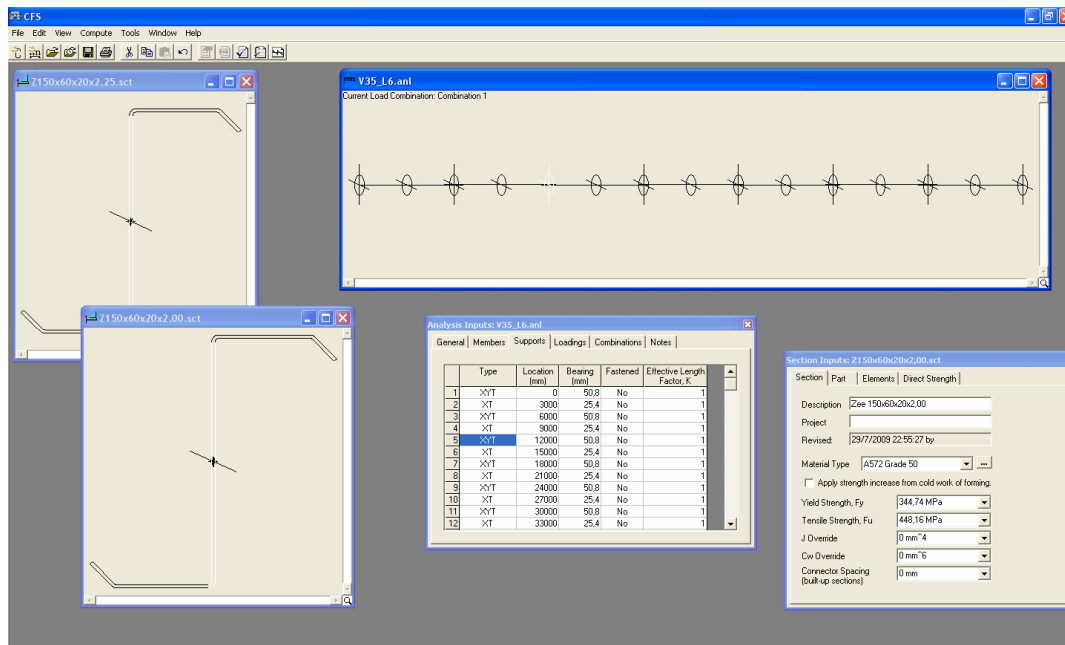


Figura D.2 - Modelo estrutural da terça de cobertura no CFS.

Após a criação do modelo estrutural, fez-se o lançamento das ações e por último realizou-se a combinação das ações, as combinações consideradas foram:

- $COMB1 = 1,25 \times G + 1,5 \times Q$
- $COMB2 = 1,0 \times G + 1,4 \times V$
- $COMB3 = G + Q$
- $COMB4 = G + V$

No dimensionamento verificou-se uma série de perfis com objetivo de atender os limites de resistência e os limites de deformações. As limitações das deformações das terças de cobertura são os indicados no Anexo C da NBR 8800:2008 (ABNT, 2008), em que especifica as seguintes premissas:

- L/180 - Considerar combinações raras de serviço, utilizando-se ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente.
- L/120 - Considerar apenas as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente (vento de sucção) com seu valor raro.



Portanto o deslocamento máximo para COMB3 é de L/180 (33,00mm) e para COMB4 é L/120 (50,00mm).

Depois de encontrado os perfis que atendam as relações de tensões menores que 1, o programa CFS emite um relatório, como apresentado abaixo, em que verifica-se o resultado final do dimensionamento. Como é possível observar a relação de tensões é menor que 1 o que indica que todos os perfis do modelo estrutural atendem as solicitações previstas.

### Member Check - AISI 2007 - LRFD

Load Combination: **Combination 2**  
Design Parameters at 2292,6 mm:

Lx	6000,0 mm	Ly	3000,0 mm	Lt	3000,0 mm
Kx	1,0000	Ky	1,0000	Kt	1,0000

Section: Z150x60x20x2,25.sct

Cbx	1,1723	Cby	1,3206	ex	0,0000 mm
Cmx	1,0000	Cmy	1,0000	ey	0,0000 mm

Braced Flange: None      Moment Reduction, R: 0,0000

Loads:	P (kgf)	Mx (kgf-m)	Vy (kgf)	My (kgf-m)	Vx (kgf)
Total	0,0	-307,24	0,0	0,26	-2,6
Applied	0,0	-307,24	0,0	0,26	-2,6
Strength	703,8	305,57	2509,3	116,45	1909,1

Effective section properties at applied loads:

Ae	676,01 mm <sup>2</sup>	Ixe	2395640 mm <sup>4</sup>	Iye	673254 mm <sup>4</sup>
		Sxe(t)	31942 mm <sup>3</sup>	Sye(l)	9220 mm <sup>3</sup>
		Sxe(b)	31942 mm <sup>3</sup>	Sye(r)	9220 mm <sup>3</sup>

Interaction Equations

NAS Eq. C5.2.1-1	(P, Mx, My)	$0,000 + 1,005 + 0,002 =$	<b>1,00</b>	<b>&lt;= 1.0</b>
NAS Eq. C5.2.1-2	(P, Mx, My)	$0,000 + 1,005 + 0,002 =$	<b>1,00</b>	<b>&lt;= 1.0</b>
NAS Eq. C3.3.1-1	(Mx, Vy)	$\text{Sqrt}(0,580 + 0,000) =$	<b>0,76</b>	<b>&lt;= 1.0</b>
NAS Eq. C3.3.1-1	(My, Vx)	$\text{Sqrt}(0,000 + 0,000) =$	<b>0,03</b>	<b>&lt;= 1.0</b>

Após a verificação das tensões admissíveis, faz-se necessário a verificação dos deslocamentos. Na Figura D.3 estão os gráficos de esforços e deformações gerados após as análises, como está ilustrado no gráfico *deflection* o deslocamento máximo foi de

18,04mm que é inferior ao limite estabelecido pelo Anexo C da NBR 8800:2008 (ABNT, 2008), ou seja, para a situação analisada o deslocamento está de acordo com o estabelecido pela norma.

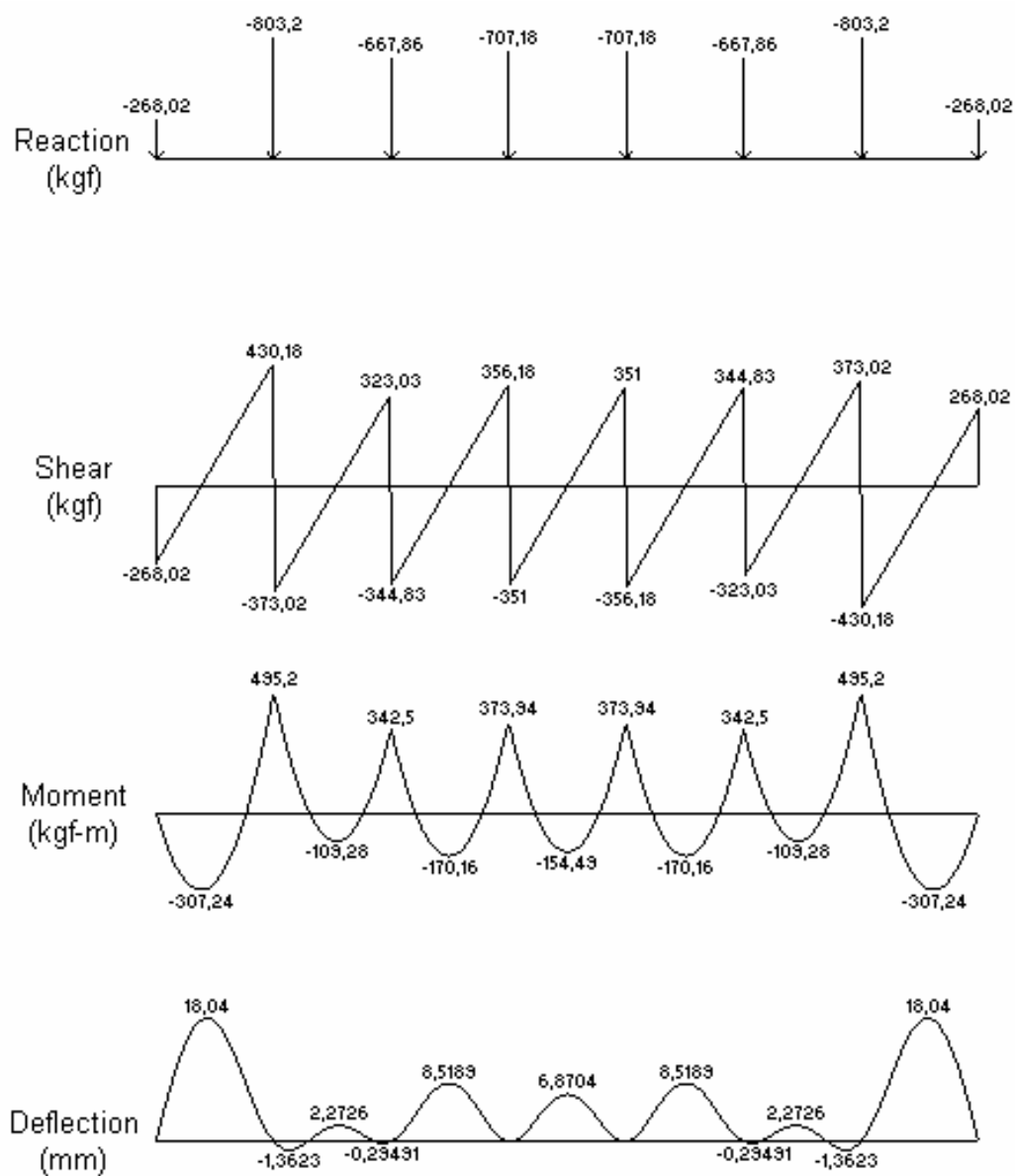


Figura D.3 - Resultado da análise da terça de cobertura do modelo G-BP-V24-L6-V35.

Concluída as análises e dimensionamento é possível apresentar um resumo dos perfis das terças de cobertura e o valor da taxa de consumo de aço, já considerando os suportes das terças e as correntes rígidas para o travamento lateral.

Tabela D.1 - Lista das terças e sua taxa de consumo de aço para o modelo G-BP-V24-L6-V35

		Comprimento: 42 m		Área: 1008 m <sup>2</sup>					
		Largura da obra: 24 m		esp. entre terças: 2 m					
	Perfil	Peso (kg) / m	Comp.(m)	Transpasse (m)		Peso (kg)	nº Correntes Rígida	Comp. (m)	Peso (kg)
				Esq. (m)	Dir (m)				
V1	150 x 60 x 20 x 2,25	5,310	6,00		0,810	37,00	1	2	43,68
V2	150 x 60 x 20 x 2,25	5,310	6,00	0,810	0,610	39,41	1	2	43,68
V3	150 x 60 x 20 x 2,00	4,730	6,00	0,610	0,610	34,16	1	2	43,68
V4	150 x 60 x 20 x 2,00	4,730	6,00	0,610	0,610	34,16	1	2	43,68
V5	150 x 60 x 20 x 2,00	4,730	6,00	0,610	0,610	34,16	1	2	43,68
V6	150 x 60 x 20 x 2,25	5,310	6,00	0,610	0,810	39,41	1	2	43,68
V7	150 x 60 x 20 x 2,25	5,310	6,00	0,810		36,17	1	2	43,68
<b>Total</b>						<b>3308,11</b>	<b>Total</b>		<b>305,76</b>
Nº de linhas de terças = 13 Suportes = 175 kg									
<b>TOTAL = 3788,87 kg</b>									
<b>TAXA = 3,76 kg/m2</b>									