



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto-Escola de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS PARA GALPÕES INDUSTRIAIS LEVES

AUTOR: MICHEL ROQUE CHAVES

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, 12 Março de 2007

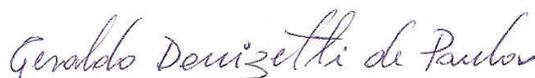
C512a	<p>Chaves, Michel Roque. Avaliação do desempenho de soluções estruturais para galpões leves [manuscrito] / Michel Roque Chaves. - 2007.</p> <p>xv, 125f.: il. color., graf., tabs.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula. Co-orientador: Prof. Dr. José Luiz Rangel Paes.</p> <p>Dissertação (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.</p> <p>1. Edifícios industriais - Teses. 2. Otimização industrial - Teses. 3. Padrões de desempenho - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.</p> <p>CDU: 624.014</p>
-------	--

Catlogação: sisbin@sisbin.ufop.br

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS
PARA GALPÕES INDUSTRIAIS LEVES**

AUTOR: MICHEL ROQUE CHAVES

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 12 de março de 2007, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



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



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



Prof. Dr. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro (UFOP)



Profa. Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga (UFV)

Aos meus pais, Domingos e Virginia, minhas irmãs Juliana e Fabiana, pela atenção e incentivo fundamentais à conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por colocar as pessoas certas no meu caminho e me dar a vida;
Aos meus pais, por terem dado condições para eu chegar aqui;
Ao Prof. Geraldo Donizetti de Paula, pelo incentivo e compreensão;
Ao Prof. José Luiz Rangel Paes, por ser muito mais que um orientador, um educador na sua essência;
Ao amigo Eng. Ruquerth Cardoso Campos, que muito me ensinou;
Aos colegas e amigos do curso de mestrado, em especial ao José Maria Franco de Carvalho;
A Universidade Federal de Ouro Preto e Universidade Federal de Viçosa, por terem me oferecido uma ótima formação;
À empresa Belgo Mineira pelo financiamento deste trabalho.

RESUMO

No projeto de uma estrutura metálica para um galpão industrial existe uma ampla gama de possibilidades que podem ser adotadas para o arranjo estrutural do edifício. A escolha racional dos sistemas estruturais é um fator de grande importância para o desenvolvimento de soluções padronizadas e competitivas. O objetivo deste trabalho é avaliar comparativamente o desempenho de alguns sistemas estruturais usuais para galpões industriais. Para isso desenvolve-se um estudo paramétrico considerando pórticos transversais de diversas tipologias submetidos a carregamentos usuais, com vãos livres variando de 16 a 32 metros. comuns por meio de simulações computacionais. As tipologias estudadas foram: pórtico de alma cheia, pórtico com treliça em arco, pórtico com treliça de banzos paralelos, pórtico com treliça trapezoidal e pórtico com treliça triangular. Neste estudo optou-se por avaliar, exclusivamente, a influência da tipologia e vão livre no desempenho do pórtico transversal. Como parâmetro da avaliação da eficiência dos sistemas estruturais foram considerados a taxa de consumo de aço e a resposta estrutural dos diversos modelos analisados. Os resultados indicam que os pórticos treliçados apresentam menores taxas de consumo que os pórticos de alma cheia. Os pórticos com treliça em arco e treliça de banzos paralelos apresentam taxa de consumo de aço muito parecidas, enquanto os pórticos com treliça trapezoidal apresentam o melhor resultado sob o ponto de vista da taxa de consumo e resposta estrutural. O estudo desenvolvido gera subsídios que podem auxiliar a arquitetos e engenheiros a definição de sistemas estruturais mais adequados para galpões industriais.

Palavras chave: galpões industriais, sistemas estruturais, construções metálicas.

ABSTRACT

In the project of a metallic structure to an industrial hangar there is a wide range of possibilities that can be adopted for the structural arrangement of the building exists. The rational choice of the structural systems is a factor of great importance for the development of standardized solutions and competitive. The objective of this work is to evaluate the acting of some usual structural systems comparatively for industrial hangars. For that it was grows a parametric study considering traverse porches of several typologies submitted to usual shipments, with free empty spaces varying from 16 to 32 meters. common through computacional simulation. The studied typologies were: porch of full soul, porch with trusses in arch, porch with trusses of parallel brace members, porch with trapezoidal trusses and porch with triangular trusses. In this study it was evaluated, exclusively, the influence of the typology and free empty space in the acting of the traverse porch. As parameter of the evaluation of the efficiency of the structural systems was considered the rate of consumption of steel and the structural answer of the several analyzed models. The results indicate that the trussed porches presents smaller consumption rates than the porches of full soul. The porches with trusses in arch and trusses of parallel brace members present rate of consumption of steel very seemed, while the porches with trapezoidal trusses present the best result under the point of view of the consumption rate and structural answer. The developed study generates subsidies that can aid architects and engineers the definition of more appropriate structural systems for industrial hangars.

Key words: industrial hangar, structural systems, metallic construction

Índice

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
-	
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Preliminares	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Estrutura do Trabalho	4
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Considerações Preliminares	5
2.2. Aspectos Relevantes da Concepção de Galpões Industriais em Aço	6
2.3. Considerações sobre o Projeto Estrutural de Galpões Industriais em Aço	8
2.4. Tipos de Edifícios Industriais	9
2.5. Arranjo Estrutural de um Galpão Industrial Leve	11
2.5.1. Vinculação entre Elementos Estruturais	11
2.5.2. Arranjo Estrutural Típico de um Galpão Industrial	12
2.6. Pórticos Transversais	16
2.6.1. Sistemas Estruturais	16
2.6.2. Pórticos de Alma Cheia	18
2.6.3. Pórticos Treliçados	19
2.7. Estruturas de Estabilização Longitudinal	22
2.8. Parâmetros para Avaliação do Sistema Estrutural	23
CAPÍTULO 3 – BASES DO ESTUDO PARAMÉTRICO	27
3.1. Considerações Preliminares	27
3.2. Critérios de Parametrização	28
3.3. Definições dos Modelos	33
3.3.1. Pórticos de Alma Cheia	33
3.3.2. Pórticos com Treliça em Arco	37
3.3.3. Pórticos com Treliça de Banzos Paralelos	42
3.3.4. Pórticos com Treliça Trapezoidal	46
3.3.5. Pórticos com Treliça Triangular	50
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DOS PÓRTICOS	
TRANSVERSAIS	54
4.1. Considerações Preliminares	54
4.2. Bases para Análise e Dimensionamento	55
4.3. Composição das Seções Transversais	56

4.4. Ações	58
4.4.1. sobrecarga de Cobertura	58
4.4.2. vento	59
4.4.2.1. Estudo de Vento Típico para Galpão em Duas Águas	61
4.4.2.2. Estudo de Vento Típico para Galpão em Arco	64
4.5. Combinação de Ações	67
4.6. Análise dos Modelos Estruturais	67
4.7. Dimensionamento	73
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
5.1. Considerações Preliminares	77
5.2. Representação dos Resultados do Estudo Paramétrico.....	78
5.3. Comparativo da Taxa de Consumo de Aço.....	79
5.3.1. Variação da Taxa de Consumo de Aço para um Mesmo Vão Livre	79
5.3.2. Variação da Taxa de Consumo de Aço para uma Mesma Tipologia	84
5.4. Deslocamento dos Pórticos Transversais	92
5.4.1. Deslocamento para uma Mesma Tipologia	94
5.4.2. Comparativo dos Deslocamentos Verticais para Todas as Tipologias	99
5.4.3. Comparativo dos Deslocamentos Horizontais para Todas as Tipologias	102
5.5. Comparativo da Taxa de Consumo com a Literatura	104
CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
6.1. Conclusões	106
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	111
ANEXO	112

Lista de Figuras

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	2
Figura 1.1 – Esquema geral de um galpão industrial de vão simples	2
Figura 1.2 – Esquema geral do arranjo estrutural de um galpão industrial de vão simples ...	2
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
Figura 2.1 – Corte esquemático de um galpão industrial (SANTOS, 1977)	7
Figura 2.2 – Arranjo estrutural típico de um galpão industrial leve	13
Figura 2.3 – Plano das terças	13
Figura 2.4 – Plano do banzo inferior da treliça do pórtico transversal	14
Figura 2.5 – Vista geral de um galpão industrial leve com pórtico treliçado	14
Figura 2.6 – Pórticos engastados na base	17
Figura 2.7 – Pórtico rotulado na base	17
Figura 2.8 – Pórtico atirantado	18
Figura 2.9 – Pórtico de alma cheia	18
Figura 2.10 – Pórtico com treliça triangular	20
Figura 2.11 – Pórtico com treliça em arco	20
Figura 2.12 – Pórtico com treliça de banzos paralelos	21
Figura 2.13 – Pórtico com treliça trapezoidal	22
Figura 2.14 – Taxa de consumo de aço para galpão leves comuns (MIC/STI, 1986)	24
Figura 2.15 – Taxa de consumo de aço para galpão médios (MIC/STI, 1986)	24
Figura 2.16 – Consumo de Aço em kg/m ² para galpão em pórtico em alma cheia (D'ALAMBERT, 2004)	25
CAPÍTULO 3 – BASES DO ESTUDO PARAMÉTRICO	29
Figura 3.1 – Tipologias de pórtico transversal consideradas no estudo paramétrico	29
Figura 3.2 – Sobreposição das tipologias de pórticos de alma cheia (AC) (dimensões em milímetros)	30
Figura 3.3 - Sobreposição das tipologias de pórticos com treliça em arco (TA) (dimensões em milímetros)	31
Figura 3.4 - Sobreposição das tipologias de pórticos com treliça de banzos paralelos (BP) (dimensões em milímetros)	32
Figura 3.5 - Sobreposição das tipologias de pórticos com treliça trapezoidal (TP) (dimensões em milímetros)	32
Figura 3.6 - Sobreposição das tipologias de pórticos com treliça triangular (TT) (dimensões em milímetros)	33
Figura 3.7 – Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos de alma cheia ...	34
Figura 3.8 – Sistema estrutural dos pórticos de alma cheia	34
Figura 3.9 – Pórtico de alma cheia com vão livre de 16 metros (dimensões em milímetros)	35
Figura 3.10 – Pórtico de alma cheia com vão livre de 20 metros (dimensões em milímetros)	35

Figura 3.11 - Pórtico de alma cheia com vão livre de 24 metros (dimensões em milímetros)	36
Figura 3.12 - Pórtico de alma cheia com vão livre de 28 metros (dimensões em milímetros)	36
Figura 3.13 - Pórtico de alma cheia com vão livre de 32 metros (dimensões em milímetros)	37
Figura 3.14 – Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça em arco	38
Figura 3.15 – Sistema estrutural do pórtico treliçado em arco	38
Figura 3.16 - Pórtico com treliça em arco com vão livre de 16 metros (dimensões em milímetros)	39
Figura 3.17 - Pórtico com treliça em arco com vão livre de 20 metros (dimensões em milímetros)	40
Figura 3.18 - Pórtico com treliça em arco com vão livre de 24 metros (dimensões em milímetros)	40
Figura 3.19 - Pórtico com treliça em arco com vão livre de 28 metros (dimensões em milímetros)	41
Figura 3.20 - Pórtico com treliça em arco com vão livre de 32 metros (dimensões em milímetros)	41
Figura 3.21 – Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça de banzos paralelos	42
Figura 3.22 – Sistema estrutural do pórtico com treliça de banzos paralelos	43
Figura 3.23 – Pórtico com treliça de banzos paralelos com vão livre de 16 metros (dimensões em milímetros)	43
Figura 3.24 – Pórtico com treliça de banzos paralelos com vão livre de 20 metros (dimensões em milímetros)	44
Figura 3.25 – Pórtico com treliça de banzos paralelos com vão livre de 24 metros (dimensões em milímetros)	44
Figura 3.26 – Pórtico com treliça de banzos paralelos com vão livre de 28 metros (dimensões em milímetros)	45
Figura 3.27 – Pórtico com treliça de banzos paralelos com vão livre de 32 metros (dimensões em milímetros)	45
Figura 3.28 – Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça trapezoidal	46
Figura 3.29 – Sistema estrutural do pórtico com treliça trapezoidal	47
Figura 3.30 – Pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 16 metros (dimensões em milímetros)	47
Figura 3.31 - Pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 20 metros (dimensões em milímetros)	48
Figura 3.32 - Pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros (dimensões em milímetros)	48
Figura 3.33 - Pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 28 metros (dimensões em milímetros)	49
Figura 3.34 - Pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 32 metros (dimensões em milímetros)	49
Figura 3.35 – Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça triangular	50
Figura 3.36 – Sistema estrutural do pórtico com treliça triangular	51

Figura 3.37 - Pórtico com treliça triangular com vão livre de 16 metros (dimensões em milímetros)	51
Figura 3.38 - Pórtico com treliça triangular com vão livre de 20 metros (dimensões em milímetros)	52
Figura 3.39 - Pórtico com treliça triangular com vão livre de 24 metros (dimensões em milímetros)	52
Figura 3.40 - Pórtico com treliça triangular com vão livre de 28 metros (dimensões em milímetros)	53
Figura 3.41 - Pórtico com treliça triangular com vão livre de 32 metros (dimensões em milímetros)	53

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DOS PÓRTICOS

TRANSVERSAIS	56
Figura 4.1 – Composição das vigas treliçadas	56
Figura 4.2 – Delimitação da área abrangida pelo estudo paramétrico nas Isopletras de velocidade básica V_0 (m/s)	60
Figura 4.3 – Coeficientes de forma externos para as paredes.....	61
Figura 4.4 – Coeficientes de forma externos para telhado em duas águas	62
Figura 4.5 – Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão para vento longitudinal ($W0^\circ$)	62
Figura 4.6 – Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão para vento transversal ($W90^\circ$)	63
Figura 4.7 – Caso de carga para vento longitudinal ($W0^\circ$) (kN/m ²).....	63
Figura 4.8 – Caso de carga para vento transversal ($W90^\circ$) (kN/m ²).....	63
Figura 4.9 – Coeficientes de forma externos para as paredes	64
Figura 4.10 – Coeficientes de forma externos para telhado em arco	65
Figura 4.11 – Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão para vento longitudinal ($W0^\circ$)	65
Figura 4.12 – Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão para vento transversal ($W90^\circ$)	66
Figura 4.13 – Caso de carga para vento longitudinal ($W0^\circ$) (kN/m ²)	66
Figura 4.14 – Caso de carga para vento transversal ($W90^\circ$) (kN/m ²)	66
Figura 4.15 – Seções transversais dos elementos que compõem o pórtico com treliça trapezoidal (TP) com vão livre de 24 metros.	68
Figura 4.16 – Ações devido ao peso próprio de cobertura (G) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros.....	68
Figura 4.17 – Ações devido à sobrecarga de cobertura (Q) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros	69
Figura 4.18 – Ações devidas ao vento longitudinal ($W0^\circ$) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros	69
Figura 4.19 – Ações devidas ao vento transversal ($W90^\circ$) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros	70
Figura 4.20 – Vinculação das barras	70
Figura 4.21 – Diagrama de Esforços Axiais devido à COMB1 (1,3G + 1,5Q)	71
Figura 4.22 – Diagrama de Esforços Axiais devido à COMB2 (1G + 1,4W90°)	71
Figura 4.23 – Diagrama de Esforços Axiais devido à COMB3 (1G+1,4W0°)	72

Figura 4.24 – Diagrama de Momentos Fletores devido à COMB1 (1,3G + 1,5Q)	72
Figura 4.25 – Diagrama de Momentos Fletores devido à COMB2 (1G + 1,4W90°)	73
Figura 4.26 – Diagrama de Momentos Fletores devido à COMB3 (1G + 1,4W0°)	73
Figura 4.27 – Verificação preliminar de seções transversais do pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros, de acordo com os critérios da AISC-LRFD/93(AISC,1993)	74
Figura 4.28 – Verificação preliminar de uma diagonal da treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros, identificada por meio de um círculo na Figura 4.29, no SAP2000	75
Figura 4.29 – Verificação final de uma diagonal da treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros, identificada por meio de um círculo na Figura 4.29, no DESMET	76
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
Figura 5.1 – Seções transversais dos elementos que compõem o pórtico com treliça trapezoidal (TP) com vão livre de 24 metros.....	79
Figura 5.2 – Taxa de consumo aço para vão livre 16 metros	80
Figura 5.3 – Taxa de consumo aço para vão livre 20 metros	80
Figura 5.4 – Taxa de consumo aço para vão livre 24 metros	81
Figura 5.5 – Taxa de consumo aço para vão livre 28 metros	81
Figura 5.6 – Taxa de consumo aço para vão livre 32 metros	82
Figura 5.7 – Taxa de consumo aço para os vãos livres considerados, em função das tipologias	83
Figura 5.8 – Taxa de consumo de aço para pórtico de alma cheia (AC)	85
Figura 5.9 – Taxa de consumo de aço para pórtico com treliça em arco (TA)	85
Figura 5.10 – Taxa consumo de aço para pórtico com treliça de banzos paralelos (BP)	86
Figura 5.11 – Taxa de consumo de aço para pórtico com treliça trapezoidal (TP).....	86
Figura 5.12 – Taxa de consumo de aço para pórtico com treliça triangular (TT)	87
Figura 5.13 – Taxa de consumo aço para todos os vãos livres e tipologias	88
Figura 5.14 – Linha de tendência de consumo de aço para pórtico de alma cheia	90
Figura 5.15 – Linha de tendência de consumo de aço para pórtico com treliça em arco	90
Figura 5.16 – Linha de tendência de consumo de aço para pórtico com treliça em banzos paralelos	91
Figura 5.17 – Linha de tendência de consumo de aço para pórtico com treliça trapezoidal	91
Figura 5.18 – Linha de tendência de consumo de aço para pórtico com treliça triangular	92
Figura 5.19 – Deslocamento vertical típico de um pórtico com treliça trapezoidal (TP)	93
Figura 5.20 – Deslocamento horizontal típico de um pórtico com treliça trapezoidal (TP)	93
Figura 5.21 – Deslocamentos do pórtico de alma cheia	94
Figura 5.22 – Deslocamentos do pórtico com treliça em arco	95
Figura 5.23 – Deslocamentos do pórtico com treliça de banzos paralelos	96
Figura 5.24 – Deslocamentos do pórtico com treliça trapezoidal	97
Figura 5.25 – Deslocamentos do pórtico com treliça triangular	98

Figura 5.26 – Comparativo dos deslocamentos verticais para as diversas tipologias (pórticos treliçados formados por perfil TE eletro-soldado)	99
Figura 5.27 – Comparativo dos deslocamentos verticais para as diversas tipologias (pórticos treliçados formados por cantoneira dupla)	100
Figura 5.28 – Comparativo dos deslocamentos horizontais para as diversas tipologias (pórticos treliçados formados por perfil TE eletro-soldado)	102
Figura 5.29 – Comparativo dos deslocamentos horizontais para as diversas tipologias (pórticos treliçados formados por cantoneira dupla)	103
Figura 5.30 – Comparativo do consumo de aço para galpão em pórtico de alma cheia.	105

Lista de Tabelas

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
Tabela 2.1 – Composição dos estágios de ações (D'ALAMBERT, 2004)	26
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DOS PÓRTICOS	
TRANSVERSAIS	57
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas de seções transversais	57
Tabela 4.2 – Seções equivalentes da viga de cobertura e esbeltezes dos elementos comprimidos	57
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
Tabela 5.1 – Lista de material para pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros.....	78

1

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Preliminares

Dentre os diversos aspectos relacionados à construção metálica, destacam-se a maior resistência mecânica do aço quando comparada às dos outros materiais, a eficiência de uma construção industrializada, a flexibilidade das soluções arquitetônicas e estruturais, a facilidade de montagem e desmontagem, além da facilidade de reforço e ampliação. Como conseqüências diretas destas características, podem-se obter ganhos como alívio das fundações, aumento do espaço útil da construção, redução do tempo de construção e redução da área de canteiro de obras, entre outros.

Devidos aos diversos aspectos positivos identificados na construção metálica, é cada vez mais freqüente o interesse pelos edifícios em estrutura de aço no Brasil. O interesse pelos galpões industriais em aço é cada vez maior.

Geralmente, um galpão industrial é um edifício de um único pavimento com grande área construída (Figura 1.1 e 1.2), destinada a diversas finalidades como pequenas fábricas, depósitos, academias, ginásios, garagens, dentre outros.

Nas Figuras 1.1 e 1.2 apresentam-se esquemas gerais de um galpão industrial de vão simples, com cobertura em duas águas.

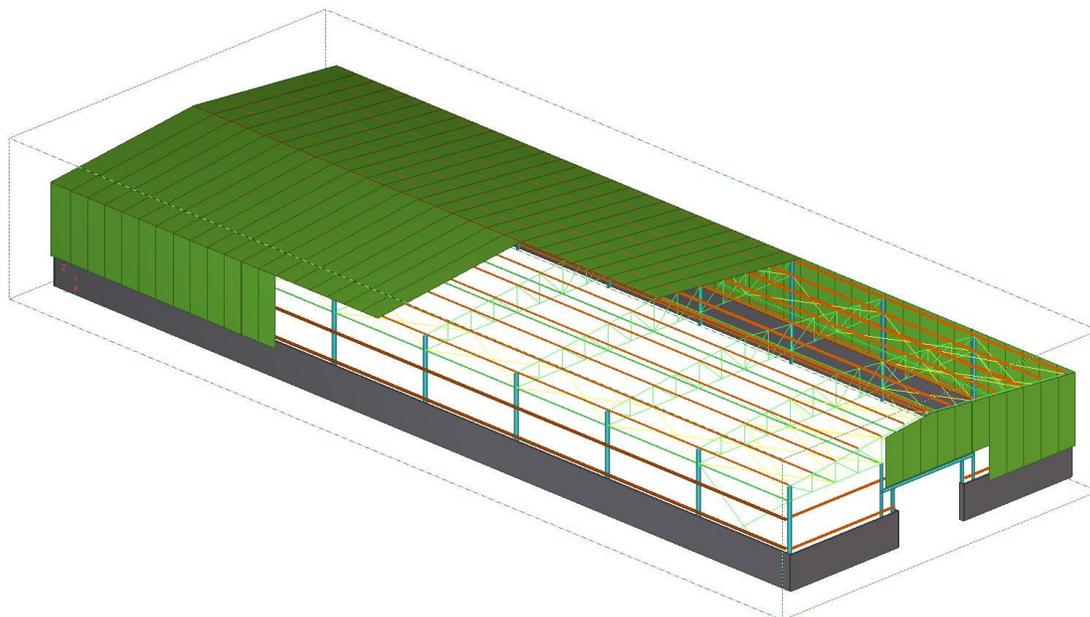


Figura 1.1 - Esquema geral de um galpão industrial de vão simples

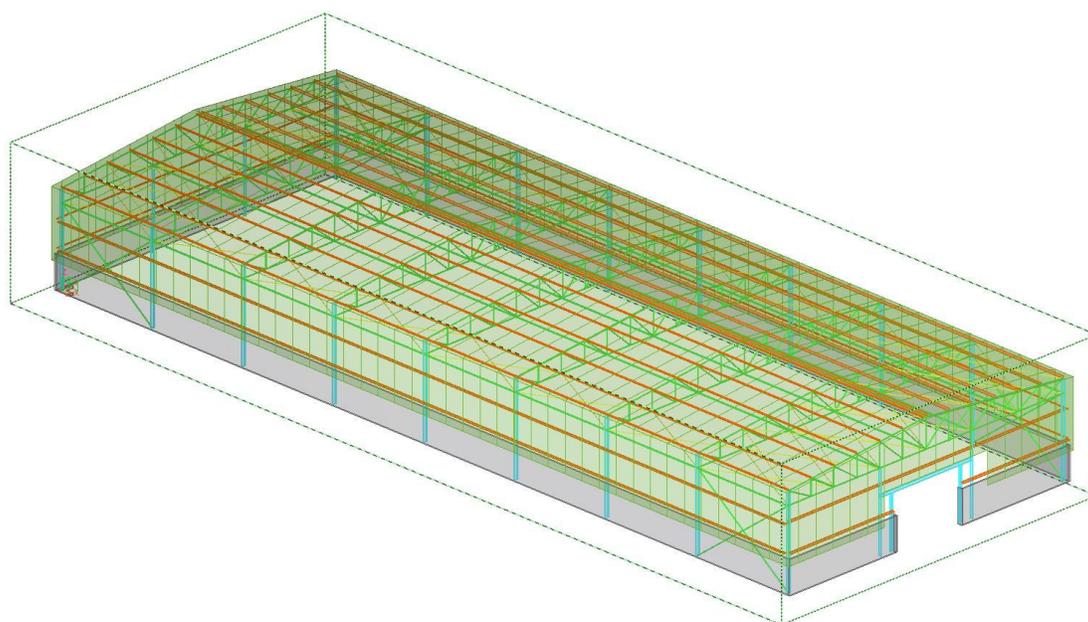


Figura 1.2 - Esquema geral do arranjo estrutural de um galpão industrial de vão simples

Nos últimos anos, o mercado competitivo entre as empresas de engenharia aumentou a preocupação com a redução de custos dos empreendimentos. Atualmente a otimização de estruturas tem se mostrado uma ferramenta muito eficaz para tornar as empresas mais competitivas num mercado globalizado. A otimização pode ser entendida como uma maneira hábil de se identificar a melhor solução dentre as inúmeras disponíveis.

O grande desenvolvimento dos softwares para projeto estrutural e a utilização maciça de computadores nos escritórios de engenharia aumentaram a velocidade e a eficiência da atividade de projeto. A necessidade de redução de custos faz com que seja cada vez mais necessário explorar as diversas ferramentas tecnológicas disponíveis para buscar soluções mais racionais e competitivas dentre as diversas opções estruturais possíveis.

O projeto de uma estrutura é um processo que envolve diversas etapas como a definição do sistema estrutural, a identificação e quantificação de ações, a definição de condições de contorno, a escolha de materiais, a análise estrutural, o dimensionamento de seções transversais, o detalhamento, as especificações, etc. O resultado final representa uma síntese de decisões que são tomadas ao longo do desenvolvimento do projeto, em função de uma série de opções consideradas para cada assunto relacionado ao projeto.

No projeto de uma estrutura metálica para um galpão industrial existe uma ampla gama de possibilidades que podem ser adotadas para o arranjo estrutural do edifício. Normalmente, o engenheiro deve ser capaz de definir a solução mais adequada para o arranjo estrutural dentre as diversas soluções possíveis, mesmo sem realizar inúmeras simulações de projeto. Até algum tempo atrás, isso só era viável com base em uma grande experiência do profissional. O avanço da informática torna possível simular o comportamento de diversos modelos estruturais antes de se tomar uma decisão final sobre a tipologia estrutural a ser adotada.

No caso específico do projeto de galpões industriais nota-se que o conhecimento que permite uma tomada de decisão quanto à tipologia estrutural mais adequada ainda não é um assunto amplamente difundido no meio técnico da engenharia. Os arquitetos se ressentem ainda mais da falta dessas indicações para a concepção de galpões industriais em geral.

Neste trabalho aborda-se uma avaliação de tipologias estruturais usuais aplicáveis aos galpões industriais. A partir do seu desenvolvimento, espera-se contribuir com engenheiros e arquitetos na seleção de sistemas estruturais mais adequados para concepção desses edifícios.

Tendo em vista o grande interesse atual pela industrialização da fabricação de galpões em aço, a escolha racional dos sistemas estruturais é um fator de grande importância para o desenvolvimento de soluções padronizadas competitivas.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho de algumas soluções estruturais usuais utilizadas em galpões industriais.

Para alcançar esse objetivo estabelecem-se alguns objetivos específicos:

- apresentar as concepções de tipologias comuns para galpões industriais leves;
- analisar e dimensionar os modelos estruturais;
- determinar a taxa de consumo de aço para cada modelo;
- comparar a taxa de consumo de aço e a resposta estrutural dos diversos modelos analisados;
- avaliar a eficiência estrutural das tipologias propostas.

1.3. Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos, nos quais se apresenta o desenvolvimento do trabalho de pesquisa realizado, os resultados obtidos e a discussão sobre os mesmos.

No Capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica, no qual se oferece uma visão geral sobre a concepção de galpões industriais, uma discussão sobre os arranjos estruturais utilizados e as principais tipologias de pórticos transversais, que constituem a estrutura principal desses edifícios. Ainda neste capítulo apresentam-se alguns parâmetros para comparação entre sistemas estruturais.

No Capítulo 3 apresentam-se as bases do estudo paramétrico desenvolvido neste trabalho, considerando-se os sistemas estruturais utilizados com maior frequência nesses edifícios.

O Capítulo 4 aborda a análise e o dimensionamento dos modelos definidos no Capítulo 3 para o estudo paramétrico.

No Capítulo 5 apresentam-se os resultados do estudo realizado e uma discussão sobre os mesmos.

A parte final deste trabalho é constituída pelo Capítulo 6 - Conclusões e Sugestões, que diz respeito às diversas considerações feitas sobre os resultados obtidos no trabalho, bem como algumas recomendações propostas para futuras pesquisas sobre o assunto.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações Preliminares

Geralmente, os galpões industriais são construções de um único pavimento que se estendem por grandes áreas e são constituídos por pórticos planos regularmente espaçados com cobertura na parte superior e fechamento lateral.

Um galpão industrial pode ser construído com diversos materiais, como aço, madeira, concreto e alumínio. Pode-se utilizar esses materiais isoladamente ou em conjunto. Já há algum tempo, o aço é o material mais utilizado para construção de edifícios industriais no Brasil, devido às vantagens econômicas e construtivas que oferece. Atualmente esta solução divide espaço com os galpões pré-fabricados de concreto, que se tornaram competitivos nos últimos anos.

Neste capítulo apresentam-se alguns aspectos do projeto de edifícios industriais em aço, os sistemas estruturais encontrados com maior frequência e uma descrição das estruturas principais e de estabilização mais utilizadas.

2.2. Aspectos Relevantes da Concepção de Galpões Industriais em Aço

De acordo com o Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas (MIC/STI, 1986), os galpões industriais 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.

No projeto de galpões industriais, devem ser considerados os seguintes parâmetros:

- disposição e dimensões dos equipamentos que serão abrigados;
- movimentação de cargas;
- circulação interna;
- iluminação natural e artificial;
- ventilação;
- condições e tipo de terreno.

Deve-se considerar também a possibilidade de ampliação e modificações futuras e, eventualmente, de aquecimento ou resfriamento de ar, de forma a garantir adequadas condições de trabalho (higiene, segurança e conforto) no interior do edifício.

Em função dos diversos aspectos que devem ser considerados, nota-se que a elaboração do projeto de galpões industriais exige um planejamento global cuidadoso.

De acordo com o "Steel Design Guide nº7 - Industrial Buildings", publicado pelo AISC (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 logicamente um campo de atuação exclusivo do engenheiro estrutural. No entanto, é fundamental notar que a maioria dos edifícios industriais requer muito mais do que projeto estrutural.

Segundo SCHULTE et al. (1978), a função básica dos galpões leves em duas águas é a de transmitir aos pilares, através das tesouras, as cargas resultantes do peso próprio e as provenientes da cobertura.

Segundo SANTOS (1977), galpões industriais são edifícios projetados adequadamente para a instalação de atividades do tipo industrial como: fábricas, oficinas, depósitos, etc. De grande importância é o estudo detalhado dos edifícios industriais, pois sua disposição estrutural e arquitetônica, plenamente funcional, é condição fundamental para a eficiência do trabalho a ser desenvolvido e para o êxito da produção.

Os edifícios industriais atuais geralmente apresentam planta retangular e possuem somente um pavimento. Cada vez é mais freqüente a existência de mezaninos ou pequenas construções acopladas no seu interior, destinadas a sanitários, escritórios, refeitórios, laboratórios, etc. (Figura 2.1).

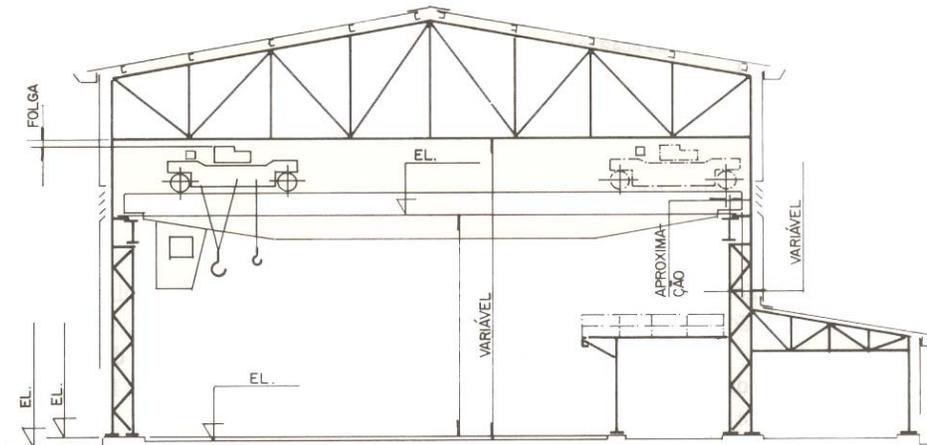


Figura 2.1 – Corte esquemático de um galpão industrial (SANTOS, 1977)

Na fabricação dos galpões em estrutura de aço são utilizados perfis laminados, soldados e conformados a frio. O galpão industrial formado por estes materiais pode ser fabricado e montado no local da obra ou fabricado em partes no pátio de uma empresa especializada e, posteriormente, levado para o local onde será montado.

Uma das características mais marcantes dos galpões industriais em aço é a possibilidade de 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.

Um galpão industrial de porte médio em aço com sistema estrutural em pórticos treliçados pode requerer milhares de elementos estruturais. Se esses elementos estruturais forem diferentes, não será possível tirar proveito da industrialização do processo de fabricação dos mesmos. Portanto, para que seja viável industrializar a fabricação de uma estrutura de um galpão industrial, torna-se necessário padronizar elementos estruturais, de forma a se obter o maior número possível de peças com as mesmas características, sem perder de vista o critério econômico.

A modulação arquitetônica é uma técnica de elaboração de projetos muito adequada à construção metálica, visto que permite a obtenção de diversos elementos estruturais com as

mesmas características geométricas numa mesma obra. Isto favorece bastante o processo de fabricação, podendo-se alcançar níveis elevados de racionalização e industrialização. O módulo fundamental utilizado na construção metálica é uma medida básica que geralmente está relacionada à dimensão da chapa padrão (12 metros) e se repete integral ou parcialmente em toda a estrutura.

No caso de galpões industriais, a modulação pode ser aplicada desde o espaçamento entre pórticos planos principais até detalhes construtivos menores. A utilização de vigas e colunas de mesmas características geométricas proporciona uma redução no detalhamento da estrutura e racionaliza o trabalho na oficina, permitindo um bom nível de industrialização do processo de fabricação.

2.3. Considerações sobre o Projeto Estrutural de Galpões Industriais em Aço

Tendo como referência uma solução em concreto armado, uma estrutura de aço apresenta uma grande vantagem no que se refere ao peso próprio e à resistência mecânica. Nas estruturas de aço, a influência do peso próprio é bem menor do que a de outras ações. O peso próprio pode ser avaliado de modo aproximado e pequenas variações do mesmo não exercem uma influência significativa no resultado final. Por outro lado, certos efeitos que pouco influem no dimensionamento de uma estrutura de concreto armado podem obrigar a sensíveis mudanças no dimensionamento final de uma estrutura de aço.

Dois exemplos podem ilustrar esses conceitos:

a) uma cobertura plana feita com estrutura de aço pesa cerca de 0,15 a 0,30 kN/m². O peso de uma estrutura de concreto armado situa-se entre 2 a 3 kN/m². A título de comparação, a sobrecarga de cobertura prevista pela NBR 8800 (ABNT, 2006), de 0,25 kN/m², representa em torno de 40% da combinação entre peso próprio e sobrecarga de cobertura (G+Q) para uma estrutura de aço. Enquanto isso, para uma estrutura de concreto armado, a mesma sobrecarga representa cerca de 10% do total da combinação de ações.

b) sobre a mesma cobertura citada, a ação do vento pode gerar uma sucção da ordem de 0,30 a 0,70 kN/m². Tal efeito é geralmente desprezado em uma estrutura de concreto armado devido à magnitude de seu peso próprio, que atua em direção oposta.

Em função do reduzido peso próprio, numa estrutura de aço freqüentemente se verifica uma inversão de sinais nas solicitações que ocorrem nos elementos estruturais. Por exemplo, se a cobertura for treliçada, o banzo inferior, normalmente tracionado, poderá ser comprimido

e daí ficar sujeito a fenômenos de instabilidade. Se a esbeltez do banzo inferior for grande, uma solicitação de compressão de pequena magnitude poderá se tornar o fator condicionante do dimensionamento, até mesmo anulando os efeitos da tração.

2.4. Tipos de Edifícios Industriais

Diversos autores (MIC/STI, 1986; PINHO, 2005, BELLEI, 2006) apresentam classificações distintas para os galpões industriais, na tentativa de sistematizar as diversas possibilidades construtivas deste tipo de edificação.

Segundo o Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas (MIC/STI, 1986), os sistemas estruturais dos galpões industriais são escolhidos em função da finalidade a que se destinam, das suas dimensões principais e do tipo do terreno. Para facilitar o entendimento, os galpões podem ser agrupados quanto à:

a) estrutura principal:

- pórticos simples;
- pórticos múltiplos;
- estruturas especiais.

b) cobertura:

- cobertura plana (horizontal ou inclinada);
- cobertura dentada (sheds);
- cobertura em arco.

Segundo BELLEI (2006), os edifícios industriais podem ser classificados em:

- estruturas de vãos simples;
- estruturas de vãos múltiplos.

PINHO (2005) apresenta dois tipos básicos de galpões em pórticos, definidos em função do tipo de estrutura transversal portante:

- pórticos de alma cheia;
- pórticos treliçados.

Nos pórticos de alma cheia se utilizam perfis laminados ou soldados de grandes dimensões como elementos principais da estrutura, enquanto nos pórticos treliçados, se empregam perfis menores formando reticulados em treliça para compor os elementos principais da estrutura.

Este mesmo autor (PINHO, 2005) apresenta ainda uma outra classificação dos edifícios industriais em função da presença de pontes rolantes, equipamentos comumente utilizados nos edifícios industriais:

- galpões sem ponte rolante;
- galpões com ponte rolante.

Os galpões sem ponte rolante são usualmente empregados em coberturas para diversas finalidades, desde pequenas instalações comerciais até ginásios poliesportivos de grandes vãos. Nestas estruturas, a carga predominante é o vento, visto que nas mesmas se utilizam normalmente telhas metálicas de pouco peso. Os galpões com ponte rolante são mais complexos porque exigem apoio para o caminho de rolamento da mesma. Nestes casos, a carga predominante é a da ponte rolante, que introduz forças verticais, horizontais e impactos que devem ser resistidos pelos pórticos, mantendo-se sempre os deslocamentos máximos dentro dos limites admissíveis para a operação da ponte.

Com base nas classificações anteriores, para efeito de sistematização neste trabalho propõe-se uma nova classificação para os galpões industriais:

- edifícios com vãos simples:
 - cobertura em uma água;
 - cobertura em duas águas;
 - cobertura em arco;
- estruturas com vãos múltiplos:
 - cobertura em múltiplos de uma água;
 - cobertura em múltiplos de duas águas;
- edifícios com estruturas especiais:
 - estruturas reticuladas espaciais;
 - outras estruturas especiais.

De acordo com a classificação proposta, os galpões podem ou não ter pontes rolantes e podem ou não ser de alma cheia ou em treliça em função das necessidades impostas no projeto.

Neste trabalho trata-se exclusivamente da avaliação do comportamento estrutural de edifícios industriais com vãos simples, com cobertura em duas águas ou em arco, sem ponte rolante. Para efeitos de referência, esses galpões serão denominados galpões industriais leves, termo este utilizado em algumas referências bibliográficas para edifícios industriais sem ponte rolante ou com pontes de pequena capacidade (até 50kN).

2.5. Arranjo Estrutural de um Galpão Industrial Leve

2.5.1. Vinculação entre Elementos Estruturais

Devido às amplas possibilidades de concepção, são muitos os sistemas estruturais que podem ser empregados no projeto de galpões industriais em aço. No entanto, independentemente do tipo de galpão, podem-se fazer algumas considerações de caráter geral sobre as vinculações entre elementos estruturais usualmente utilizados nesses edifícios.

Uma estrutura de aço é o resultado da montagem de um conjunto de elementos estruturais que são fabricados a partir de perfis e chapas metálicas produzidas nas usinas siderúrgicas.

Devido a todo o processo necessário para obtenção do produto final, uma estrutura metálica apresenta características particulares que a diferenciam de uma estrutura de concreto convencional.

Uma estrutura de concreto moldado *in loco* é predominantemente monolítica e fortemente hiperestática. Num nó de uma estrutura de concreto armado onde se unem uma viga e um pilar, a rigidez da ligação é muito grande, de tal forma que pode-se considerar a existência de uma ligação rígida, ou seja, aquela que tem capacidade de transmitir esforços normais, cortantes e momentos fletores. Quando não se deseja transmitir momentos fletores através dos nós de uma estrutura de concreto é necessário introduzir um artifício tecnológico ou construtivo.

Ao contrário da estrutura de concreto convencional, a estrutura de aço nasce da montagem de diversos elementos e o grau de vinculação entre as várias peças que a compõem pode ser controlado introduzindo artifícios construtivos, o que possibilita uma maior flexibilidade na escolha do sistema estrutural. Por estes aspectos, a tipologia de uma estrutura de aço é fortemente influenciada pela seqüência de produção, sendo inteiramente diferente de uma estrutura de concreto moldada *in loco*.

Principalmente devido à necessidade de facilitar o processo de montagem e torná-lo mais rápido, é necessário simplificar as ligações, o que faz com que o grau de vinculação entre os elementos estruturais seja o menor possível.

De uma forma geral, as estruturas possuem um caráter tridimensional, mesmo que possam ser decompostas em sub-estruturas planas para efeito de representação e análise. Os efeitos de instabilidade devem ser analisados tanto no plano das estruturas principais, quanto fora dele.

A título de exemplo, quando os pilares são engastados na base, as tesouras de cobertura que compõem a estrutura principal podem ser ligadas aos mesmos através de ligações flexíveis, ou seja, que não transmitem momentos fletores. Entretanto, se os pilares forem articulados nas bases, as tesouras de cobertura deverão ser ligadas nas extremidades superiores dos mesmos por meio de ligações rígidas, a fim de que os pórticos transversais formados por esses elementos não fiquem hipostáticos (SANTOS, 1977).

O reduzido grau de vinculação entre elementos estruturais nas estruturas metálicas normalmente leva ao surgimento de estruturas hipostáticas fora do plano da estrutura principal. Para eliminar esta hipostaticidade se utilizam estruturas de estabilização longitudinal, como os sistemas de contraventamento.

2.5.2. Arranjo Estrutural Típico de um Galpão Industrial

Nas Figuras 2.2 a 2.5 apresentam-se alguns esquemas que representam o arranjo estrutural típico de um galpão industrial, nos quais pode-se identificar os seguintes componentes:

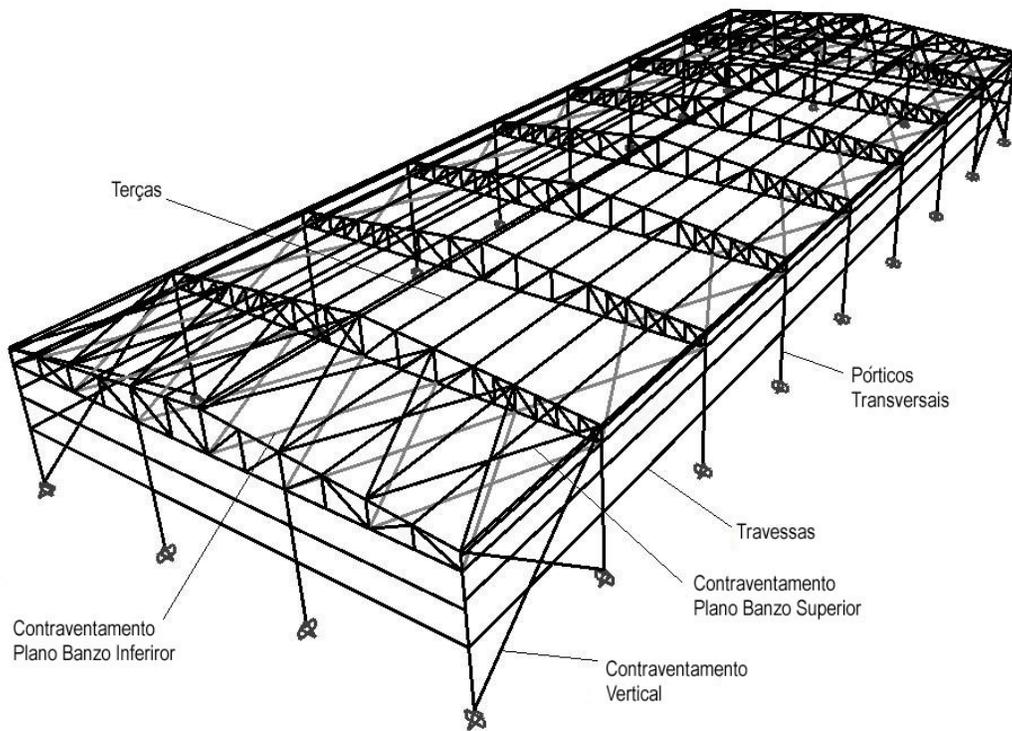


Figura 2.2 – Arranjo estrutural típico de um galpão industrial leve

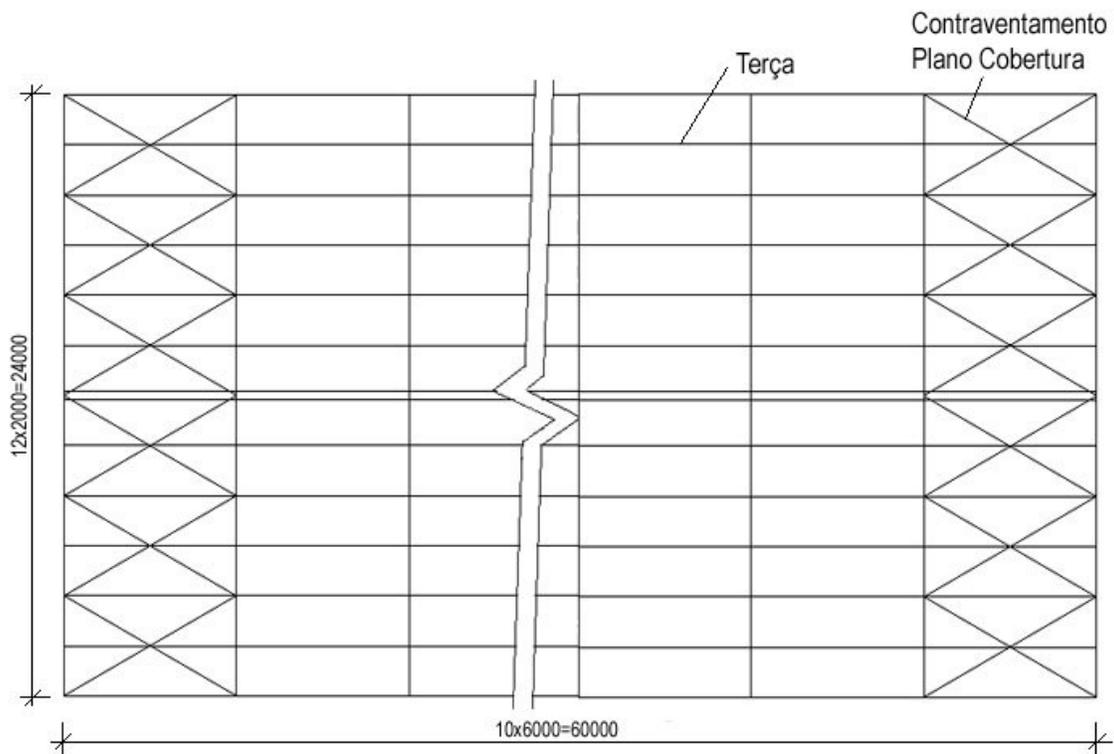


Figura 2.3 – Plano das terças

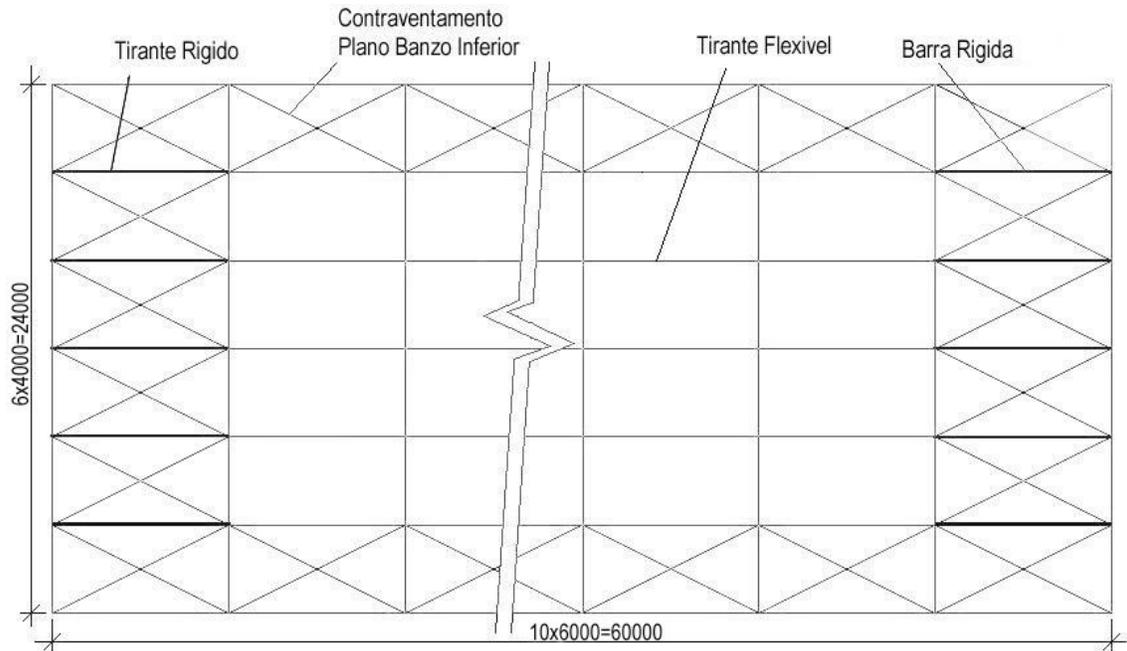


Figura 2.4 – Plano do banzo inferior da treliça do pórtico transversal

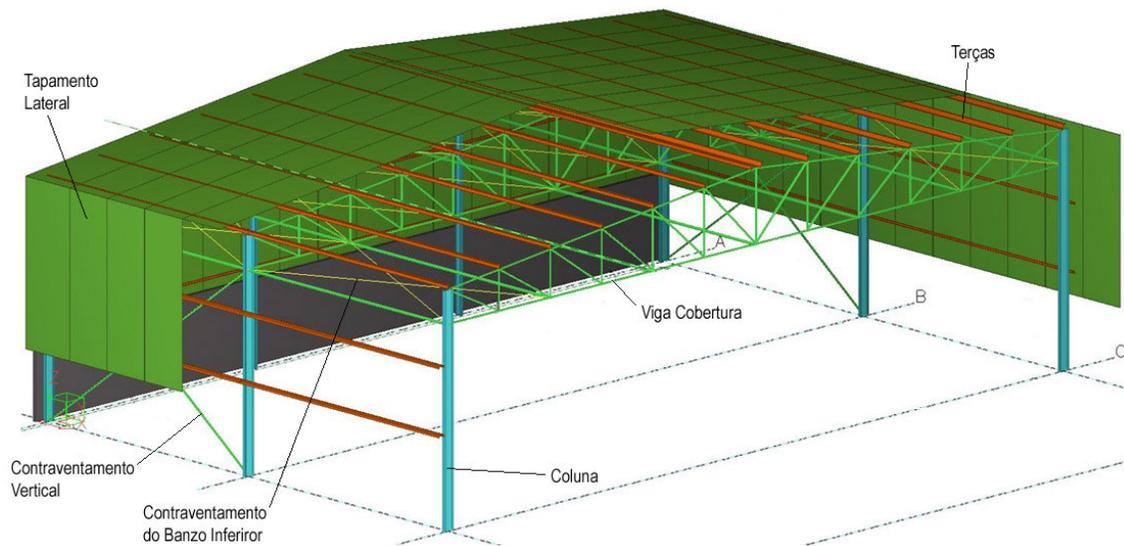


Figura 2.5 – Vista geral de um galpão industrial leve com pórtico treliçado

a) pórticos transversais (colunas e tesoura)

Constitui a estrutura principal que suporta as ações transversais que atuam na construção, transmitindo-as até as fundações. É constituído pelas colunas e pela viga de cobertura, também denominada tesoura, que pode ser de alma cheia ou treliçada, com seção constante ou variável.

b) cobertura e tapamento lateral

Tem por objetivo fechar a construção, protegendo o seu interior das intempéries. Usualmente, o fechamento da cobertura é feito com telhas metálicas (de aço ou de alumínio). Por outro lado, no tapamento lateral utilizam-se telhas metálicas ou alvenaria.

c) terças

São vigas situadas na cobertura, que têm por função principal apoiar as telhas da cobertura e transmitir as ações nelas impostas (sobrecargas, vento, etc) para as tesouras dos pórticos transversais. Geralmente, são constituídas por perfis metálicos conformados a frio ou laminados. Denominam-se escoras (do beiral ou da cobertura) as terças que além de suportarem as telhas, funcionam como montantes do contraventamento.

d) travessas ou longarinas

São vigas formadas por perfis conformados a frio ou laminados que tem por função apoiar o tapamento lateral, recebendo as cargas aplicadas nestes e transmitindo-as para as colunas.

e) tirantes

São elementos estruturais que trabalham essencialmente à tração e, em geral, são constituídos por barras redondas. Dentre as diversas utilizações dos tirantes nas estruturas metálicas, podem destacar aquelas onde este tipo de elemento é empregado com finalidade de reduzir o vão das terças e das travessas, ou ainda, colaborar como elemento resistente em um pórtico transversal.

f) barras rígidas

São barras solicitadas a esforços de compressão, formadas normalmente por cantoneiras simples ou duplas ou perfis laminados tipo I. Podem atuar como elementos de travamento do banzo inferior (Figura 2.4).

g) contraventamentos

São elementos que formam as estruturas de estabilização longitudinal dos galpões industriais. Geralmente, os contraventamentos de cobertura formam treliças dispostas no plano das terças, que juntamente com os contraventamentos laterais, absorvem as ações longitudinais que atuam na estrutura transmitindo-as para as fundações, garantindo assim a estabilidade longitudinal da construção. Normalmente, os contraventamentos utilizados em

galpões industriais são dispostos em forma de "X" e no seu dimensionamento despreza-se a resistência das diagonais comprimidas.

A escolha do tipo de pórtico transversal (em alma cheia ou treliçado), associado a outros parâmetros como a distância entre pórticos, define o arranjo estrutural de um galpão industrial. Este arranjo deve ser ajustado para se obter a estrutura que melhor atenda a um conjunto de aspectos do caso em análise, sem perder de vista a importância de se conseguir uma solução segura e econômica, levando-se em consideração o peso total da estrutura.

A distância entre pórticos transversais é geralmente condicionada pela finalidade do galpão. Não havendo restrições, escolhe-se o espaçamento que conduz à maior economia no custo global de terças e vigas de cobertura.

Espaçamentos menores entre pórticos transversais favorecem os elementos secundários de cobertura e tapamento (terças e travessas), reduzem as cargas em cada pórtico, mas aumentam o número de pórticos e, conseqüentemente, o número de bases e fundações. Espaçamentos maiores aumentam os elementos secundários da cobertura, mas, por outro lado, reduzem o número de pórticos e de fundações. Quando o espaçamento entre as colunas é muito grande, torna-se mais econômico o uso de vigas de cobertura intermediárias, apoiadas em vigas longitudinais nos beirais e, às vezes, também na cumeeira.

O banzo superior da treliça ou a mesa superior da viga de alma cheia que compõem a tesoura devem ser preferencialmente paralelos à cobertura. A inclinação da cobertura é função do material empregado para o cobrimento ou do efeito estético que se deseja obter, respeitada a declividade mínima permitida para o material utilizado.

De maneira mais ampla, a análise do arranjo estrutural deve ser feita considerando-se a interação entre os aspectos construtivos da estrutura como um todo e das fundações.

2.6. Pórticos Transversais

2.6.1. Sistemas Estruturais

Existem amplas possibilidades para composição dos sistemas estruturais dos pórticos transversais que compõem os galpões industriais leves de vãos simples. Uma variação importante se refere à viga de cobertura, que pode ser de alma cheia ou treliçada. Em função da tipologia da viga de cobertura podem-se adotar ligações rígidas ou flexíveis entre as

extremidades dessas vigas e os pilares que compõem o pórtico principal, proporcionando uma maior ou menor continuidade entre esses elementos estruturais. Outra variação comumente explorada consiste na alteração do vínculo das colunas com as bases, o que altera fundamentalmente os esforços transmitidos para as fundações e a deslocabilidade horizontal da estrutura.

Quando o terreno de fundação apresenta boa capacidade de suporte, o melhor sistema estático consiste no pórtico engastado nas bases (Figura 2.6), que permite uma melhor redistribuição de esforços na estrutura e um dimensionamento mais econômico, além de apresentar maior facilidade de montagem.

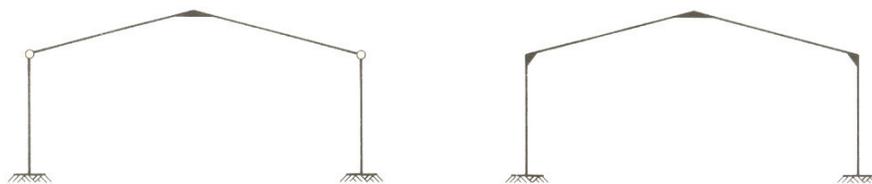


Figura 2.6 – Pórticos engastados na base

(a) viga de cobertura bi-rotulada, (b) viga de cobertura rigidamente ligada às colunas

Os pórticos rotulados nas bases (Figura 2.7) levam à obtenção de fundações mais econômicas se comparados ao caso dos pórticos engastados na base, favorecendo a implantação dessas estruturas em terrenos de baixa capacidade de suporte. Por outro lado, a adoção de rótulas nas bases faz com que os esforços na estrutura sejam de maior magnitude do que no caso de bases engastadas e que a estrutura apresente maior deslocamento horizontal.



Figura 2.7 – Pórtico rotulado na base

Quando o vão livre do pórtico é muito grande, torna-se econômica a utilização de viga de cobertura com tirante (Figura 2.8). Com a colocação de tirantes, os deslocamentos horizontais e os momentos nas colunas são reduzidos. São indicados para inclinações maiores que 15° . No entanto, em determinados casos os tirantes podem ser um obstáculo indesejável.



Figura 2.8 – Pórtico atirantado

2.6.2. Pórticos de Alma Cheia

Um pórtico transversal de alma cheia é formado pelas colunas e viga de cobertura em alma cheia. As principais vantagens das vigas de cobertura de alma cheia são: o aspecto estético, a pequena altura do elemento estrutural, a facilidade de limpeza, pintura e conservação. Na Figura 2.9 apresenta-se um esquema típico de um galpão em pórtico de alma cheia.

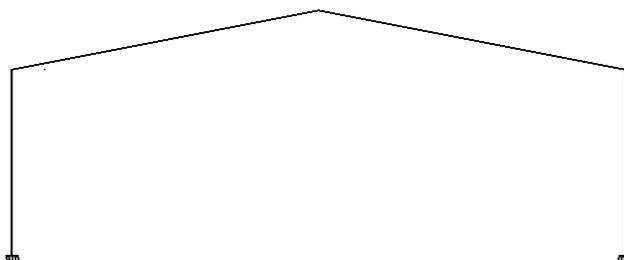


Figura 2.9 – Pórtico de alma cheia

O galpão constituído por pórtico transversal de alma cheia é o sistema estrutural que apresenta a melhor eficiência no processo de fabricação, pois possui um número reduzido de elementos e ligações, conduzindo a um tempo de fabricação inferior ao dos sistemas treliçados. Além disso, o pórtico transversal de alma cheia apresenta boa eficiência no processo de montagem por ter um reduzido número de peças e ligações, o que leva a um canteiro de obras mais organizado e a um tempo de montagem menor.

No projeto de vigas de cobertura em alma cheia geralmente utilizam-se perfis laminados ou soldados de inércia constante ao longo de todo o vão. O menor peso de uma viga de cobertura de alma cheia é conseguida com a adoção de perfis de inércia variável.

A utilização de vigas de cobertura de alma cheia no Brasil era limitada até poucos anos atrás, devido à falta de perfis de alma cheia de pequenas dimensões e boa relação inércia/peso. Esta limitação foi amplamente superada com a atual disponibilidade de perfis laminados e soldados de pequenas dimensões no mercado brasileiro. No entanto, em alguns casos continua a haver dificuldades em obter bitolas.

2.6.3. Pórticos Treliçados

Um pórtico transversal treliçado é formado pelas colunas e viga de cobertura treliçada. As principais vantagens das vigas de cobertura treliçadas são: a eficiência estrutural, as amplas possibilidades de composição das treliças e a simplicidade dos equipamentos necessários para a fabricação.

As vigas de cobertura treliçadas podem ou não ter continuidade com as colunas do pórtico. Esta continuidade está intimamente relacionada à tipologia da viga treliçada e ao tipo de ligação das vigas com os pilares.

A - Pórtico com treliça triangular (TT)

As treliças triangulares (Figura 2.10) são utilizadas para pequenos vãos. Devido ao pequeno ângulo formado junto aos apoios, apresentam grandes esforços nas barras do banzo superior próximo a esses pontos, além de levar à adoção de detalhes construtivos desfavoráveis.

A ligação das extremidades da treliça com a coluna é naturalmente rotulada devido ao afunilamento produzido pelo arranjo das barras, o que faz com que a viga esteja biapoiada sobre as colunas. Portanto, a viga treliçada triangular é responsável por suportar sozinha todas as ações provenientes da cobertura e não contribui para o enrijecimento do pórtico transversal, o que reduz significativamente a eficiência estrutural.

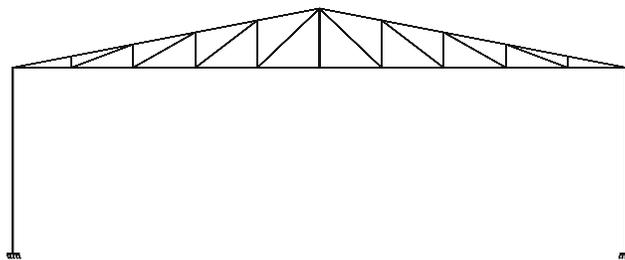


Figura 2.10 – Pórtico com treliça triangular

B - Pórtico com treliça em arco (TA)

Uma cobertura em curva pode ser projetada em arco conectado às colunas (Figura 2.11) ou em arco vencendo todo o vão, sem colunas. Os sistemas estruturais mais empregados no caso de arco conectado às colunas são o arco contínuo com as colunas e o arco simplesmente apoiados sobre as colunas.

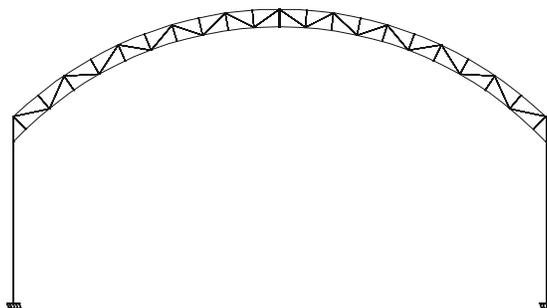


Figura 2.11 – Pórtico com treliça em arco

O arco atirantado é muito econômico quando os carregamentos verticais na direção da gravidade são predominantes. No entanto, deve-se sempre verificar o comportamento da estrutura para os casos onde ocorrem inversão do carregamento, visto que nestes casos o arco tende a se fechar e o tirante não mais terá função estrutural. Nesses casos o tirante deverá ser desconsiderado na análise.

Normalmente, a treliça em arco apresenta banzos paralelos, fazendo com que as diagonais e montantes sejam do mesmo comprimento.

O processo de fabricação dos pórticos com treliça em arco é mais trabalhoso que nos casos de treliças de duas águas, visto que é necessário fazer um gabarito para dar a forma de arco para os banzos que compõem a treliça, aumentando o tempo de fabricação. Uma outra opção é usar uma calandra para modelar o perfil, apesar de ainda não ser um equipamento corriqueiro nas fábricas de estruturas metálicas de pequeno e médio porte no Brasil.

Quando submetida a ações verticais, a treliça em arco introduz esforços horizontais significativos no topo das colunas, o que geralmente requer a utilização de perfis mais pesados nas colunas para se garantir que os limites de deslocamento horizontal sejam atendidos.

C - Pórtico com treliça de banzos paralelos (BP)

As treliças de banzos paralelos (Figura 2.12) apresentam diagonais e montantes de mesmo comprimento, o que permite padronizar os elementos estruturais e proporciona uma grande racionalização do processo de fabricação.

Esse sistema apresenta um desempenho estrutural parecido com o pórtico treliçado em arco, visto que também introduz esforços horizontais significativos no topo das colunas.

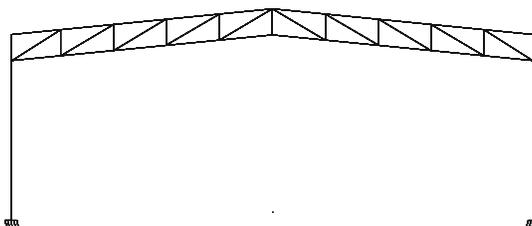


Figura 2.12 – Pórtico com treliça de banzos paralelos

D - Pórtico com treliça trapezoidal (TP)

As treliças trapezoidais (Figura 2.13) apresentam bom desempenho estrutural visto que podem ser conectadas de forma contínua com as colunas do pórtico. A ligação da extremidade da treliça com a coluna forma um binário que garante um determinado grau de rigidez entre a viga de cobertura e a coluna do pórtico transversal. Essa continuidade proporciona uma redistribuição de esforços entre a viga e a coluna, melhorando o desempenho do sistema estrutural.

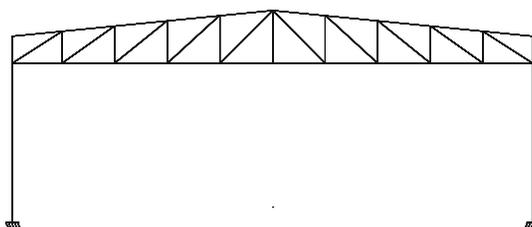


Figura 2.13 – Pórtico com treliça trapezoidal

2.7. Estruturas de Estabilização Longitudinal

No projeto de um galpão industrial leve é necessário adotar medidas que garantam a estabilidade espacial da estrutura. A estabilidade no sentido transversal do edifício é garantida pela existência de pórticos planos transversais. Normalmente, a estabilidade fora do plano da estrutura principal (pórtico transversal), ou seja, na direção longitudinal do galpão, é conseguida com a utilização de estruturas de estabilização longitudinal.

No caso de galpões industriais leves, geralmente se utilizam contraventamentos horizontais (dispostos no plano da cobertura) e verticais (dispostos nas laterais do edifício) para se conseguir a estabilização longitudinal da estrutura.

As forças resultantes da ação do vento nas fachadas laterais e outras forças horizontais transversais são transferidas às fundações pelos pórticos transversais. As forças horizontais longitudinais, resultantes da ação do vento e de pontes rolantes são transferidas às fundações através do sistema formado pelos contraventamentos horizontais e verticais. Além de servirem de apoio para as telhas de cobertura, as terças dispostas na região do contraventamento também compõem esse sistema de estabilização, formando uma grande treliça horizontal na cobertura.

O contraventamento em “X” é normalmente o mais comum e mais econômico. No entanto, existem diversas formas de se compor um contraventamento, atendendo às necessidades impostas nos diversos projetos, como, por exemplo, as aberturas nas fachadas laterais.

O contraventamento horizontal situado no plano da cobertura também desempenha um outro papel fundamental na estabilização da estrutura. O sistema de contraventamento torna os pontos de apoio das terças nos pórticos transversais indeslocáveis, reduzindo o comprimento de flambagem do banzo superior da viga de cobertura.

Para 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.

2.8. Parâmetros para Avaliação do Sistema Estrutural

A comparação entre sistemas estruturais pode ser feita com base em aspectos estéticos, comerciais, de limitação do terreno de fundação, de cumprimento de prazos de execução, etc. Entretanto, o aspecto que geralmente exerce maior influência na escolha de um sistema estrutural de um galpão industrial é a taxa de consumo de aço da estrutura. Ou seja, a taxa de consumo de aço é normalmente o parâmetro mais utilizado para estimar, ou mesmo avaliar, a eficiência 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 para galpões. Na Figura 2.14, apresenta-se o gráfico para determinação do consumo de aço de galpões leves comuns, com ou sem pontes rolantes, com capacidade inferior a 50 KN. A taxa de consumo de aço (K_2) em kg/m^2 de área coberta, em função do vão “s”, em metros, é dada pela expressão indicada na Figura 2.14. Nesta taxa incluem-se todos os elementos que compõem a estrutura metálica do galpão.

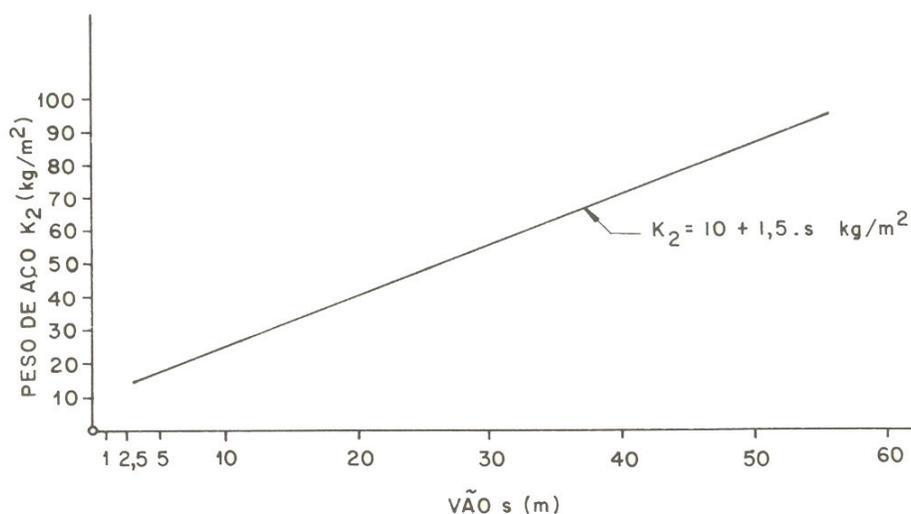


Figura 2.14 – Taxa de consumo de aço para galpão leves comuns (MIC/STI, 1986)

Na Figura 2.15, apresenta-se o gráfico que permite estimar a taxa de consumo de aço de galpões médios. Segundo o MIC/STI (1986), os galpões médios abrangem todos os galpões comuns, excluídos os tipos “shed”, dotados de pontes com capacidade variáveis de 50 a 600 KN. A taxa de consumo de aço (K_3) em kg/m^2 de área coberta, em função do vão “s”,

em metros, é dada pela expressão indicada na Figura 2.15. A taxa K_3 também considera todos os elementos que compõem a estrutura metálica do galpão.

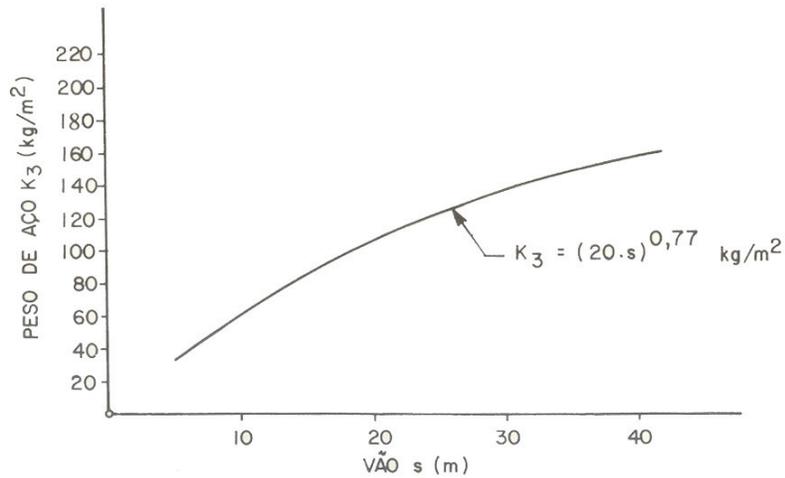


Figura 2.15 – Taxa de consumo de aço para galpão médios (MIC/STI, 1986)

Segundo o MIC/STI (1986), as taxas calculadas com base nas Figuras 2.14 e 2.15 deverão ser utilizadas apenas como referência por terem sido estimadas com base em estruturas construídas na Europa no período de 1950 a 1965. Esse período é conhecido como sendo um período transição para construção metálica, quando em 1960 foi introduzido o aço ASTM-A36.

D'ALAMBERT (2004) apresenta gráficos que permitem estimar a taxa de consumo de aço para galpões constituídos por pórticos de alma cheia. Na figura 2.16, apresenta-se o gráfico para determinação da taxa de consumo de aço para um galpão em pórtico de alma cheia com pé direito $H = 6\text{m}$ e distância entre pórticos $B = 6\text{m}$.

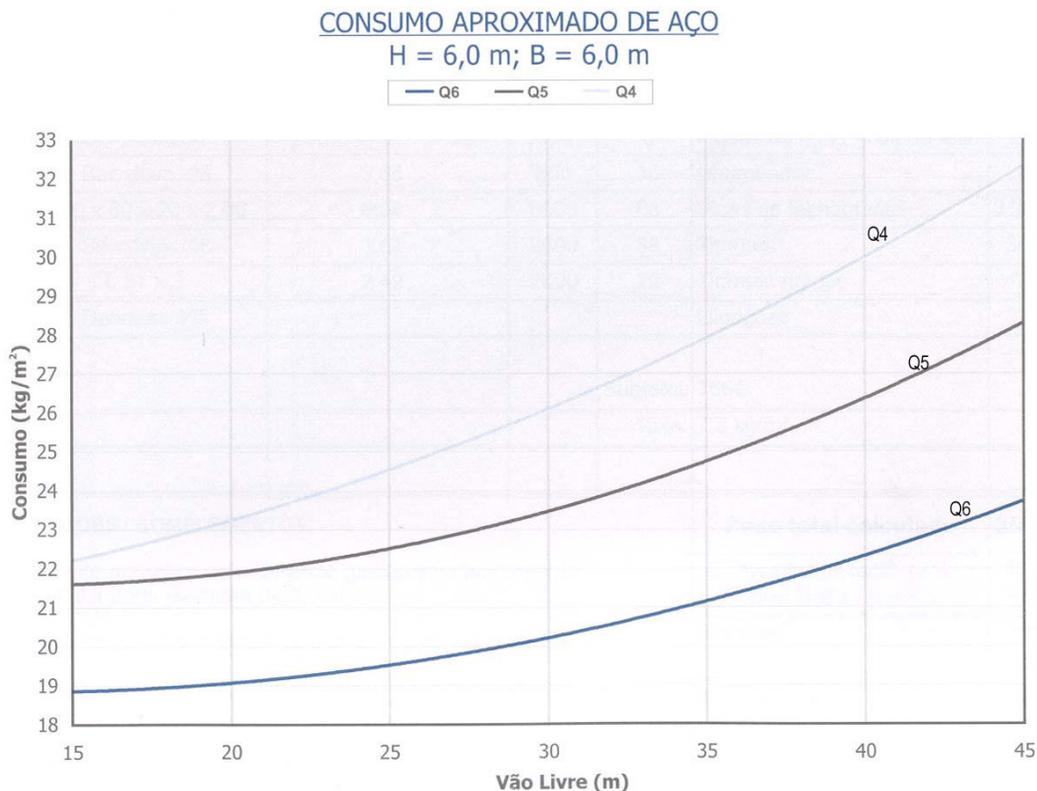


Figura 2.16 – Consumo de Aço em kg/m^2 para galpão em pórtico em alma cheia (D'ALAMBERT, 2004)

De acordo com o estudo realizado por D'ALAMBERT (2004) os parâmetros Q4, Q5 e Q6 indicam o estágio de ações considerado. Cada estágio corresponde a uma velocidade de vento associada a distancia entre pórticos transversais, conforme indicado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição dos estágios de ações (D'ALAMBERT, 2004)

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

Segundo o MIC/STI (1986), o desenvolvimento tecnológico influencia decisivamente a taxa de consumo de aço para um galpão industrial. Normalmente, uma estrutura construída há algum tempo apresenta uma taxa consumo de aço maior do que estruturas construídas nos tempos atuais. A própria melhoria da qualidade do aço contribui significativamente para a redução da taxa de consumo de aço nas estruturas atuais. Ainda assim, o consumo de aço em uma estrutura não é apenas função da tecnologia da época, dependendo também das relações entre custo de matéria prima e custo de mão de obra. À medida que aumenta o custo da mão de obra, a tendência é se utilizar detalhes construtivos mais simples, mesmo que isso acarrete um maior consumo de aço.

BASES DO ESTUDO PARAMÉTRICO

3.1. Considerações Preliminares

Tendo em vista o objetivo de avaliar o desempenho de algumas soluções estruturais para galpões industriais leves, decidiu-se realizar um estudo paramétrico considerando-se os sistemas estruturais utilizados com maior frequência nesses edifícios. Este estudo deverá permitir uma comparação da taxa de consumo de aço e da resposta estrutural dos diversos modelos analisados.

No universo dos galpões industriais leves, existe uma ampla gama de características que podem ser variadas com objetivo de avaliar as soluções estruturais. No entanto, considerando que para obtenção da taxa de consumo de aço para cada modelo é necessário realizar todas as etapas de um projeto estrutural (avaliação de ações, análise e dimensionamento), torna-se necessário limitar o número de casos analisados.

Este Capítulo é dedicado à apresentação das bases adotadas para desenvolvimento do estudo paramétrico deste trabalho. Para isso apresentam-se os pórticos transversais considerados neste estudo, com a definição dos critérios que orientaram a concepção dos mesmos.

3.2. Critérios de Parametrização

O estudo paramétrico de galpões industriais leves pode abranger a variação de diversas características que influenciam a resposta da estrutura, como:

- tipologia do pórtico transversal;
- vão livre do pórtico transversal;
- inclinação da cobertura;
- altura da coluna;
- tipo de vinculação;
- distância entre pórticos transversais;
- relação entre altura no meio do vão (flecha) e vão livre do pórtico transversal;
- variação da magnitude das cargas.

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.

Para o estudo paramétrico deste trabalho optou-se por avaliar, exclusivamente, a influência das seguintes variáveis:

- tipologia do pórtico transversal;
- vão livre do pórtico transversal.

Para as demais características de projeto adotam-se valores normalmente encontrados em galpões industriais leves:

- distância entre pórticos transversais - 6 metros
- inclinação - 10%
- altura da coluna - 6 metros
- comprimento total do galpão - 60 metros

Tendo em vista o objetivo de avaliar a influência da solução estrutural para galpões industriais leves e considerando que a estrutura desses edifícios é marcada pela repetição de pórticos planos transversais, o estudo paramétrico deste trabalho se centra na avaliação estrutural desses pórticos principais.

Uma vez que a distância entre pórticos e a magnitude dos carregamentos é a mesma em todos modelos do estudo, considera-se que os elementos estruturais secundários como terças, travessas, contraventamentos, dentro outros, são os mesmos em todos os casos, não exercendo influência na taxa de consumo de aço para as distintas tipologias.

Para desenvolvimento deste estudo, adotam-se cinco tipologias distintas para o pórtico transversal e cinco vãos livres diferentes, variando de 16 a 32 metros, conforme se mostra na Figura 3.1. As tipologias consideradas 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

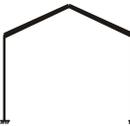
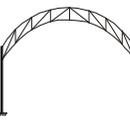
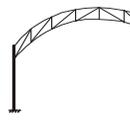
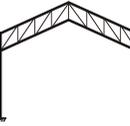
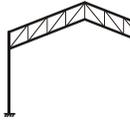
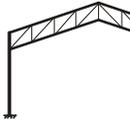
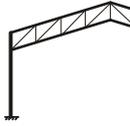
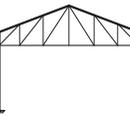
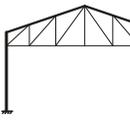
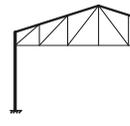
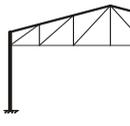
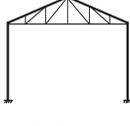
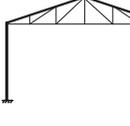
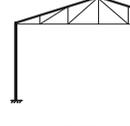
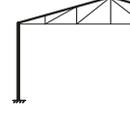
	16 m	20 m	24 m	28 m	32 m
AC	 AC-16	 AC-20	 AC-24	 AC-28	 AC-32
TA	 TA-16	 TA-20	 TA-24	 TA-38	 TA-32
BP	 BP-16	 BP-20	 BP-24	 BP28	 BP32
TP	 TP-16	 TP-20	 TP-24	 TP-28	 TP-32
TT	 TT-16	 TT-20	 TT-24	 TT-28	 TT-32

Figura 3.1 – Tipologias de pórtico transversal consideradas no estudo paramétrico

Para definição das dimensões dos modelos que compõem o estudo paramétrico, toma-se como referência uma inclinação de 10% para as vigas de cobertura, o que é usual para o caso de telhas metálicas.

Para o pórtico de alma cheia (AC), a inclinação de 10% leva a 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). Com esta medida pretende-se manter próximas as inércias equivalentes das seções transversais no meio do vão dos diferentes tipos de pórticos.

No caso da treliça triangular (TT), preserva-se a relação de $L/10$ para a flecha do meio do vão, o que leva a uma inclinação de 20% para a cobertura. A manutenção da inclinação de 10% para esse caso levaria ao surgimento de esforços muito elevados nas extremidades da viga de cobertura, devido ao afunilamento produzido pelo arranjo das barras da treliça, 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 em torno de $1/6$ a $1/5$, conforme recomendação de SALES et. al. (1994). Portanto, para esses modelos define-se uma relação de $L/5$ para a flecha no meio do vão.

Nas Figuras 3.2 a 3.6 apresenta-se uma sobreposição das tipologias de pórticos transversais e suas respectivas variações adotadas neste estudo paramétrico.

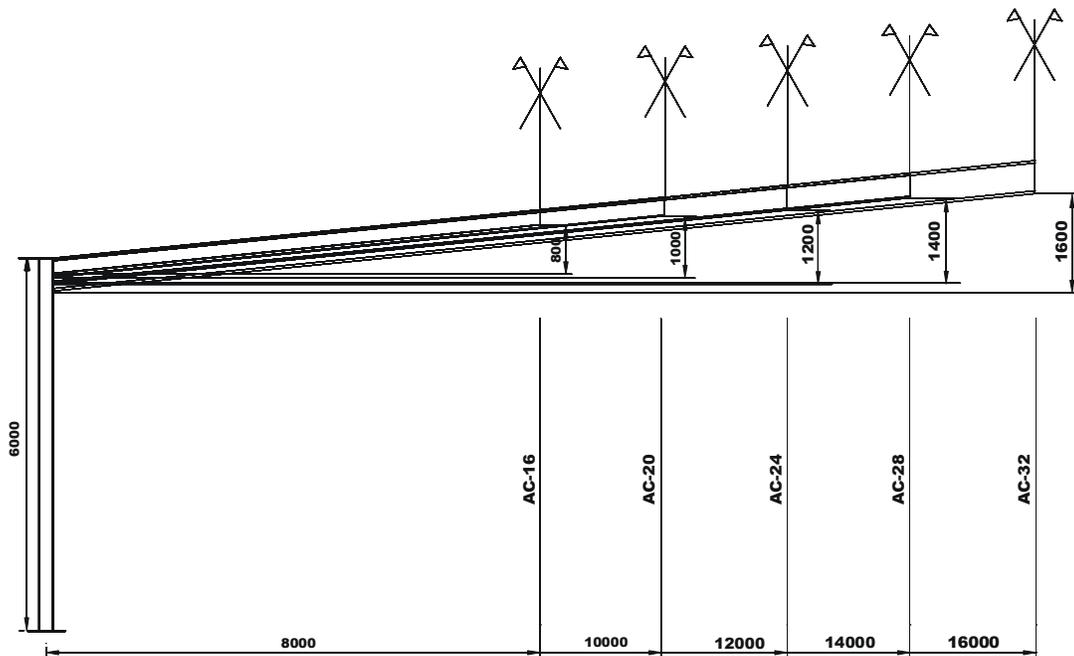


Figura 3.2 – Sobreposição das tipologias de pórticos de alma cheia (AC) (dimensões em milímetros)

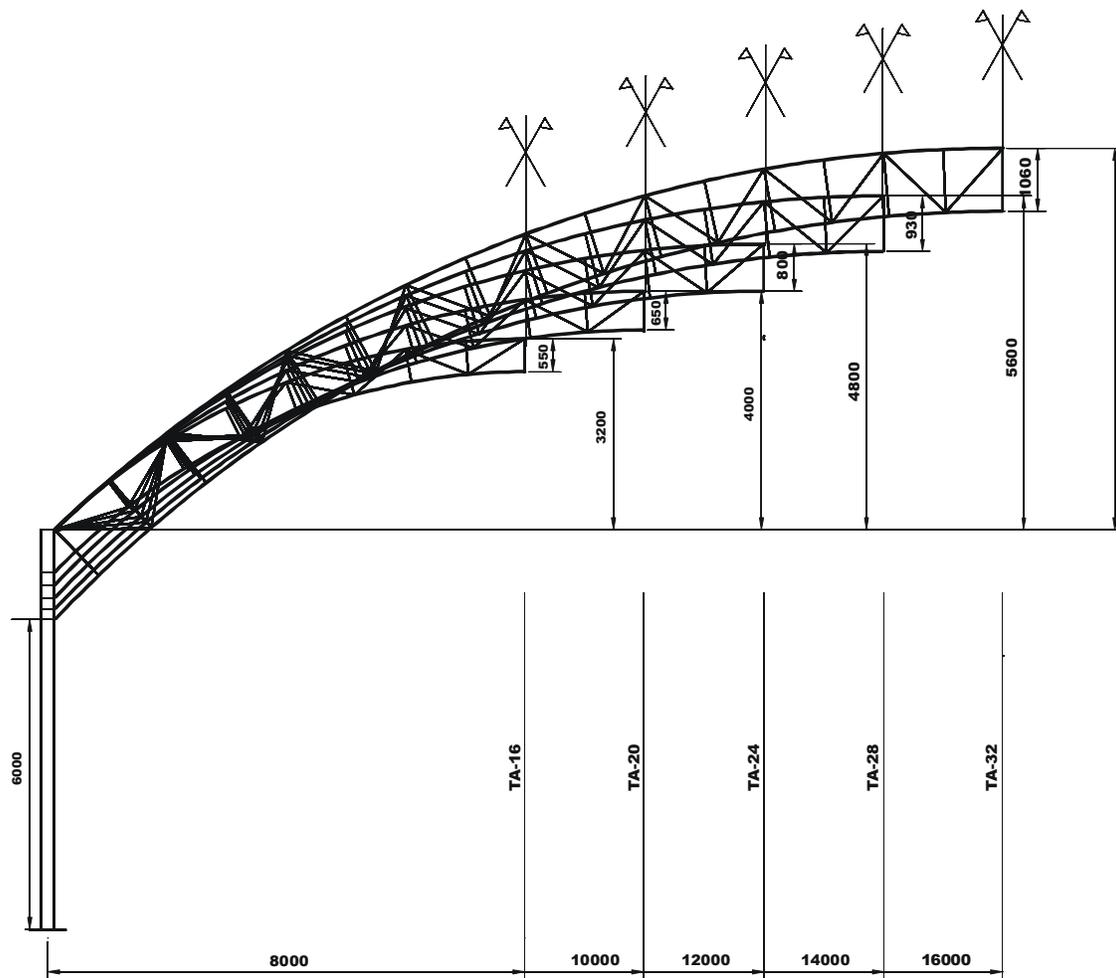


Figura 3.3 - Sobreposição das tipologias de pórticos com treliça em arco (TA)
(dimensões em milímetros)

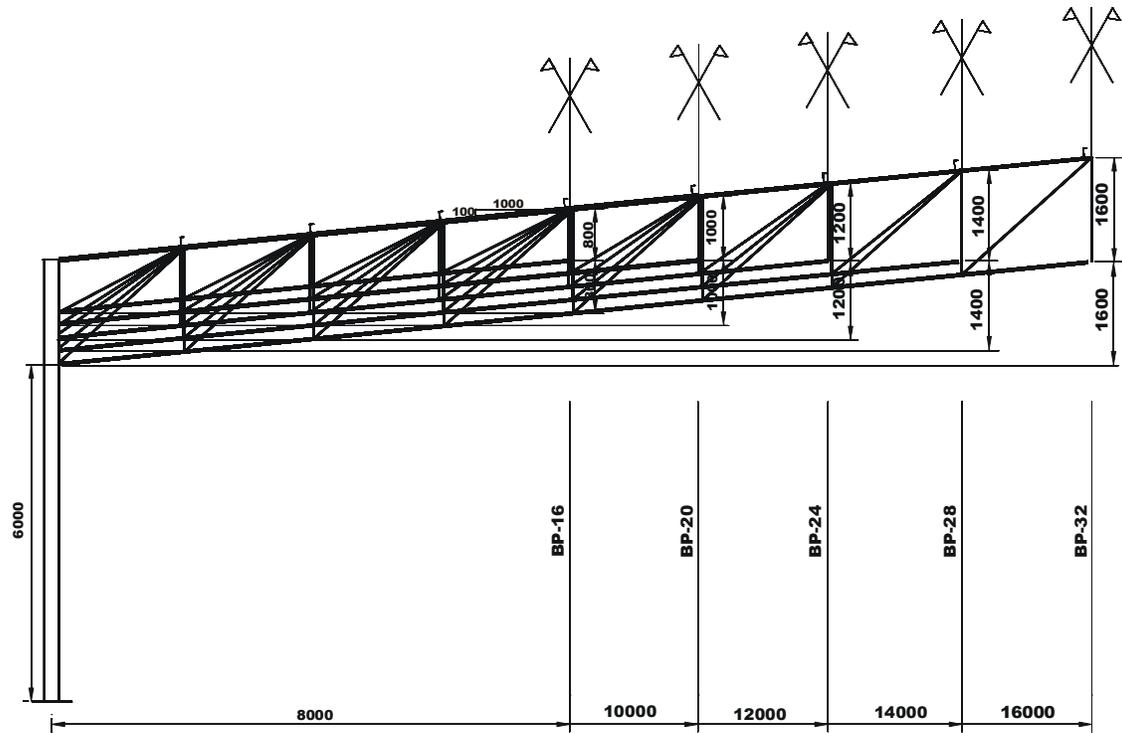


Figura 3.4 - Sobreposição das tipologias de pórticos com treliça de banzos paralelos (BP) (dimensões em milímetros)

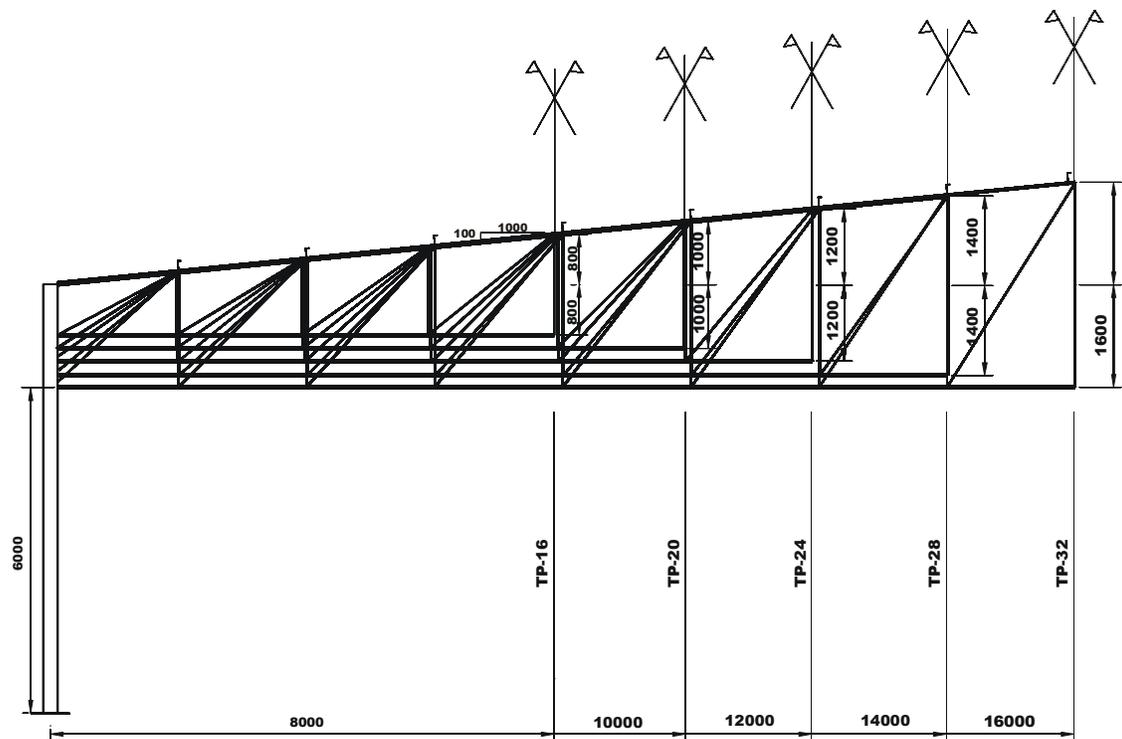


Figura 3.5 - Sobreposição das tipologias de pórticos com treliça trapezoidal (TP) (dimensões em milímetros)

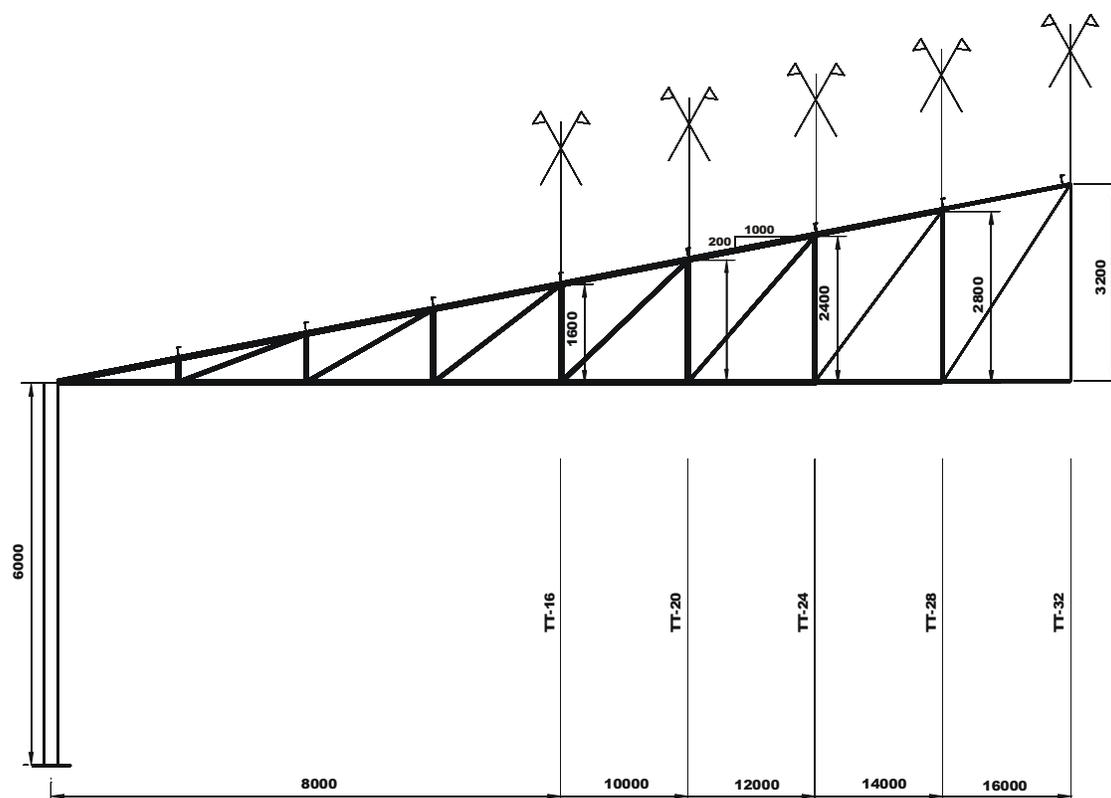


Figura 3.6 - Sobreposição das tipologias de pórticos com treliça triangular (TT) (dimensões em milímetros)

3.3. Definição dos Modelos

Tendo em vista os critérios de parametrização dos pórticos transversais apresentados anteriormente, neste item se definem as características geométricas de cada modelo.

3.3.1. Pórticos de Alma Cheia

Na Figura 3.7 apresenta-se um esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos de alma cheia. 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 engastadas na base (Figura 3.8).

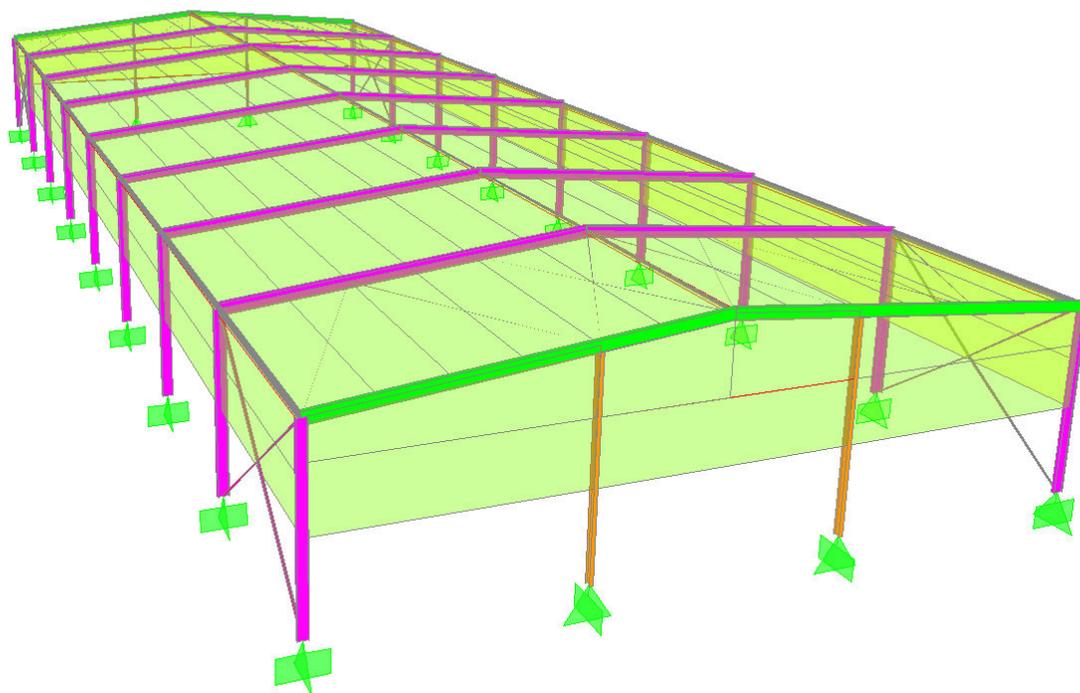


Figura 3.7 – Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos de alma cheia

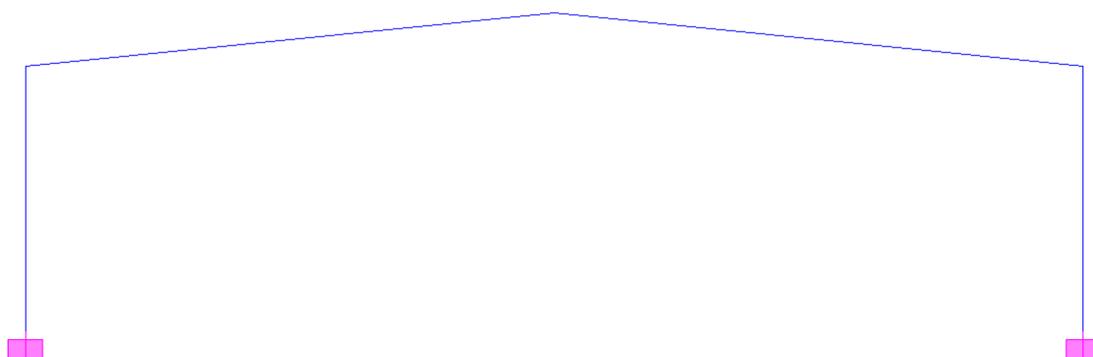


Figura 3.8 – Sistema estrutural dos pórticos de alma cheia

Nas Figuras 3.9 a 3.13 apresentam-se os cinco modelos de pórtico de alma cheia considerados neste estudo paramétrico, cujos vãos livres variam de 16 a 32 metros, com incrementos de 4 metros.

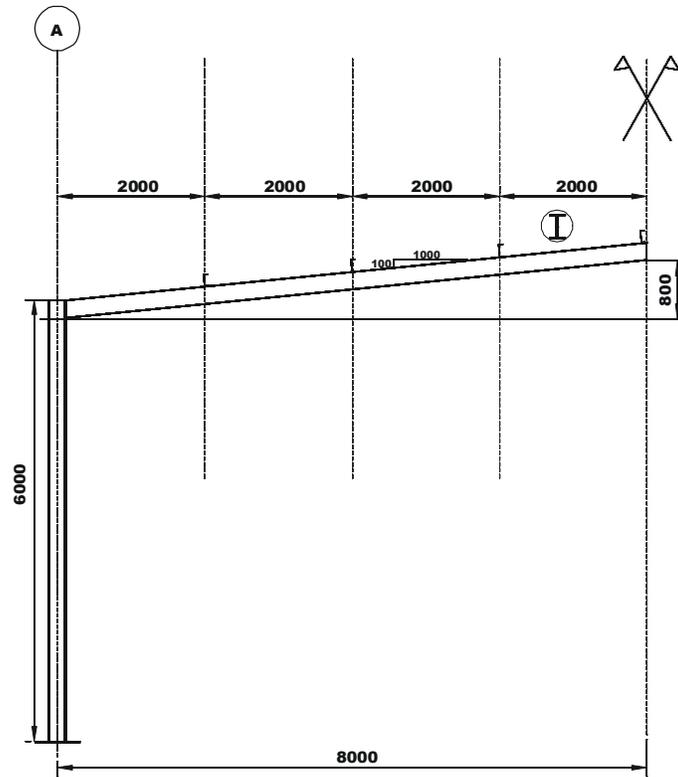


Figura 3.9 – Pórtico de alma cheia com vão livre de 16 metros (dimensões em milímetros)

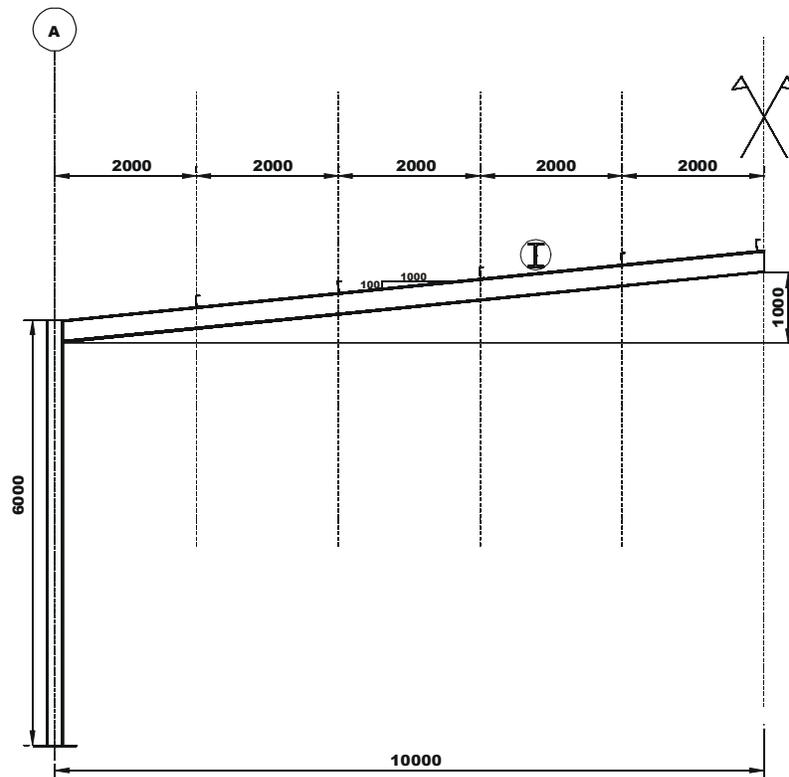


Figura 3.10 - Pórtico de alma cheia com vão livre de 20 metros (dimensões em milímetros)

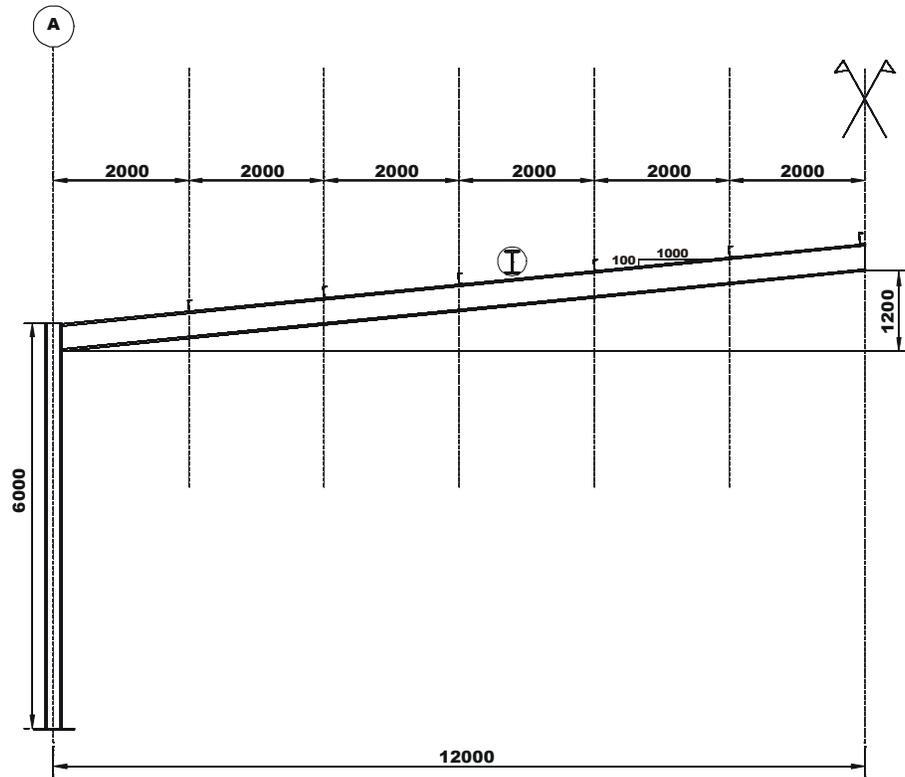


Figura 3.11 - Pórtico de alma cheia com vão livre de 24 metros (dimensões em milímetros)

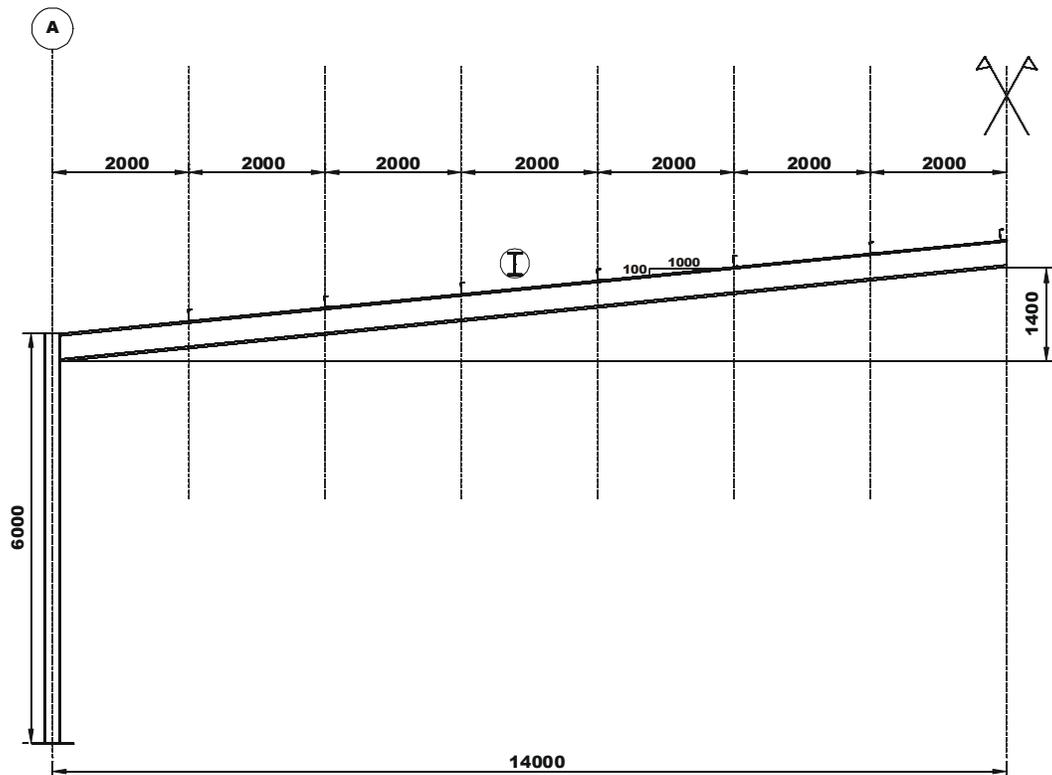


Figura 3.12 - Pórtico de alma cheia com vão livre de 28 metros (dimensões em milímetros)

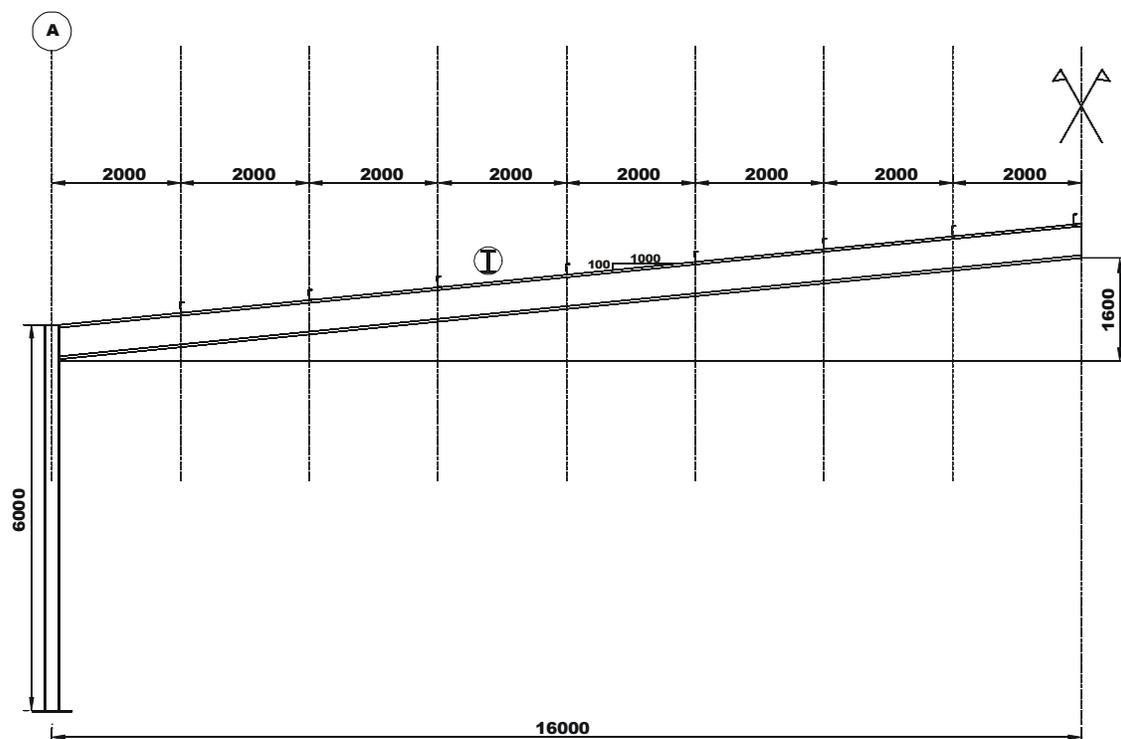


Figura 3.13 - Pórtico de alma cheia com vão livre de 32 metros (dimensões em milímetros)

3.3.2. Pórticos com Treliça em Arco

Na Figura 3.14 mostra-se um esquema de galpão industrial formado por pórtico com treliça em arco. 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 engastadas na base. Por outro lado, as diagonais e os montantes da treliça são rotulados nas suas extremidades (Figura 3.15).

Segundo SALES et. al. (1994), nos arcos metálicos a relação entre a altura entre banzos e o vão livre entre colunas varia em torno de $1/40$ a $1/30$. Neste trabalho adota-se uma relação de $L/30$ para a distância entre banzos.

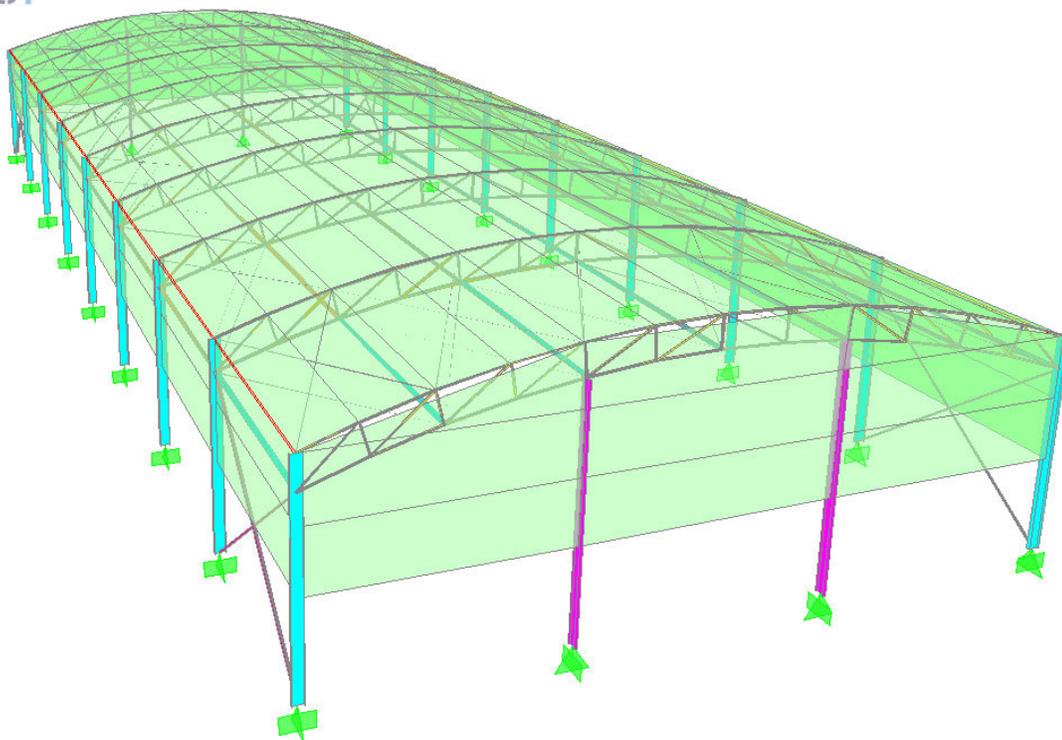


Figura 3.14 – Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça em arco

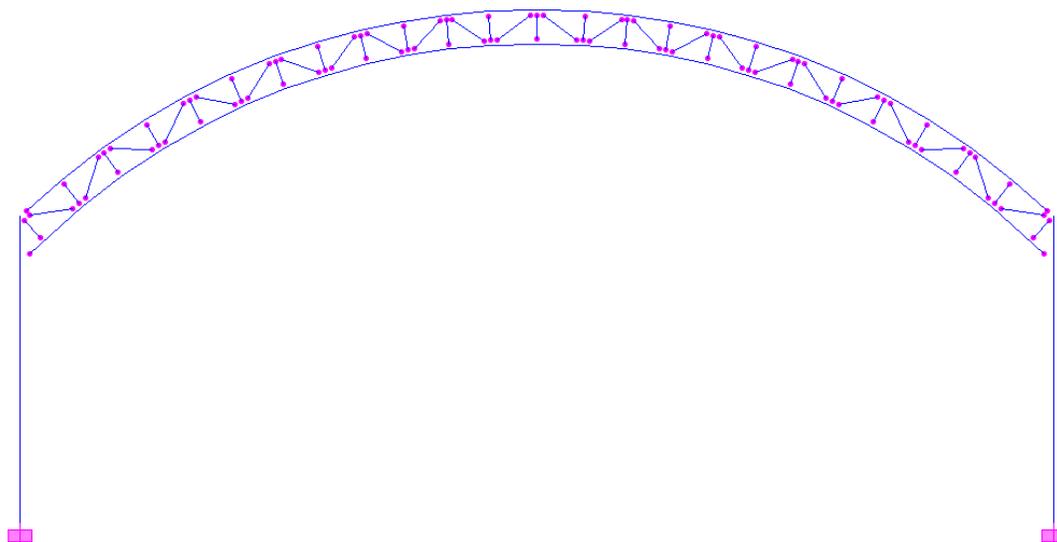


Figura 3.15 – Sistema estrutural do pórtico treliçado em arco

Nas Figuras 3.16 a 3.21 apresentam-se os cinco modelos de pórtico com treliça em arco considerados neste estudo paramétrico, cujos vãos livres variam de 16 a 32 metros, com incrementos de 4 metros.

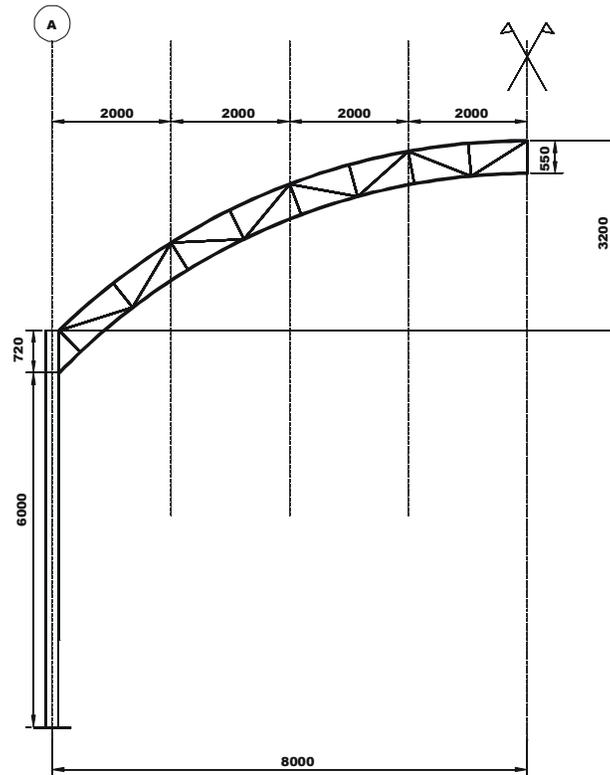


Figura 3.16 - Pórtico com treliça em arco com vão livre de 16 metros (dimensões em milímetros)

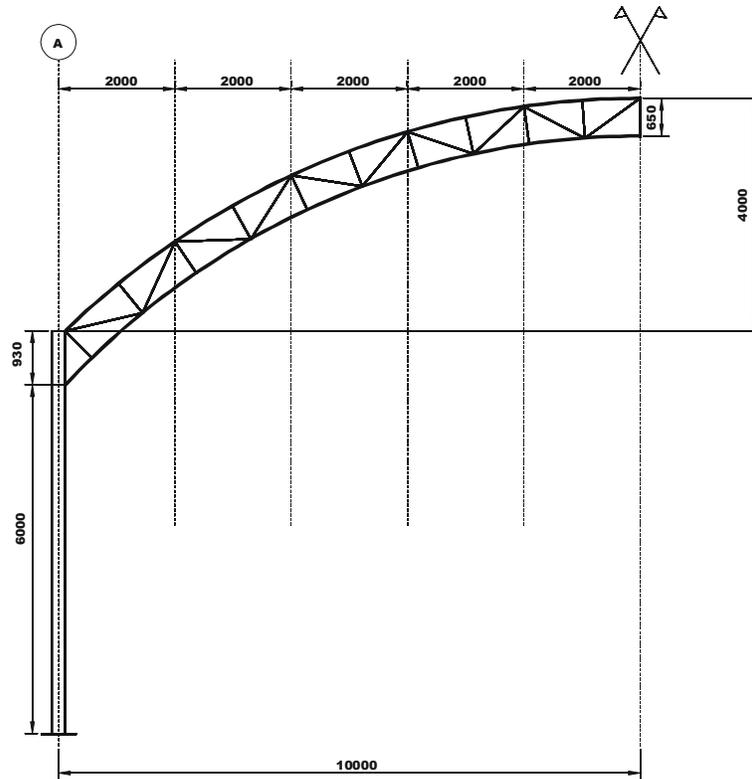


Figura 3.17 - Pórtico com treliça em arco com vão livre de 20 metros (dimensões em milímetros)

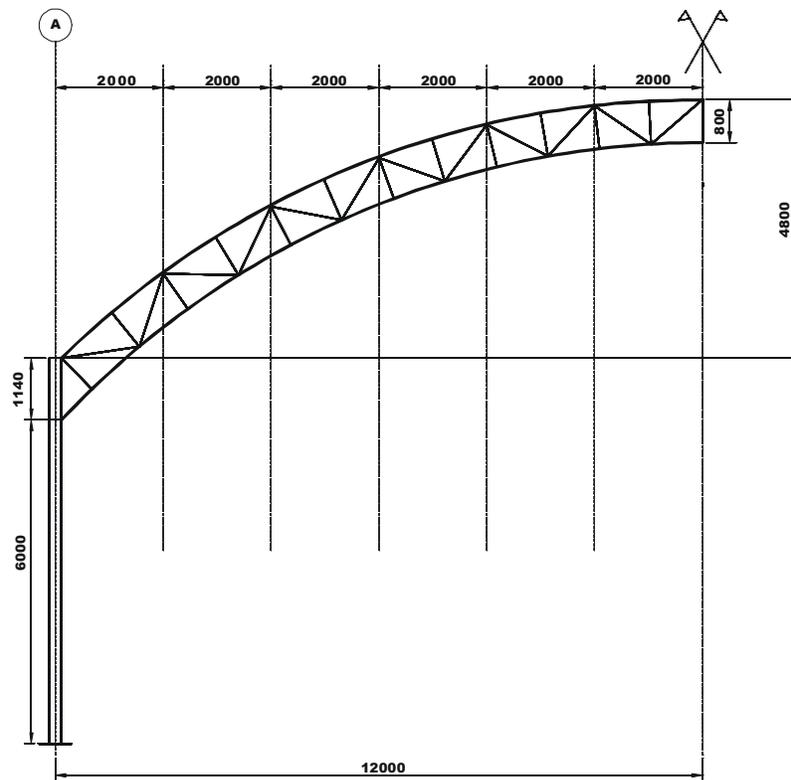


Figura 3.18 - Pórtico com treliça em arco com vão livre de 24 metros (dimensões em milímetros)

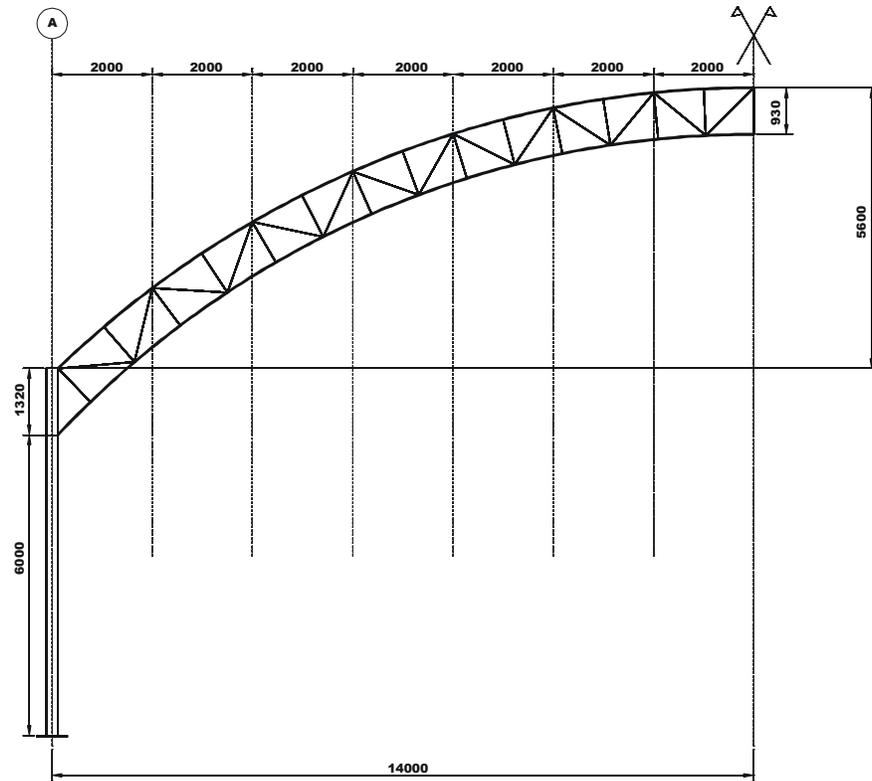


Figura 3.19 - Pórtico com treliça em arco com vão livre de 28 metros (dimensões em milímetros)

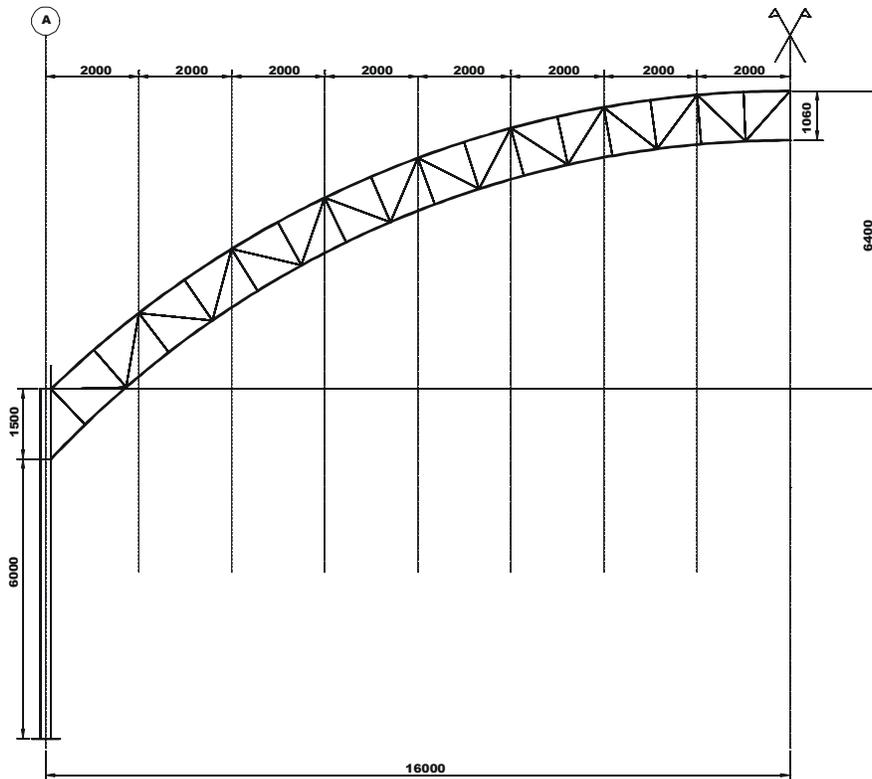


Figura 3.20 - Pórtico com treliça em arco com vão livre de 32 metros (dimensões em milímetros)

3.3.3. Pórticos com Treliça de Banzos Paralelos

Um esquema típico de um pórtico com treliça de banzos paralelos é indicado na Figura 3.21. Na Figura 3.22 apresenta-se o sistema estrutural para o pórtico com treliça de banzos paralelos. As colunas são engastadas 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.

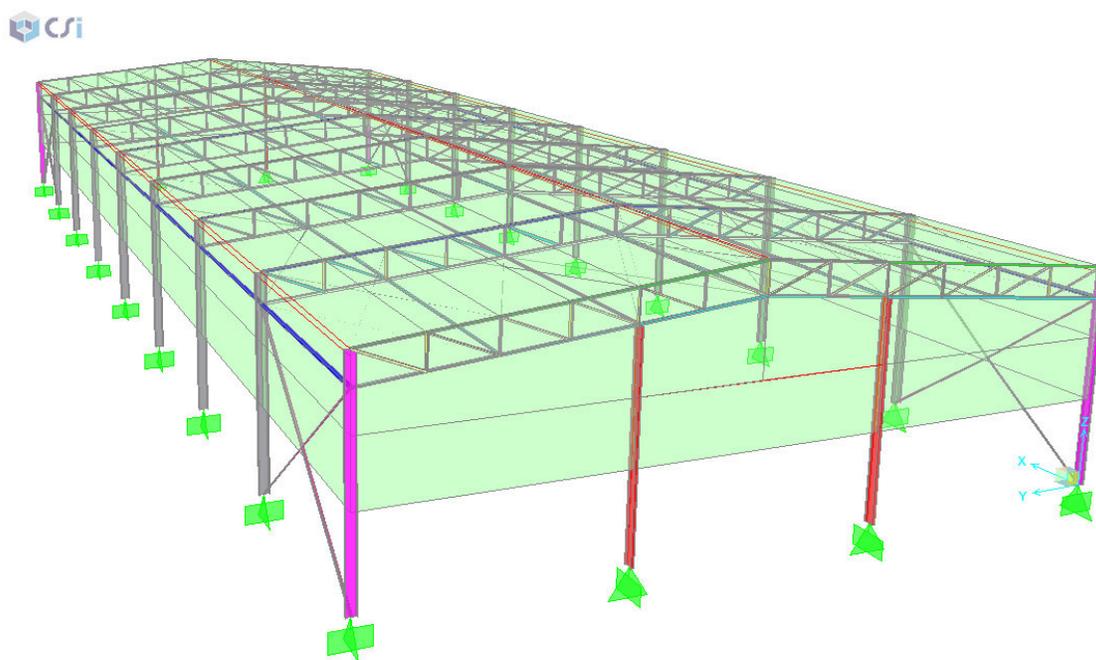


Figura 3.21 – Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça de banzos paralelos

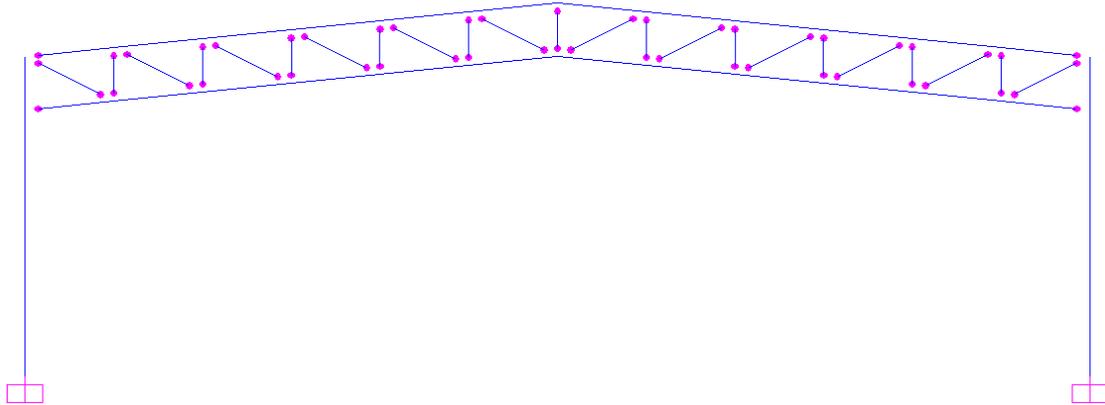


Figura 3.22 – Sistema estrutural do pórtico com treliça de banzos paralelos

Nas Figuras 3.23 a 3.27 apresentam-se os modelos de pórticos com treliça de banzos paralelos considerados neste estudo paramétrico, mantendo-se a mesma variação de vãos utilizada nos estudos anteriores (16 a 32 metros, com incrementos de 4 metros).

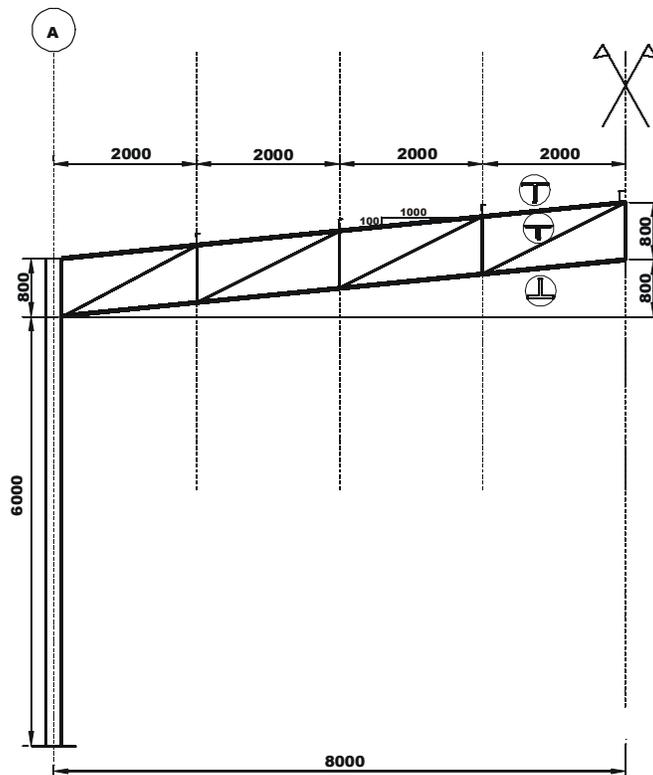


Figura 3.23 – Pórtico com treliça de banzos paralelos com vão livre de 16 metros (dimensões em milímetros)

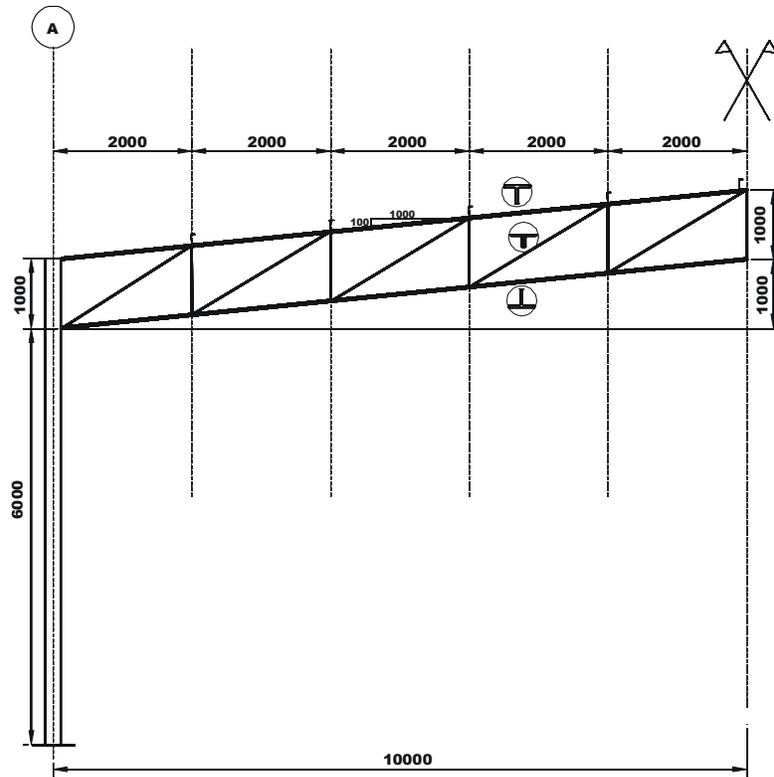


Figura 3.24 – Pórtico com treliça de banzos paralelos com vão livre de 20 metros (dimensões em milímetros)

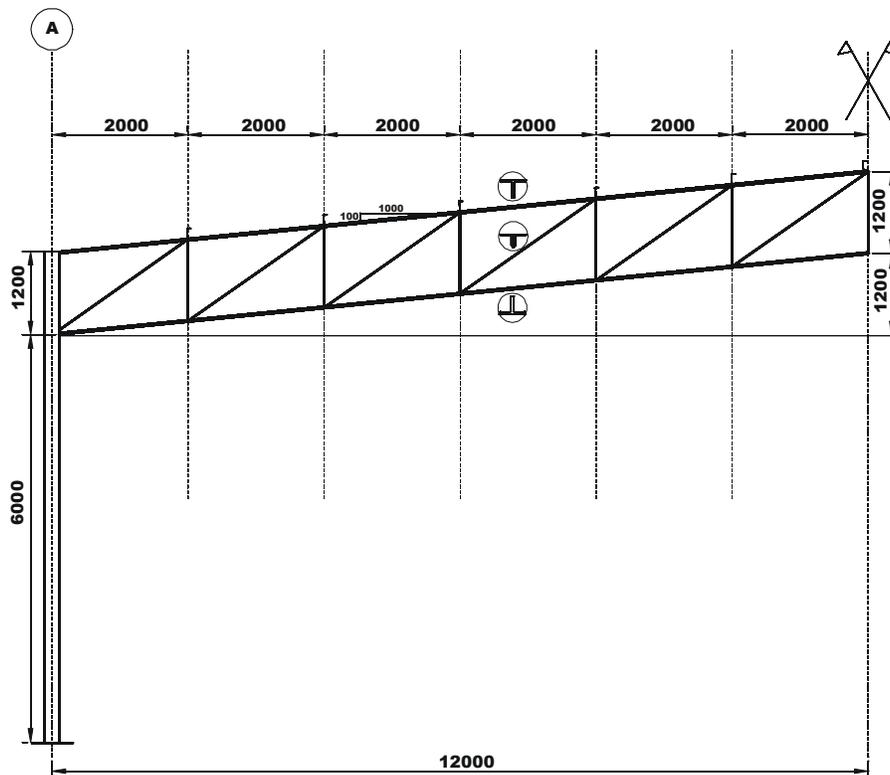


Figura 3.25 – Pórtico com treliça de banzos paralelos com vão livre de 24 metros (dimensões em milímetros)

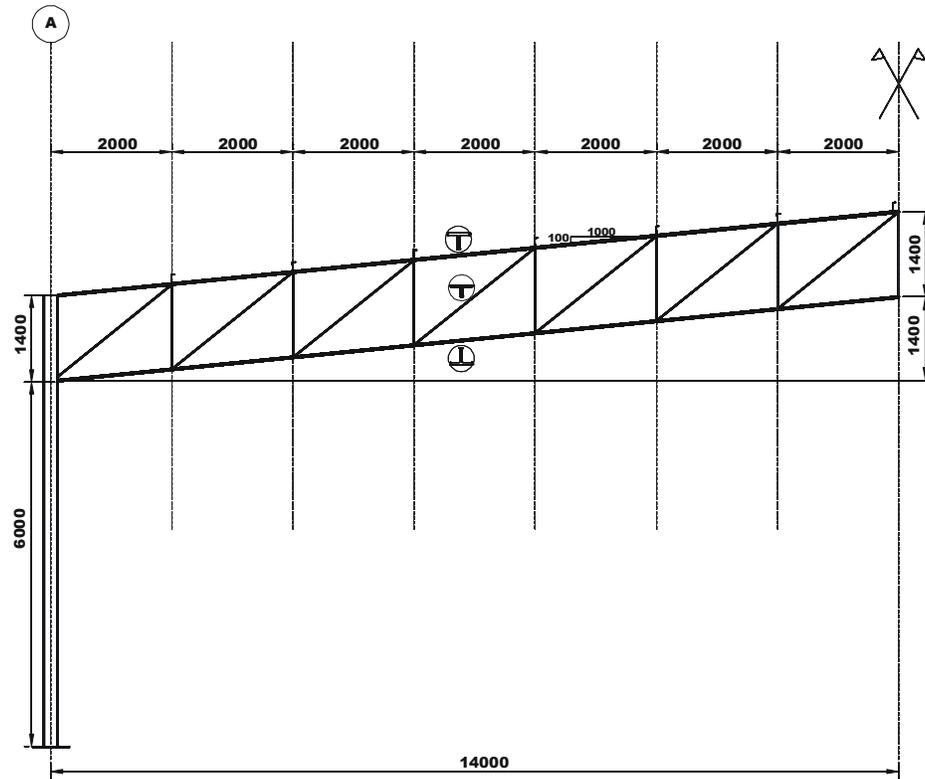


Figura 3.26 – Pórtico com treliça de banzos paralelos com vão livre de 28 metros (dimensões em milímetros)

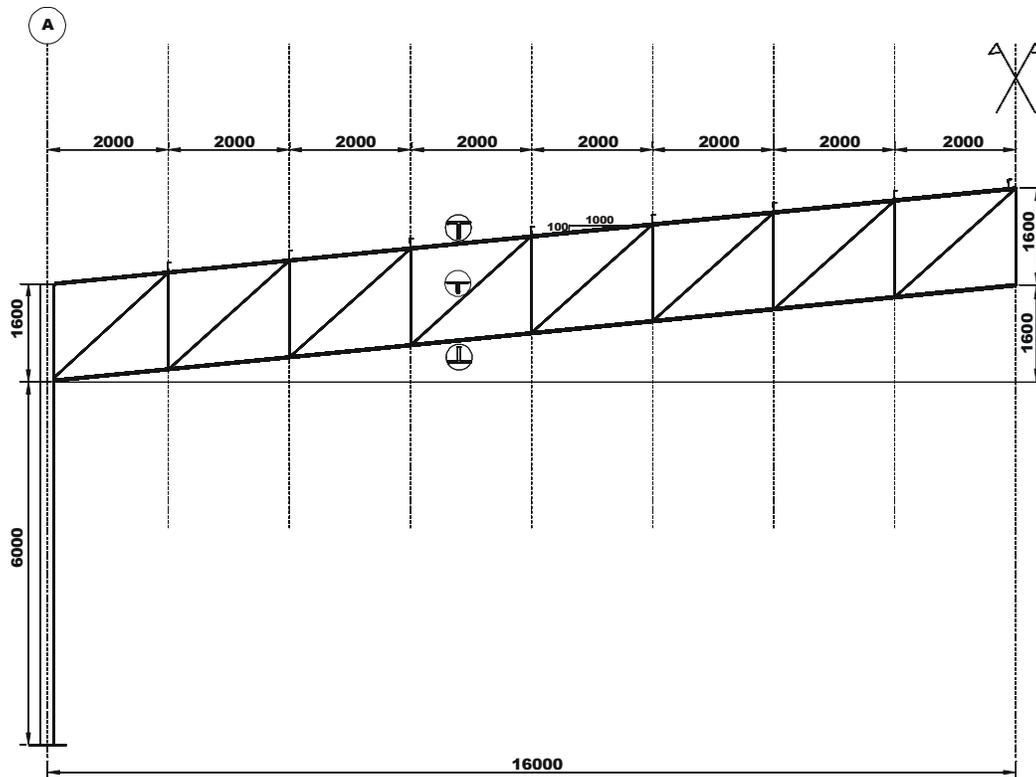


Figura 3.27 – Pórtico com treliça de banzos paralelos com vão livre de 32 metros (dimensões em milímetros)

3.3.4. Pórticos com Treliça Trapezoidal

Na Figura 3.28 mostra-se um esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça trapezoidal.

Na Figura 3.29 apresenta-se o sistema estrutural adotado para esses modelos, no qual 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 engastadas na base, ligação flexível entre os banzos da treliça e a coluna e extremidades das diagonais e montantes rotuladas.

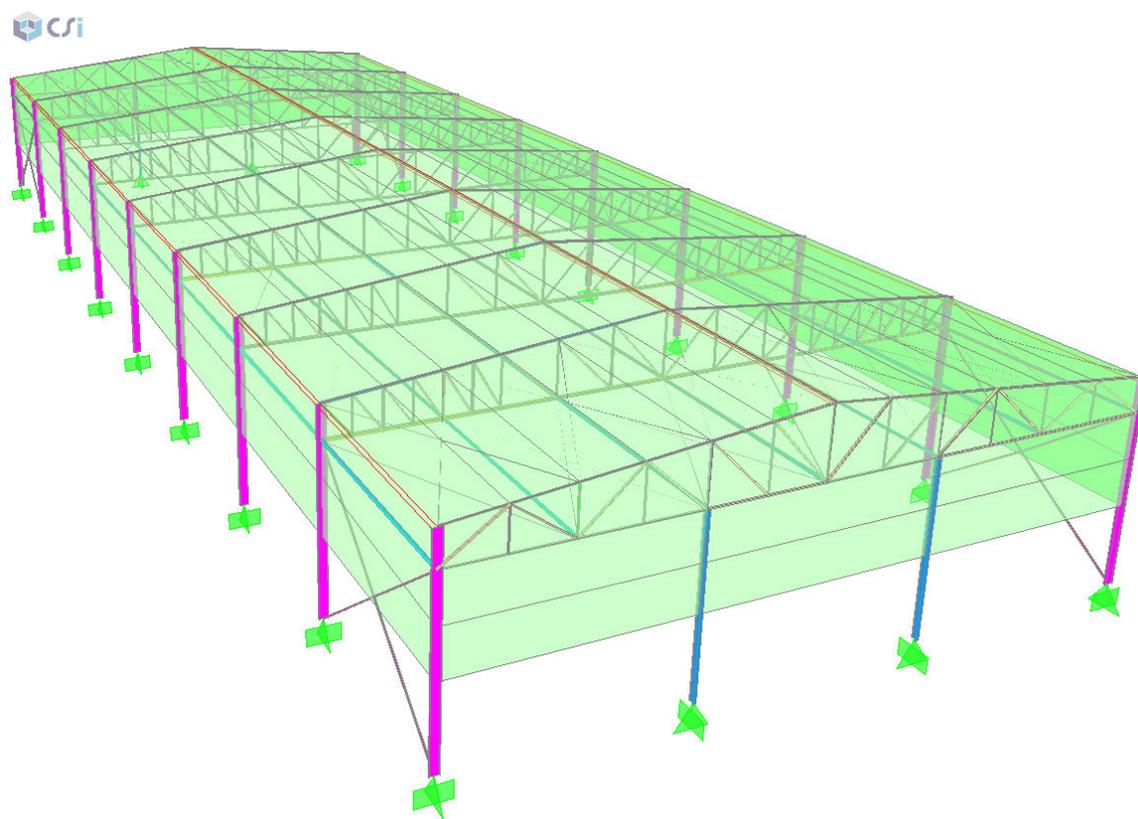


Figura 3.28 – Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça trapezoidal

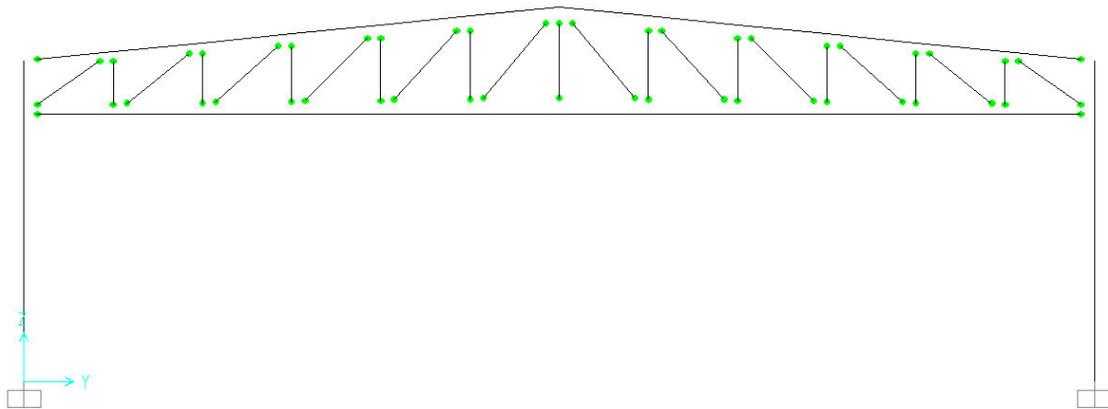


Figura 3.29 – Sistema estrutural do pórtico com treliça trapezoidal

São apresentados nas Figuras de 3.30 a 3.34 os modelos propostos para esse sistema estrutural.

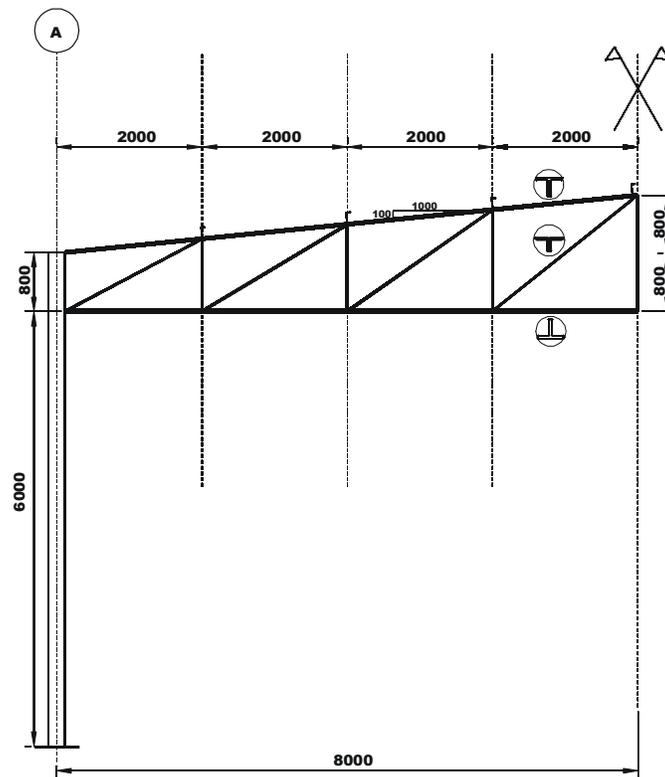


Figura 3.30 – Pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 16 metros (dimensões em milímetros)

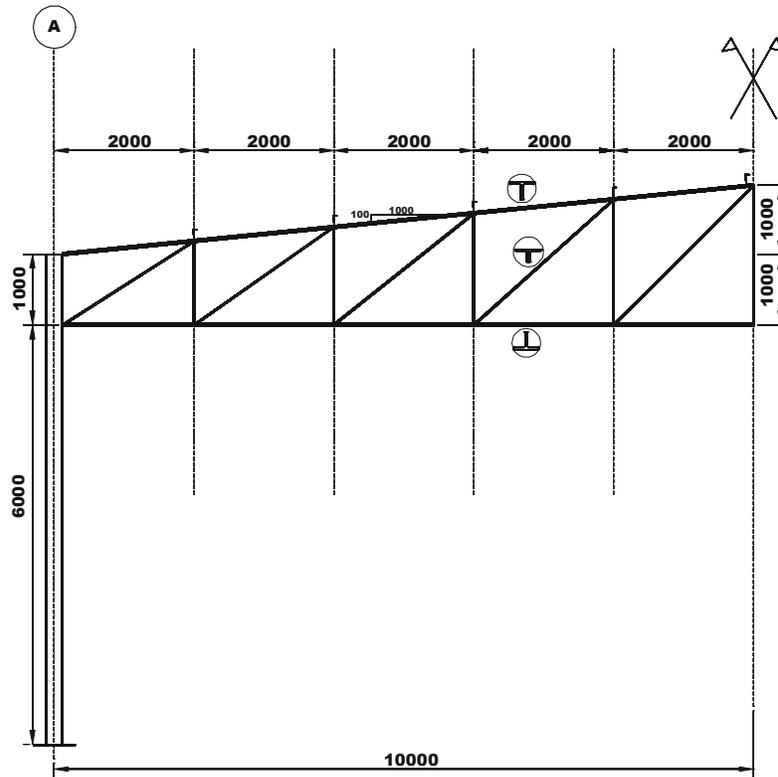


Figura 3.31 - Pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 20 metros (dimensões em milímetros)

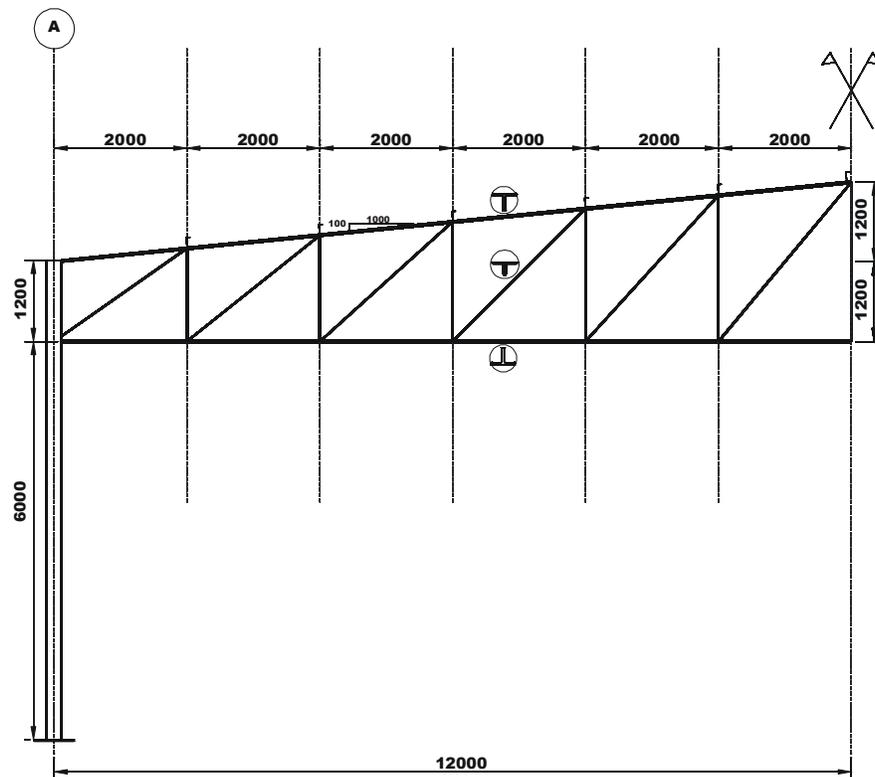


Figura 3.32 - Pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros (dimensões em milímetros)

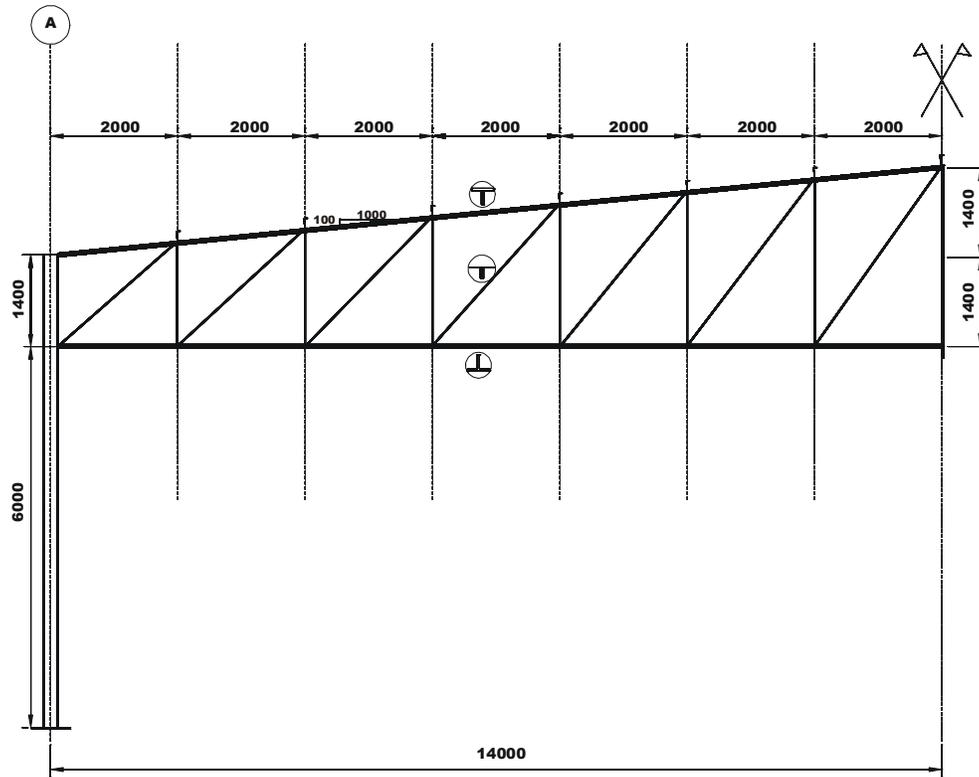


Figura 3.33 - Pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 28 metros (dimensões em milímetros)

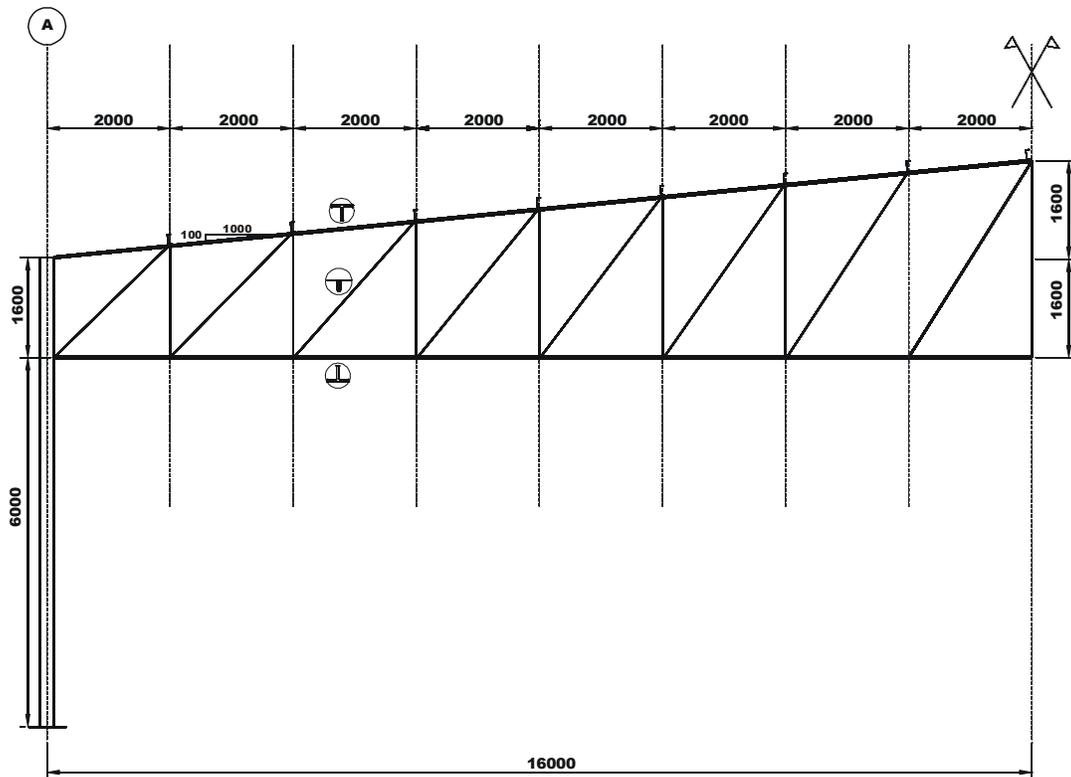


Figura 3.34 - Pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 32 metros (dimensões em milímetros)

3.3.5. Pórticos com Treliça Triangular

O último grupo de modelos considerado no estudo paramétrico é o pórtico com treliça triangular. Na Figura 3.35 apresenta-se um esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça triangular.

O sistema estrutural do pórtico com treliça triangular é apresentado na Figura 3.36. 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.

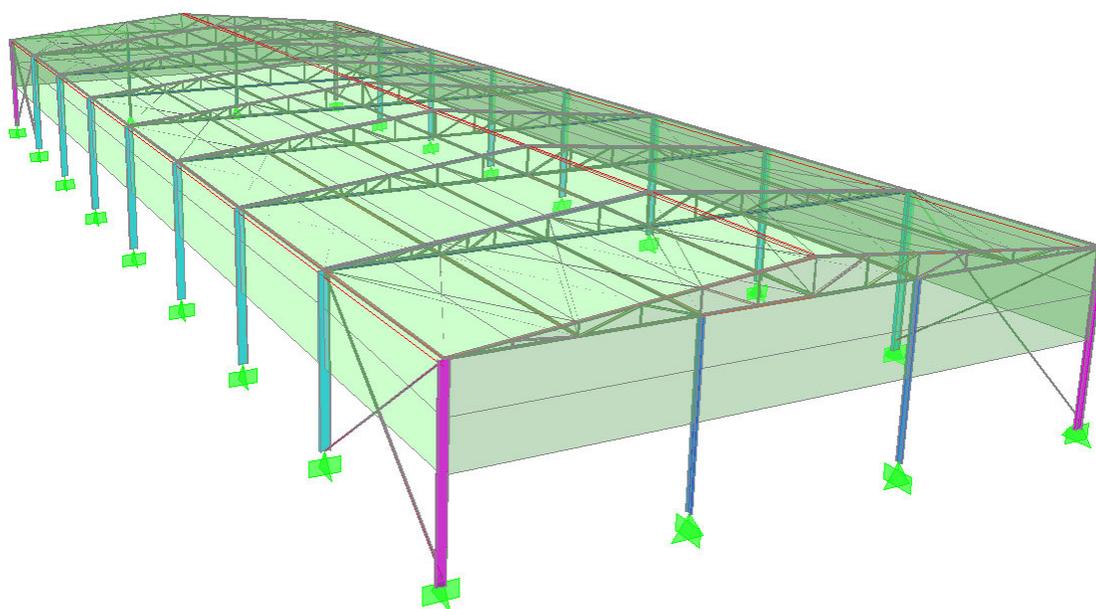


Figura 3.35 – Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça triangular

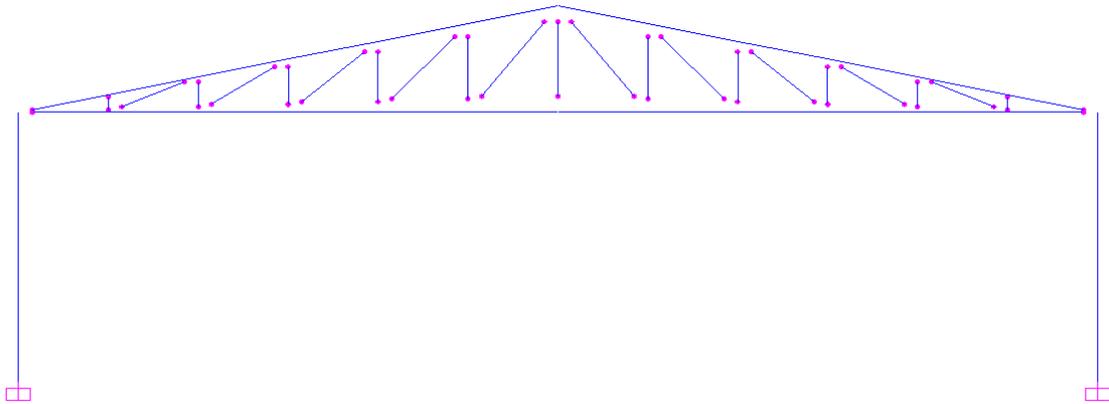


Figura 3.36 – Sistema estrutural do pórtico com treliça triangular

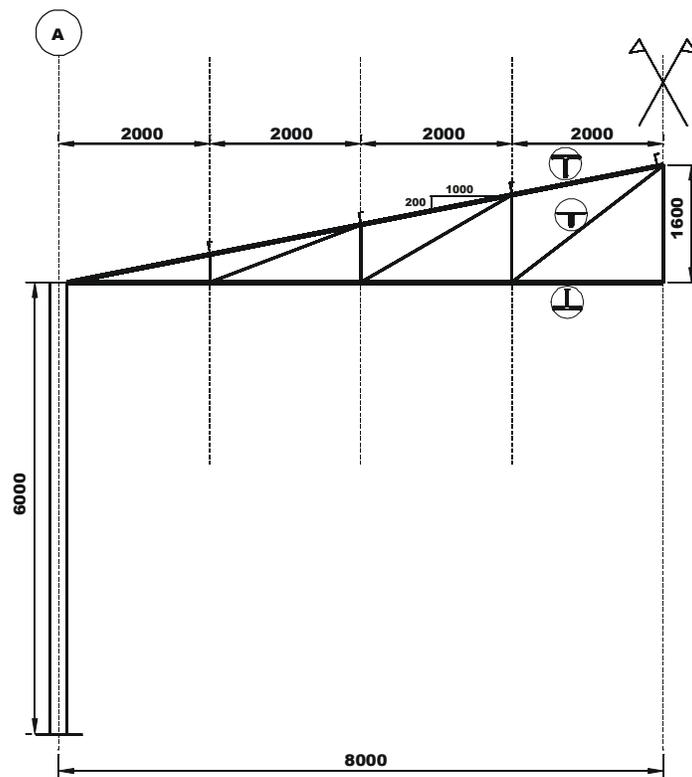


Figura 3.37 - Pórtico com treliça triangular com vão livre de 16 metros (dimensões em milímetros)

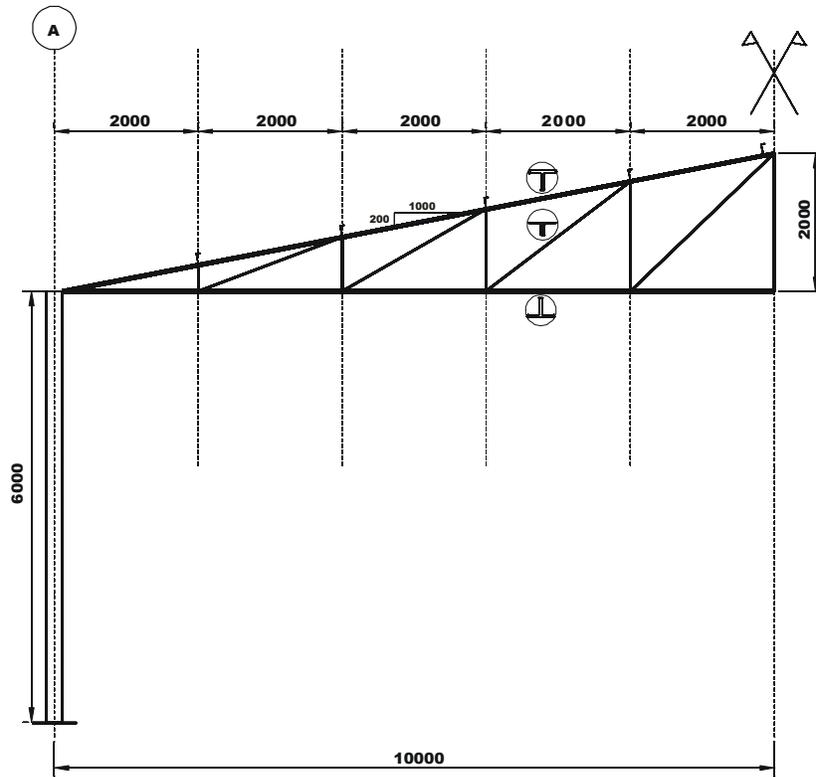


Figura 3.38 - Pórtico com treliça triangular com vão livre de 20 metros (dimensões em milímetros)

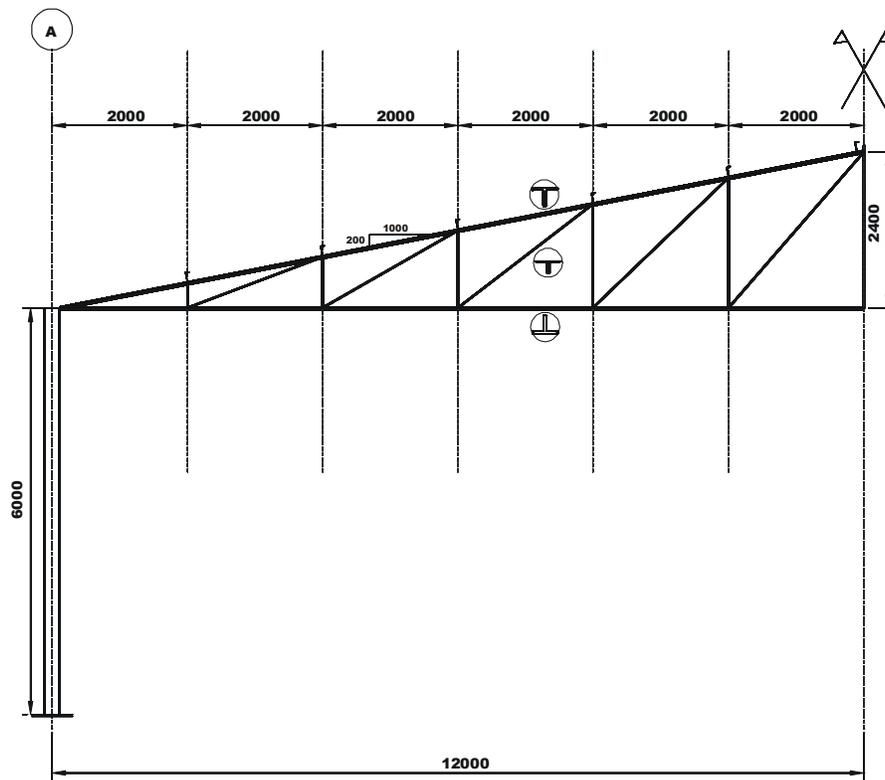


Figura 3.39 - Pórtico com treliça triangular com vão livre de 24 metros (dimensões em milímetros)

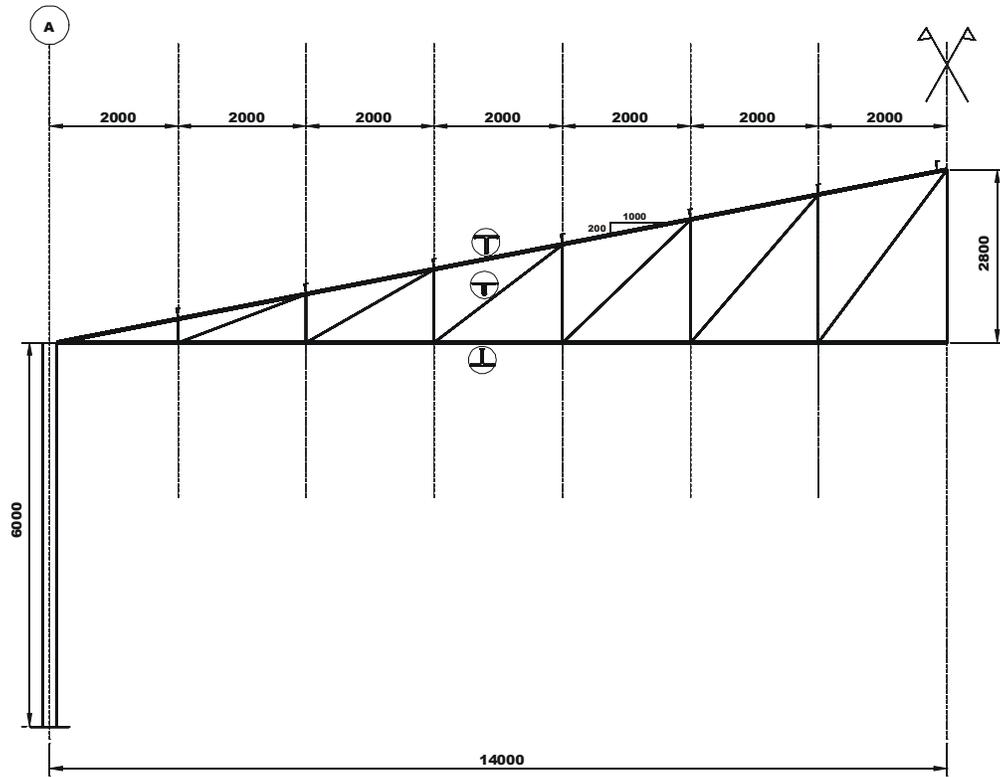


Figura 3.40 - Pórtico com treliça triangular com vão livre de 28 metros (dimensões em milímetros)

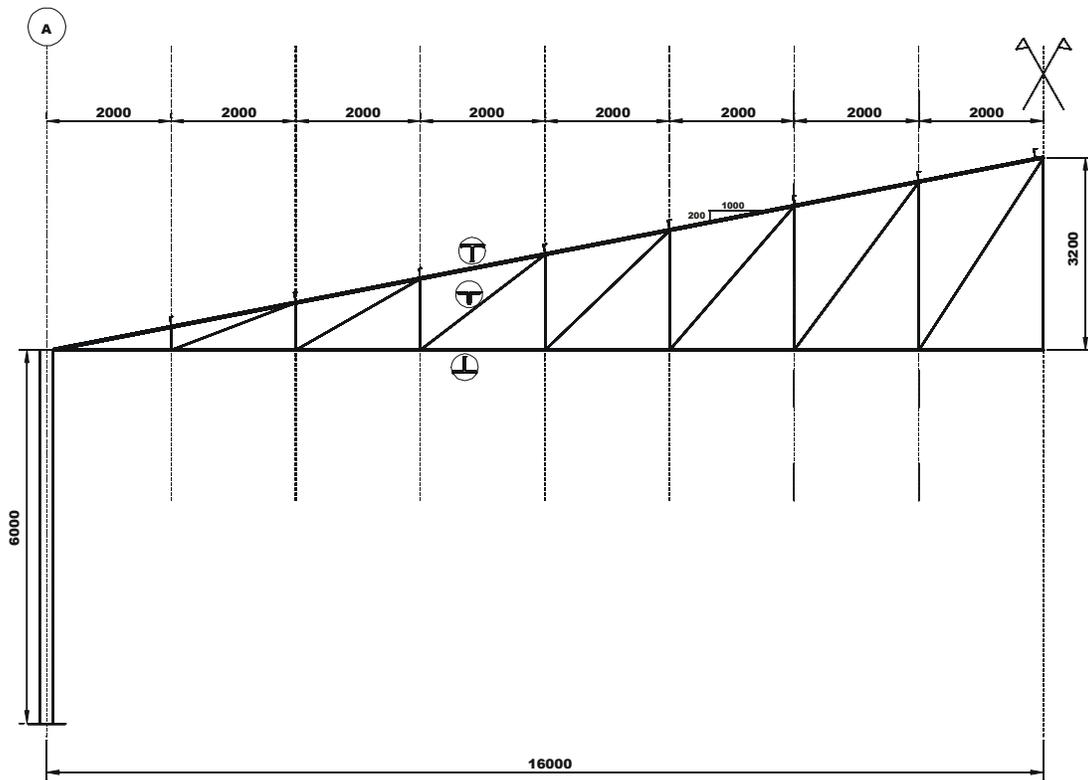


Figura 3.41 - Pórtico com treliça triangular com vão livre de 32 metros (dimensões em milímetros)

4

ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DOS PÓRTICOS TRANSVERSAIS

4.1. Considerações Preliminares

No Capítulo 3 foram apresentadas as tipologias de pórticos transversais adotadas para o desenvolvimento do estudo paramétrico deste trabalho.

Neste Capítulo apresentam-se as bases adotadas para desenvolvimento da análise e dimensionamento dos pórticos transversais considerados. Faz-se uma abordagem sobre os programas computacionais utilizados e a composição das seções transversais empregadas nos elementos estruturais que compõem os pórticos.

Tendo em vista a grande quantidade de resultados gerados com a análise e dimensionamento dos vinte e cinco modelos de pórticos transversais considerados no estudo paramétrico, optou-se por apresentar, a título de exemplificação, os resultados de um único modelo.

4.2. Bases para Análise e Dimensionamento

Considerando que o estudo paramétrico deste trabalho se centra na avaliação dos pórticos transversais das tipologias propostas e tendo em conta que os elementos estruturais secundários (terças, travessas, contraventamentos, etc.) são os mesmos para todas as tipologias, optou-se pela utilização de modelos de pórticos planos para avaliação do comportamento estrutural. Dadas às características do arranjo estrutural dos galpões industriais leves, com a repetição regular de pórticos planos e estabilização longitudinal, a análise dos pórticos planos é um procedimento usualmente empregado no projeto desses edifícios.

A avaliação das ações sobre os pórticos transversais foi feita com base na NBR8800(ABNT,1986) e NBR6123(ABNT,1988). Para determinação das forças devidas ao vento nos galpões estudados foram utilizados os programas computacionais Visualventos (CHIARELLO et al.,2003) e Autoventos (REQUENA et al.,2001).

Para análise estrutural dos modelos propostos utilizou-se o programa computacional SAP2000 - Versão 10 (COMPUTERS AND STRUCTURES, 2005). O SAP2000 é um programa computacional amplamente utilizado no meio acadêmico e profissional para análise linear e não-linear de estruturas em geral, cujos resultados foram contrastados por diversos autores ao longo do tempo.

Para composição dos pórticos de alma cheia foram utilizados perfis eletro-soldados tipo I tanto para as colunas, quanto para a viga de cobertura. Para todas as tipologias de pórticos treliçados foram utilizados perfis eletro-soldados tipo I nas colunas e cantoneiras duplas nas diagonais e montantes. Para composição dos banzos superiores e inferiores das vigas de cobertura treliçadas foram consideradas duas opções: perfis tipo TE eletro-soldado e cantoneiras duplas.

Os perfis eletro-soldados foram introduzidos no mercado brasileiro nos últimos anos. São formados por um processo de solda contínua que usa uma corrente de alta frequência de 400KHz. A resistência à passagem desta corrente aquece uma zona específica que atinge a temperatura plástica, permitindo assim a fusão, através de uma leve pressão de rolos. Esses perfis apresentam como principais características a leveza (quando comparado a perfis de mesmas propriedades mecânicas) e a flexibilidade de dimensões (podem ter até 18 metros de comprimento e forma assimétrica).

4.3. Composição das Seções Transversais

Durante o desenvolvimento do estudo paramétrico, notou-se a necessidade de avaliar o desempenho de algumas composições de seções para as vigas treliçadas. Os principais objetivos dessa análise preliminar são avaliar a relação Inércia/Massa das seções transversais equivalentes para distintas composições e o desempenho do elemento estrutural isolado na treliça.

Foram estabelecidos três tipos de composições de treliças, considerando-se perfis U laminados, cantoneiras duplas e perfis TE eletro-soldados, conforme mostrado na Figura 4.1. As propriedades mecânicas de cada seção transversal considerada nessa análise preliminar são mostradas na Tabela 4.1.

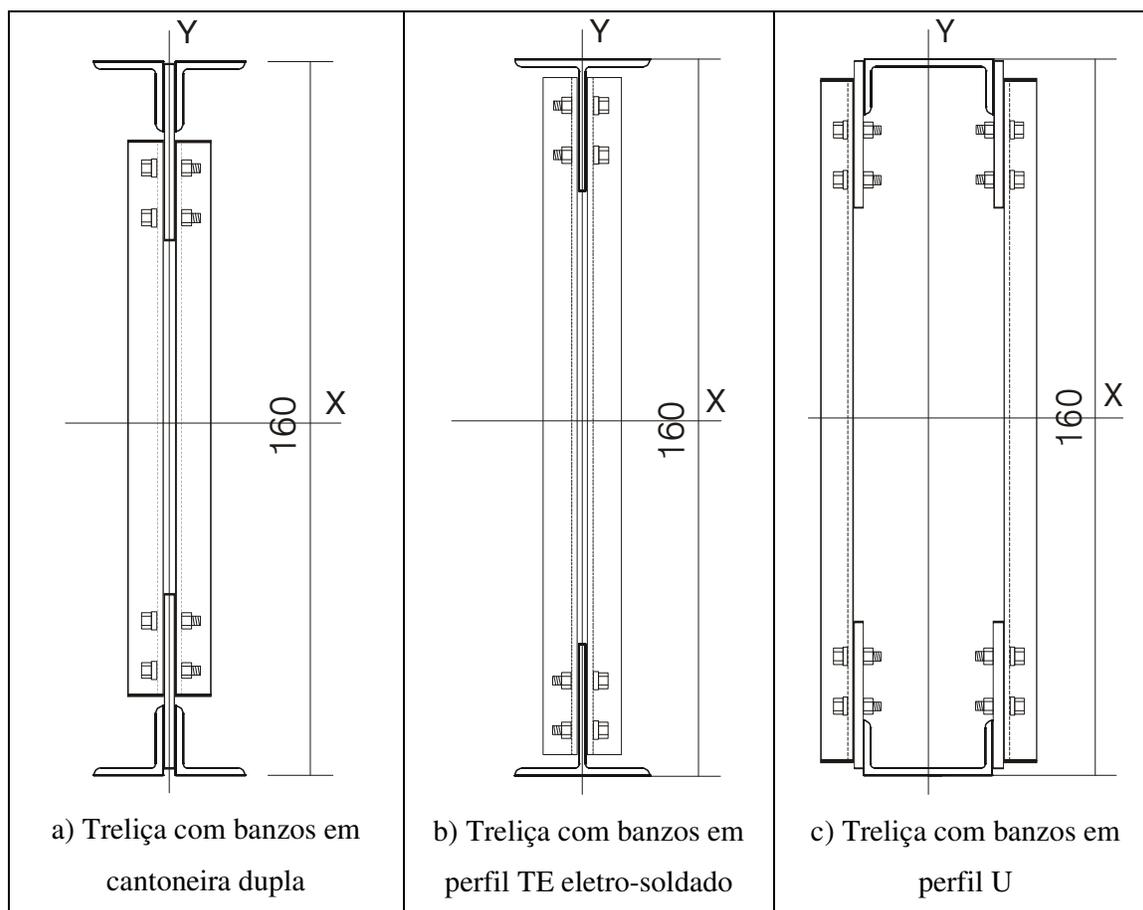


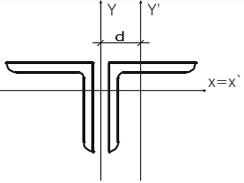
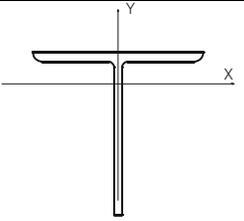
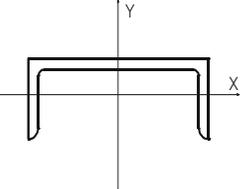
Figura 4.1 – Composição das vigas treliçadas

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas de seções transversais

Perfil	Massa kg/m	Área cm ²	d mm	bf mm	tw mm	tf mm	I _x cm ⁴	W _x cm ³	r _x cm	I _y cm ⁴	W _y cm ³	r _y cm	Forma
U101,6x7,95	7,95	10,1	40,1	101,6	7,5	4,57	13,1	4,6	1,14	159,5	31,4	3,97	U
U101,6x9,30	9,3	11,9	41,8	101,6	7,5	6,27	15,5	5,1	1,14	174,4	34,3	3,84	U
U8 na 1ª	17,10	21,70	57,00	203,00	9,90	5,60	53,80	12,60	7,87	1340,00	132,00	1,58	U
U8 na 2ª	20,50	26,00	59,00	203,00	9,90	7,70	62,00	13,70	7,58	1490,00	147,00	1,55	U
2L51x6.35	9,51	12,12	50,80	109,60	6,35	6,35	29,20	4,08	1,55	72,95	4,08	2,45	2L
2L63x4,76	9,11	11,60	63,50	135,00	4,76	4,76	46,00	5,00	1,99	99,62	5,00	2,93	2L
2L76,2x4,76	11,04	14,06	76,20	160,40	4,76	4,76	80,00	7,22	2,39	166,47	7,22	3,44	2L
TE75x10,5	10,50	13,30	75,00	75,00	9,50	9,50	69,00	13,20	2,30	33,00	8,90	1,60	T
TE85x10	10,20	13,00	85,00	85,00	8,00	8,00	89,00	14,70	2,60	41,00	9,60	1,80	T
TE85x12	12,00	15,20	85,00	85,00	9,50	9,50	103,00	17,10	2,60	49,00	11,50	1,80	T

Para cada composição de treliça determina-se a inércia da seção equivalente da viga de cobertura e as esbeltezes dos elementos estruturais comprimidos, considerando-se um comprimento de flambagem L=200cm, conforme exemplos mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Seções equivalentes da viga de cobertura e esbeltezes dos elementos comprimidos

Seção	Propriedades mecânicas da seção equivalente da viga de cobertura	Esbeltezes dos elementos estruturais comprimidos
	$2L51x6.35 \rightarrow 9.51 \text{ kg/m}$ $-I_x = 2 * (I_x + A * d^2)$ $-I_x = 2 * (29.2 + 12.10 * 80^2)$ $-I_x = 154938 \text{ cm}^4$ $I_x / M = 16292 \text{ cm}^4 \text{ kg}$	$r_x = 1.55 \text{ cm} \rightarrow \lambda_x = \frac{L}{r_x} = \frac{200}{1.55} = 129$ $r_y = 2.16 \text{ cm} \rightarrow \lambda_y = \frac{L}{r_y} = \frac{200}{2.16} = 93$
	$TE75x10,5 \rightarrow 10.5 \text{ kg/m}$ $-I_x = 2 * (I_x + A * d^2)$ $-I_x = 2 * (69 + 13.3 * 80^2)$ $-I_x = 170378 \text{ cm}^4$ $I_x / M = 16226 \text{ cm}^4 \text{ kg}$	$r_x = 2,30 \text{ cm} \rightarrow \lambda_x = \frac{L}{r_x} = \frac{200}{2,30} = 87$ $r_y = 1,60 \text{ cm} \rightarrow \lambda_y = \frac{L}{r_y} = \frac{200}{1,60} = 125$
	$U101.6x9.3 \rightarrow 9.3 \text{ kg/m}$ $-I_x = 2 * (I_x + A * d^2)$ $-I_x = 2 * (174.4 + 11.9 * 80^2)$ $-I_x = 152668 \text{ cm}^4$ $I_x / M = 16415 \text{ cm}^4 \text{ kg}$	$r_y = 3.83 \text{ cm} \rightarrow \lambda_x = \frac{L}{r_x} = \frac{200}{3.83} = 52$ $r_x = 1.14 \text{ cm} \rightarrow \lambda_y = \frac{L}{r_y} = \frac{200}{1.14} = 175$

Para os casos mostrados na Tabela 4.2, observa-se que a relação Inércia/Massa é muito próxima para os três casos. No entanto, nota-se também que nos casos de seções compostas por cantoneira dupla e perfil TE eletro-soldado as esbeltezes com relação aos dois eixos principais de inércia são mais próximas entre si do que no caso do perfil U laminado.

Esta análise indica que a adoção de seções compostas por cantoneira dupla e perfil TE eletro-soldado deverá conduzir à obtenção de estruturas de menor peso e, por essa razão, foram consideradas no dimensionamento das treliças.

4.4. Ações

As ações atuantes nos modelos foram determinadas de acordo com as recomendações do Anexo B da NBR8800 (ABNT, 1986) e de BELLEI (2006):

a) Ações Permanentes

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 SAP2000, enquanto que as demais cargas são informadas separadamente. Para todos os modelos considera-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.

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 o vento.

4.4.1. Sobrecarga de Cobertura

Segundo o item B-3.5.1 do Anexo B da NBR8800 (ABNT,1986), para coberturas comuns, na ausência de especificação mais rigorosa, deve ser prevista uma sobrecarga nominal mínima de $0,25\text{ kN/m}^2$.

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

Para todos os modelos considerados neste trabalho considera-se uma sobrecarga de cobertura de $0,15\text{ kN/m}^2$.

4.4.2. Vento

O estudo de vento para os galpões considerados neste trabalho foi feito de acordo com as prescrições da NBR 6123 (ABNT, 1988). Admitiu-se uma situação de vento comum a todos os galpões, o que implicou em adotar uma mesma velocidade básica de vento para todos os modelos.

Na avaliação das forças devidas ao vento se estabeleceu uma velocidade básica $V_0=35\text{m/s}$, o que abrange todo o Norte e Nordeste, parte da região Sudeste e Centro Oeste do Brasil, como pode ser identificado pela parte hachurada da Figura 4.2. Isto torna este estudo representativo para boa parte do território brasileiro.

Admitiu-se também que os galpões serão implantados em terreno plano ou fracamente acidentado, aberto em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas (a cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1m). Por último supôs-se também que as aberturas principais do galpão estejam fechadas numa situação crítica de vento, o que permitiu admitir que as quatro faces são igualmente impermeáveis.

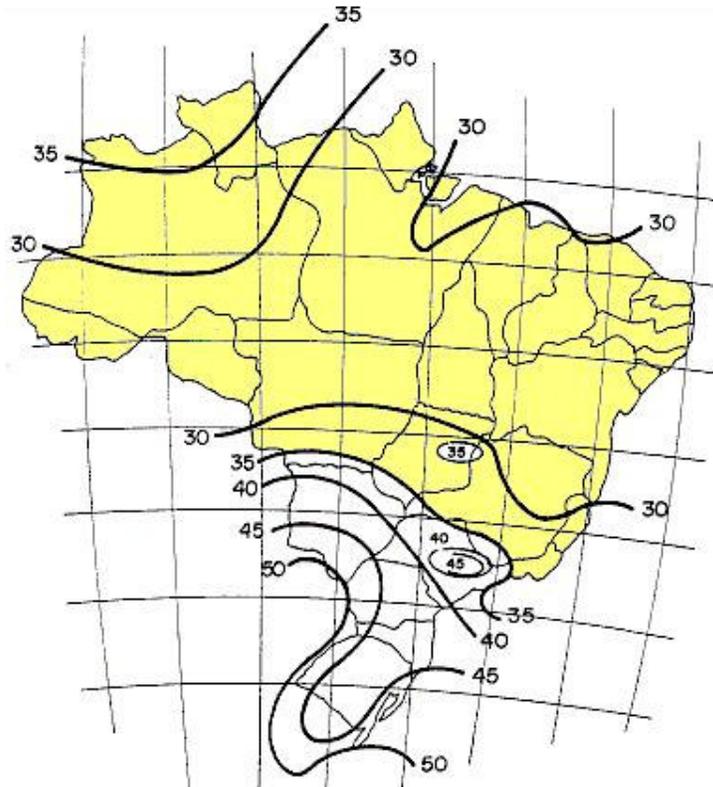


Figura 4.2 – Delimitação da área abrangida pelo estudo paramétrico nas Isopletas de velocidade básica V_0 (m/s)

Em função da descrição anterior, foram admitidas as seguintes características para o vento:

- Velocidade Básica - $V_0 = 35\text{m/s}$
- Fator Topográfico - $S_1 = 1,0$
- Fator de Rugosidade - $S_2 = 0,92$
- Fator Estatístico - $S_3 = 1,0$

Para essas condições, a pressão dinâmica (q) admitida é de:

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$$

$$q = 0,613 V_k^2 = 635,58 \text{ N/m}^2 = 0,64 \text{ kN/m}^2$$

Para desenvolvimento do estudo paramétrico é necessário determinar as forças devidas ao vento para dois casos distintos de edifício com planta retangular: com cobertura em duas águas e com cobertura em arco.

Considerando a grande quantidade de dados de todos os modelos, optou-se por apresentar somente os estudos de vento para um modelo com cobertura em duas águas e outro com cobertura em arco.

4.4.2.1. Estudo de Vento Típico para Galpão em Duas Águas

a) Características

- galpão em duas águas
- vão livre - 20 metros
- distância entre pórticos transversais - 6 metros
- altura da coluna - 6 metros
- inclinação - 10%
- comprimento - 60 metros

b) Coeficientes de Forma Externos

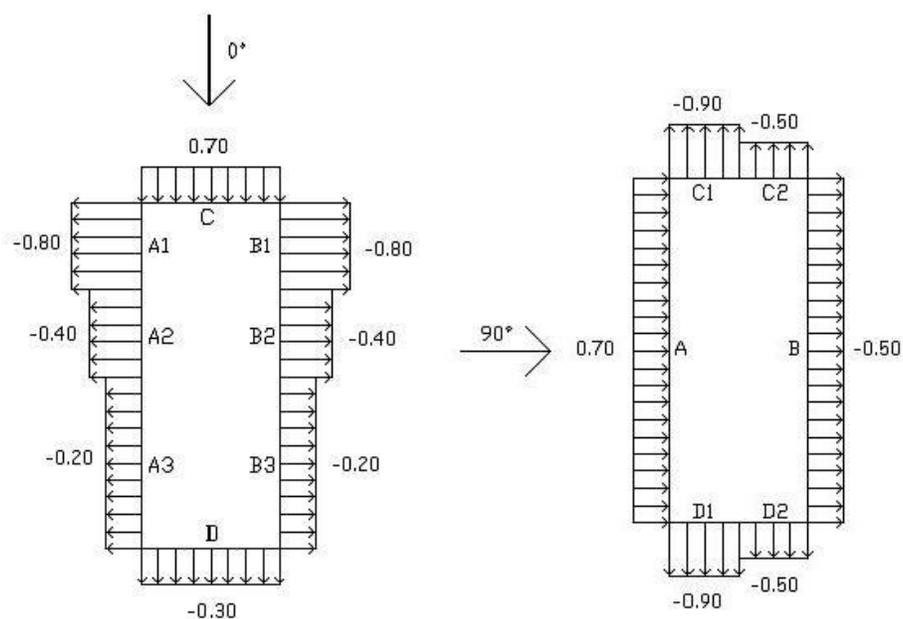


Figura 4.3 – Coeficientes de forma externos para as paredes

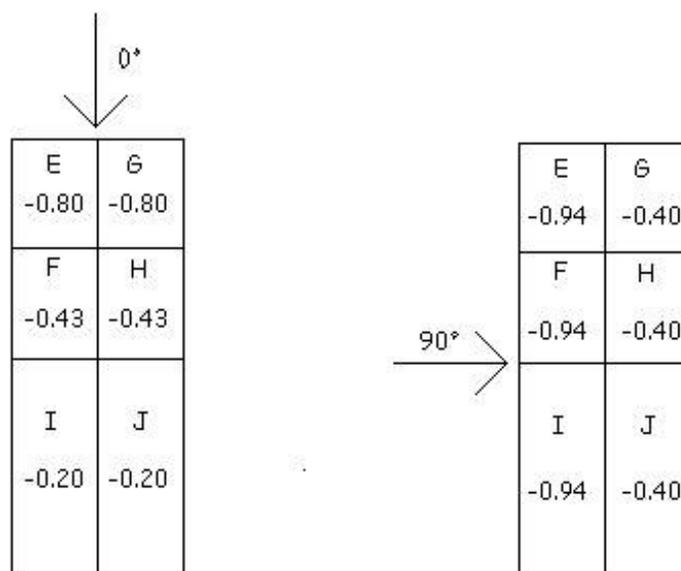


Figura 4.4 – Coeficientes de forma externos para telhado em duas águas

c) Coeficientes de Pressão Interna

Admite-se que o galpão possui quatro faces igualmente permeáveis:

$C_{pi} = -0,3$ ou 0 (considerar o valor mais nocivo)

d) Sobreposição dos Coeficientes de Forma e de Pressão

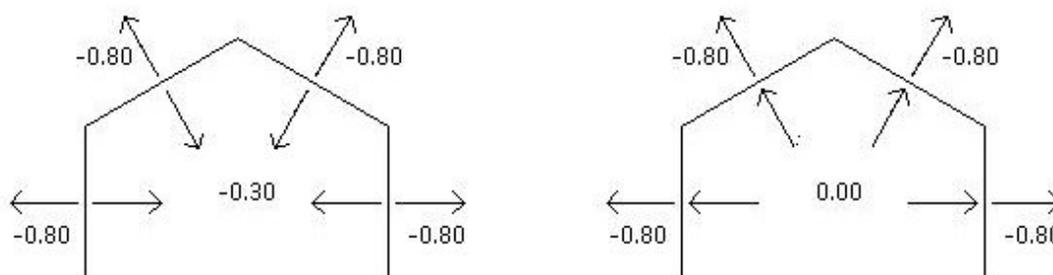


Figura 4.5 – Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão para vento longitudinal ($W0^\circ$)

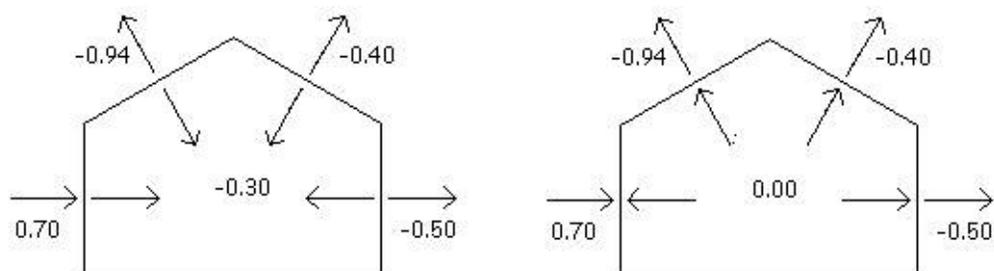


Figura 4.6 – Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão para vento transversal ($W90^\circ$)

e) Casos de Carga Críticos

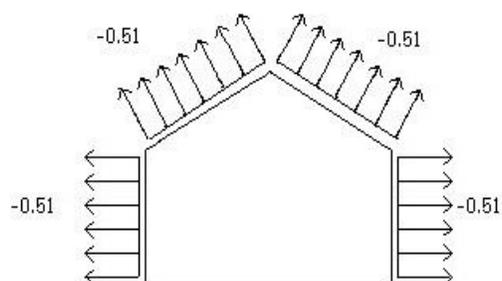


Figura 4.7 – Caso de carga para vento longitudinal ($W0^\circ$) (kN/m^2)

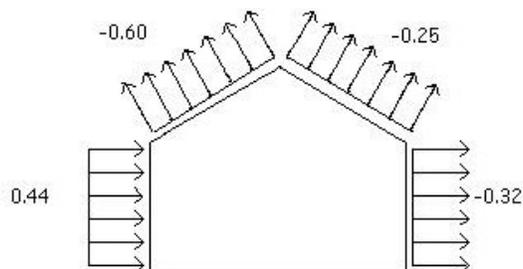


Figura 4.8 – Caso de carga para vento transversal ($W90^\circ$) (kN/m^2)

4.4.2.2. Estudo de Vento Típico para Galpão em Arco

a) Características

- galpão em arco
- vão livre - 20 metros
- distância entre pórticos transversais - 6 metros
- altura da coluna - 6 metros
- flecha no meio do vão - 4 metros
- comprimento - 60 metros

b) Coeficientes de Forma Externos

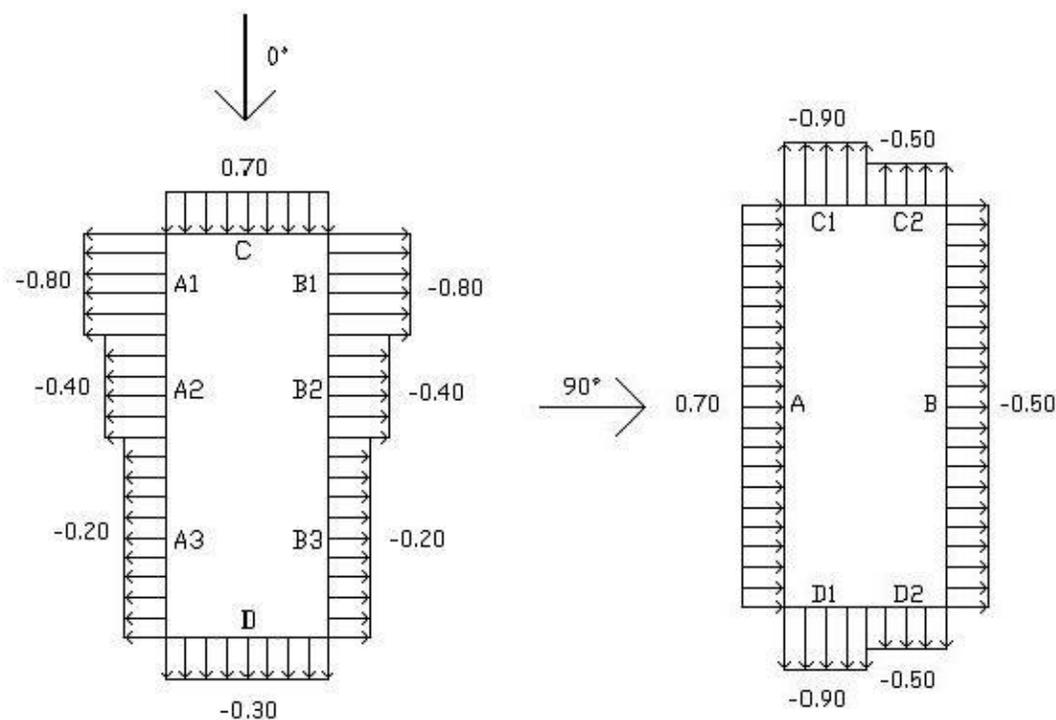


Figura 4.9 – Coeficientes de forma externos para as paredes

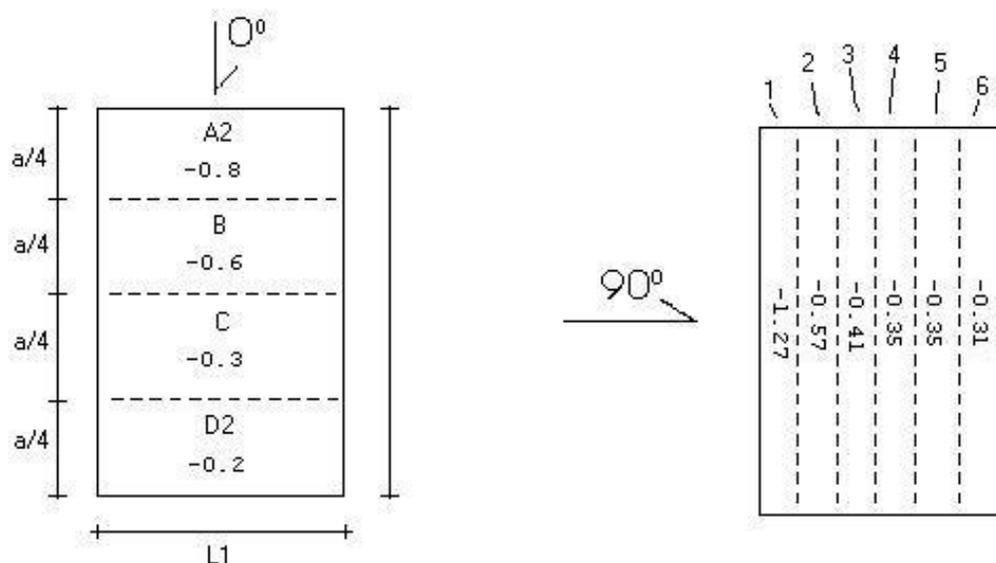


Figura 4.10 – Coeficientes de forma externos para telhado em arco

c) Coeficientes de Pressão Interna

Admite-se que o galpão possui quatro faces igualmente permeáveis:

$C_{pi} = -0,3$ ou 0 (considerar o valor mais nocivo)

d) Sobreposição dos Coeficientes de Forma e de Pressão

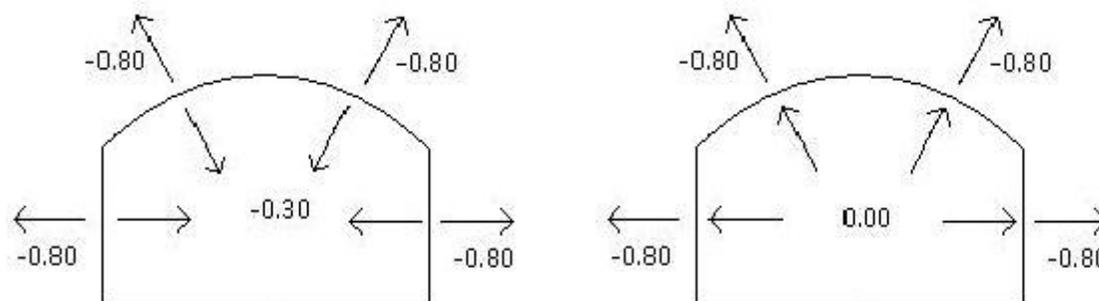


Figura 4.11 – Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão para vento longitudinal ($W0^\circ$)

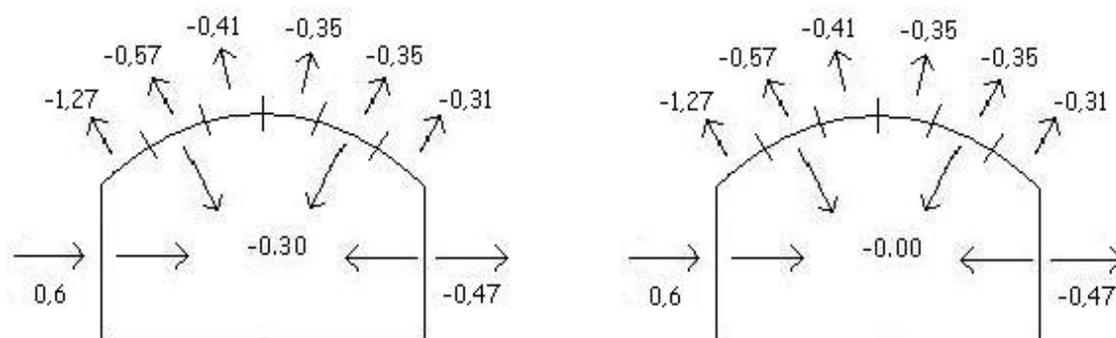


Figura 4.12 – Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão para vento transversal ($W90^\circ$)

e) Casos de Carga Críticos

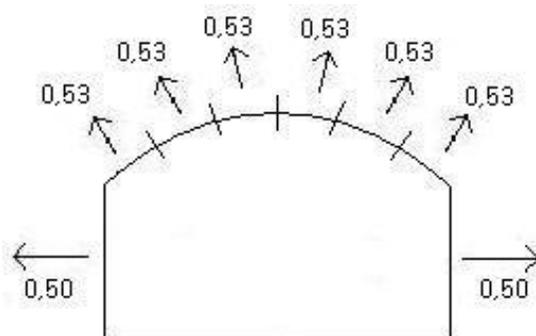


Figura 4.13 – Caso de carga para vento longitudinal ($W0^\circ$) (kN/m^2)

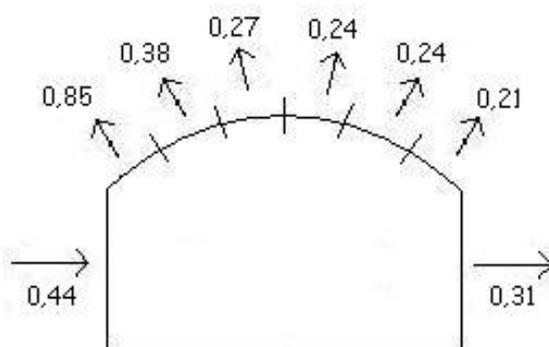


Figura 4.14 – Caso de carga para vento transversal ($W90^\circ$) (kN/m^2)

4.5. Combinações de Ações

O carregamento que atua numa estrutura é o resultado da combinação das diversas ações que têm probabilidade de ocorrerem simultaneamente num período de tempo determinado.

A NBR8800 (ABNT,1986) define os critérios para combinação das ações nos Estados Limites Últimos e de Serviço de uma estrutura de aço, com o objetivo de determinar os efeitos mais desfavoráveis na mesma.

Seguindo as prescrições da NBR8800 (ABNT,1986), foram definidas as seguintes combinações de ações para os modelos estruturais do estudo paramétrico:

- COMB1 – $1,3 * G$ (peso próprio) + $1,5 * Q$ (sobrecarga)
- COMB2 – $1,0 * G$ (peso próprio) + $1,4 * W_{90^\circ}$ (vento transversal)
- COMB3 – $1,0 * G$ (peso próprio) + $1,4 * W_{0^\circ}$ (vento longitudinal)

4.6. Análise dos Modelos Estruturais

De forma a exemplificar o trabalho realizado para todos os modelos de pórtico transversal considerados no estudo paramétrico, mostram as seções transversais, os casos de carga, às vinculações e alguns resultados da análise estrutural de um modelo de pórtico com treliça trapezoidal (TP) com vão livre de 24 metros.

Neste modelo os banzos superiores e inferiores são formados por perfil TE eletro-soldado, os montantes e diagonais por cantoneira dupla e as colunas por perfil tipo I eletro-soldado (Figura 4.15).

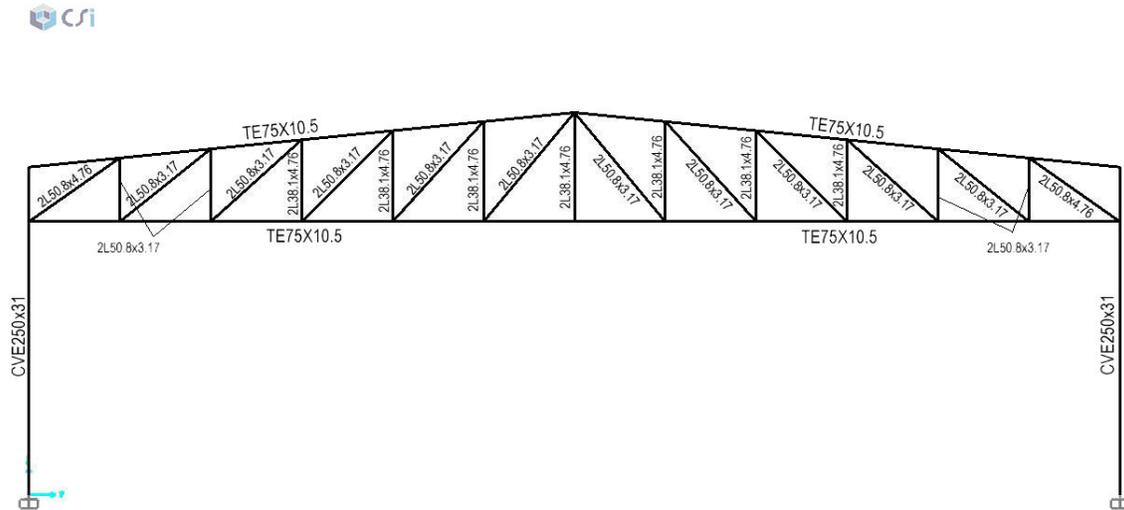


Figura 4.15 – Seções transversais dos elementos que compõem o pórtico com treliça trapezoidal (TP) com vão livre de 24 metros.

Nas Figuras 4.16 e 4.17 mostra-se a aplicação das ações devidas ao peso próprio e sobrecarga de cobertura no modelo estrutural. Nas Figuras 4.18 e 4.19 são indicadas as ações devidas ao vento longitudinal ($W0^\circ$) e ao vento transversal ($W90^\circ$) respectivamente.

Quando o vento incide numa estrutura, em geral, ele atua na face do telhado e o telhado transfere essa carga para as terças. Por esse motivo a aplicação da carga no nó do pórtico é inserida na direção da terça, formando um ângulo de 90° com o plano da cobertura.

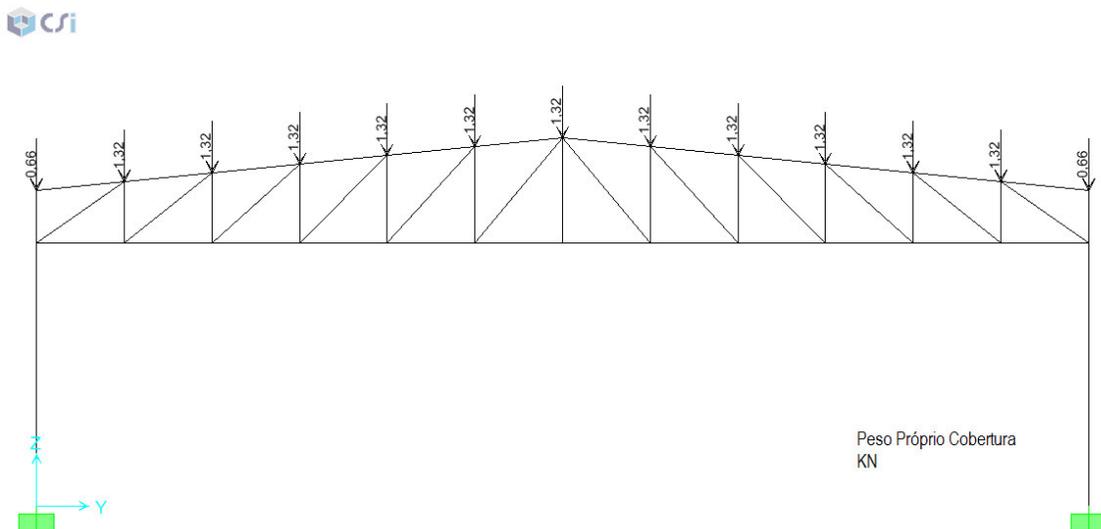


Figura 4.16 – Ações devidas ao peso próprio de cobertura (G) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros

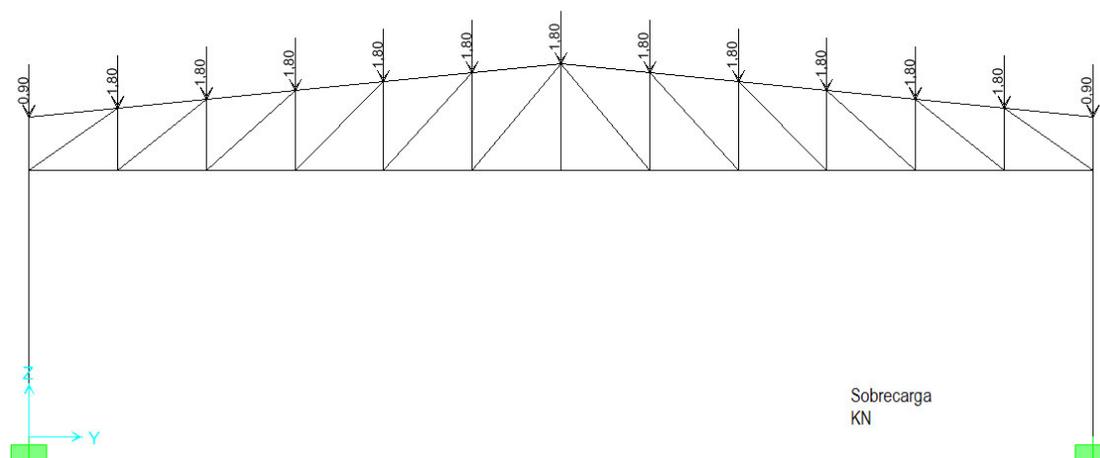


Figura 4.17 – Ações devido à sobrecarga de cobertura (Q) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros

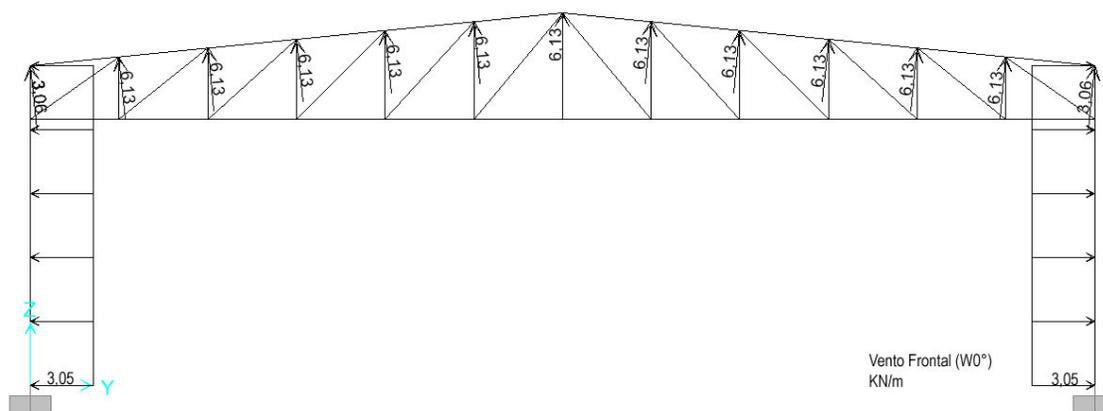


Figura 4.18 – Ações devidas ao vento longitudinal ($W0^\circ$) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros

Tendo definido os casos de carga e as combinações de ações, procede-se à análise estrutural do modelo com auxílio do SAP2000.

A seguir apresentam-se alguns resultados da análise estrutural do pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros. Nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23, mostram-se os diagramas de Esforços Axiais devidas às combinações COMB1, COMB2 e COMB3.

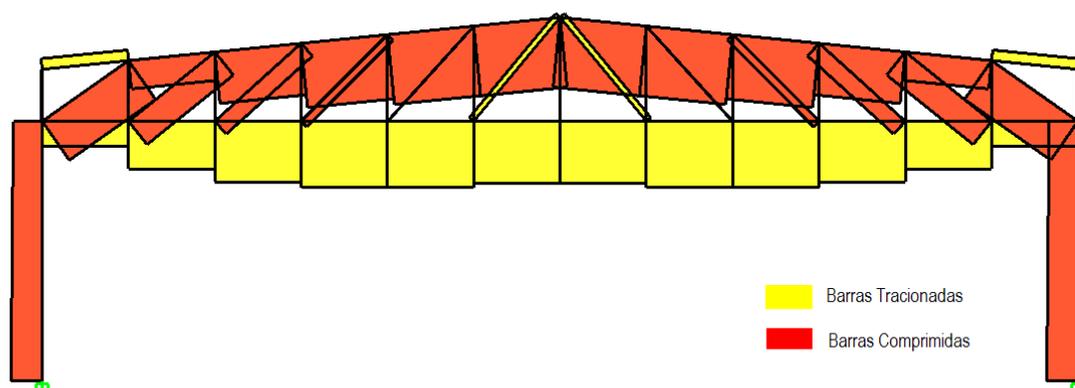


Figura 4.21 – Diagrama de Esforços Axiais devida à COMB1 (1,3G + 1,5Q)

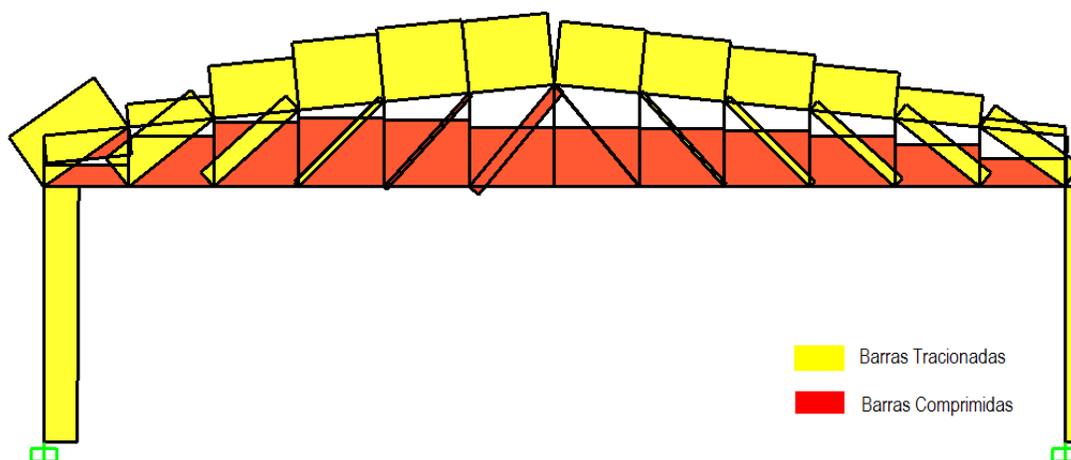


Figura 4.22 – Diagrama de Esforços Axiais devida à COMB2 (1G + 1,4W90°)

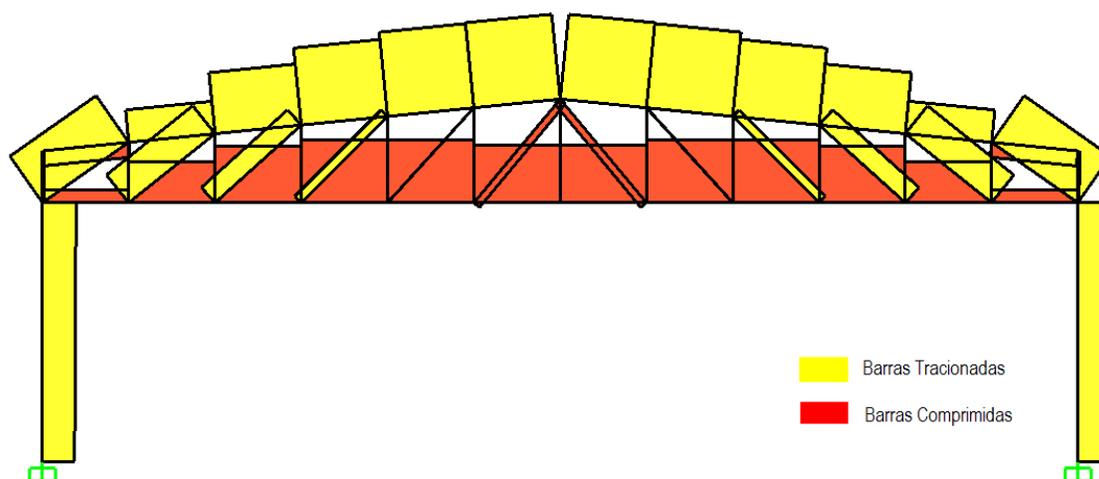


Figura 4.23 – Diagrama de Esforços Axiais devida à COMB3 ($1G + 1,4W0^\circ$)

Nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 são mostrados os diagramas de momentos fletores devido às combinações COMB1, COMB2 e COMB3, respectivamente.

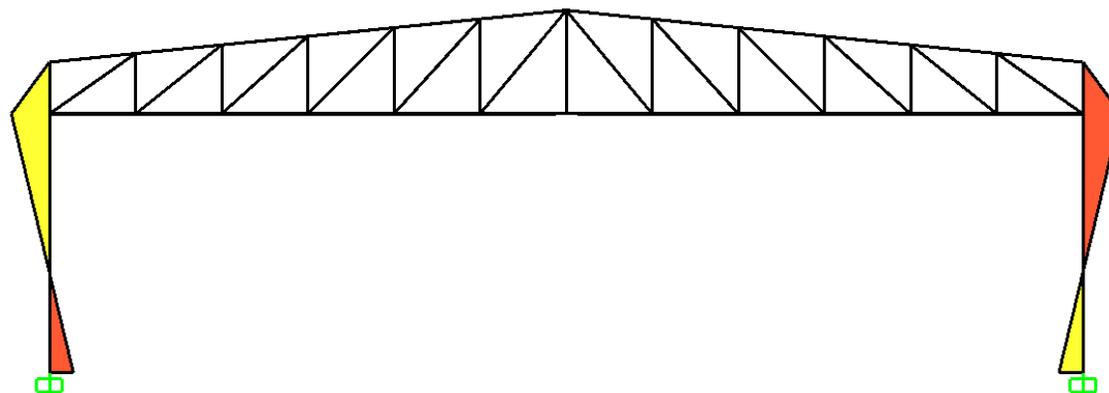


Figura 4.24 – Diagrama de Momentos Fletores devida à COMB1 ($1,3G + 1,5Q$)

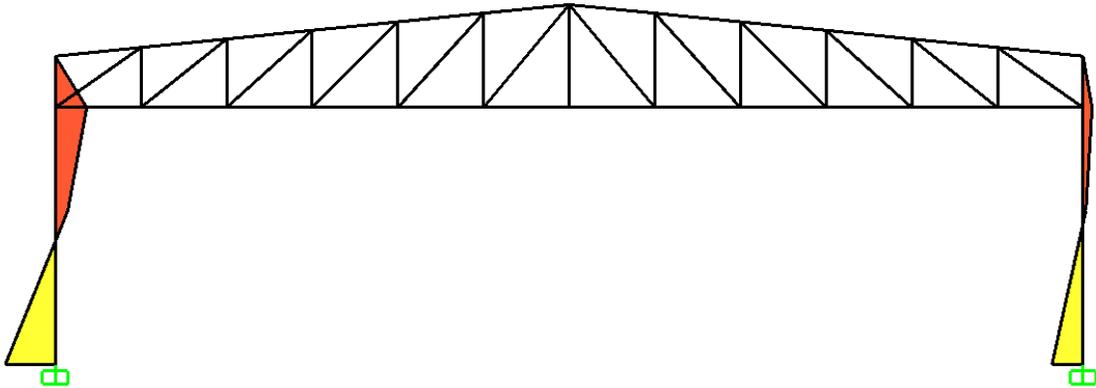


Figura 4.25 – Diagrama de Momentos Fletores devido à COMB2 (1G + 1,4W90°)

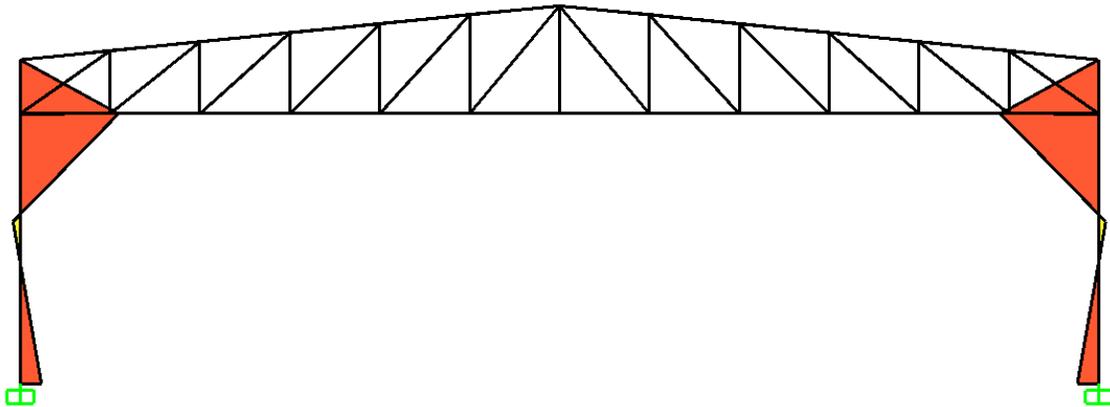


Figura 4.26 – Diagrama de Momentos Fletores devido à COMB3 (1G + 1,4W0°)

4.7. Dimensionamento

Também com o objetivo de exemplificar o trabalho realizado para todos os modelos de pórtico transversal, apresentam-se a seguir os procedimentos utilizados para definição das seções transversais.

A versão 10 do SAP2000 conta com um módulo integrado à análise estrutural que permite a verificação de seções transversais de aço. A verificação de seções no SAP2000 pode ser realizada com base em diversas normas internacionais. Tendo em vista que no SAP2000 não é possível verificar as seções com base nos critérios da NBR8800 (ABNT,1986),

o pré-dimensionamento dos pórticos transversais foi feito de acordo com o AISC-LRFD (AISC,1993).

Após a obtenção dos esforços em cada barra do pórtico transversal para as diversas combinações de ações consideradas e verificação preliminar das seções transversais com base nos critérios do AISC-LRFD (AISC,1993), fez-se a verificação final das seções de acordo com os critérios da NBR8800 (ANBT,1986), com auxílio do programa computacional DESMET-Versão 2.08 (VERÍSSIMO et al.,1998).

Na Figura 4.27 apresentam-se os resultados da verificação preliminar de seções transversais realizada com auxílio do programa computacional SAP2000 para o pórtico com treliça trapezoidal (TP) com vão livre de 24 metros, com base nos critério do AISC-LRFD (AISC,1993). Os resultados apresentados nessa figura representam a relação 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 Último.

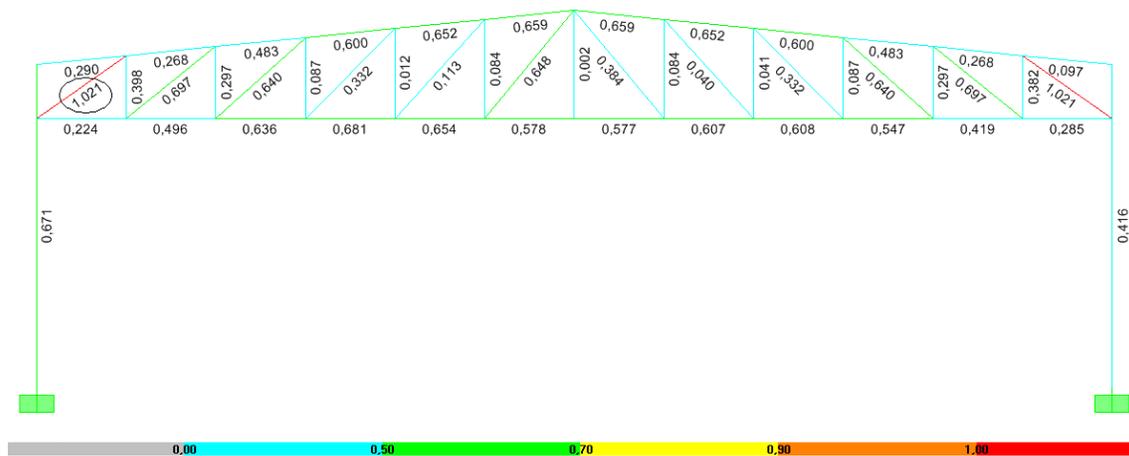


Figura 4.27 – Verificação preliminar de seções transversais do pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros, de acordo com os critérios da AISC-LRFD (AISC,1993)

Para cada elemento componente do pórtico transversal, o SAP2000 apresenta os resultados da verificação da seção transversal para todos os Estados Limite Últimos aplicáveis.

A título de exemplo, na Figura 4.28 mostra-se a verificação preliminar da seção transversal escolhida para uma diagonal da treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros, identificada por meio de um círculo na Figura 4.27. Esta barra apresenta uma relação $Nd/Rd = 1.021$ para a combinação crítica de ações (COMB1), de acordo com os critérios de verificação de seções do AISC-LRFD (AISC,1993).

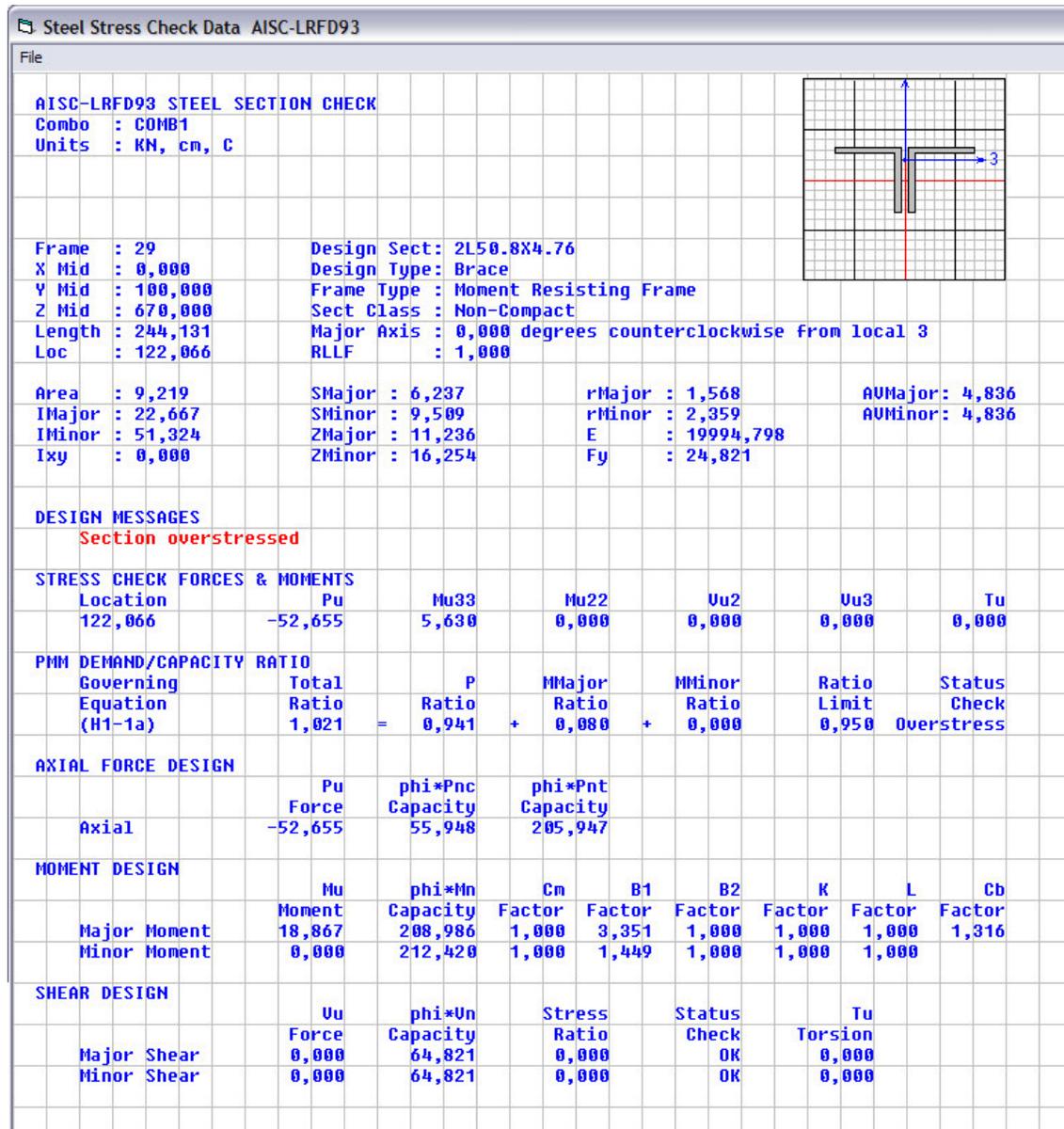


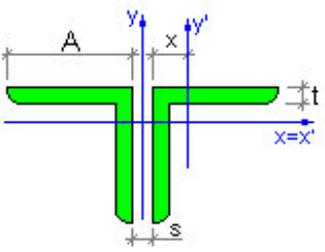
Figura 4.28 – Verificação preliminar de uma diagonal da treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros, identificada por meio de um círculo na Figura 4.27, no SAP2000

Uma vez obtidos os resultados da verificação preliminar de seções transversais a partir do SAP2000, procede-se a uma verificação final das seções com auxílio do programa computacional DESMET. Na Figura 4.29 mostra-se a verificação da mesma diagonal da treliça trapezoidal (TP) destacada na Figura 4.27.

Na Figura 4.29 pode-se observar que o esforço de cálculo (N_d) e os comprimentos de flambagem correspondem aos valores P_u e $Length$ indicados na verificação do SAP2000 (Figura 4.28). Para o caso em estudo, a relação N_d/R_d obtida através do programa computacional DESMET foi de 0,96, de acordo com os critérios da NBR8800 (ABNT,1986), o que valida a verificação preliminar realizada com auxílio do SAP2000, de acordo com os critérios do AISC-LRFD (AISC,1993).

Compressão

Cant. dupla de abas iguais em T



2 L 50,8x4,76
 $A = 50,80 \text{ mm}$
 $t = 4,76 \text{ mm}$
 $A_g = 9,16 \text{ cm}^2$
 $I_{x'} = I_{y'} = 11,70 \text{ cm}^4$
 $I_x = 23,40 \text{ cm}^4$
 $I_y = 49,87 \text{ cm}^4$
 $r_x = 1,60 \text{ cm}$
 $r_y = 2,33 \text{ cm}$

Massa linear = 7,19 kg/m

espaçamento
 $S = 5 \text{ mm}$

esforço
 $N_d = 52,65 \text{ kN}$

comp. de flambagem
 $L_{flx} = 244,00 \text{ cm}$
 $L_{fly} = 244,00 \text{ cm}$
 $L_{flz} = 244,00 \text{ cm}$

Resultados

$R_d = 54,80 \text{ kN}$	$f_{ex} = 8,68 \text{ kN/cm}^2$	$Q = 1,00$	esbeltezes
$N_d / R_d = 0,96$	$f_{ez} = 62,82 \text{ kN/cm}^2$	$\lambda = 1,70$	$L_{flx}/r_x = 152,66$
Ok!	$f_{eyz} = 17,39 \text{ kN/cm}^2$	$\rho = 0,27$	$L_{fly}/r_y = 104,57$

Catálogo: GERDAU

Registra Ok Ajuda

Figura 4.29 – Verificação final de uma diagonal da treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros, identificada por meio de um círculo na Figura 4.27, no DESMET

5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Considerações Preliminares

Neste Capítulo apresentam-se as taxas de consumo de aço e os deslocamentos máximos obtidos para todos os modelos considerados no estudo paramétrico. Mostra-se também uma análise comparativa das taxas de consumo de aço para as diversas tipologias e vãos livres dos pórticos transversais.

Como descrito no Capítulo 2, vários autores utilizam a taxa de consumo de aço como critério inicial para avaliar e, até mesmo, comparar tipologias estruturais. No presente estudo optou-se também por utilizar a taxa de consumo de aço como parâmetro comparativo. Além disso, fez-se uma comparação dos deslocamentos verticais e horizontais dos pórticos transversais.

Após o processo de análise e dimensionamento dos modelos, mostrado no Capítulo 4, elaborou-se uma lista de material com as informações básicas sobre os perfis usados na composição de cada modelo do estudo a partir da qual determina-se a taxa de consumo de aço do galpão.

5.2. Representação dos Resultados do Estudo Paramétrico

Tendo em vista a quantidade de modelos estudados e, conseqüentemente, as diversas listas de material geradas, optou-se por apresentar os resultados de somente um modelo.

Na Tabela 5.1 mostra-se a lista de material elaborada para um modelo de pórtico com treliça trapezoidal (TP) com vão livre de 24 metros, obtida após análise e dimensionamento dos elementos estruturais. A análise e a verificação de seções desse mesmo modelo foram descritas no Capítulo 4.

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;
- quantidade de peças;
- comprimento total;
- peso total do pórtico transversal.

No fim da Tabela indica-se o peso total do pórtico, a sua área de influência e a taxa de consumo de aço.

Tabela 5.1 – Lista de material para pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 24 metros

Lista Material TP-24				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kg
2L50.8X3.17	Diag2	8	23,23	113,80
2L50.8X4.76	Diag1	4	10,01	72,40
2L38.1X4.76	Montante	11	20,40	108,90
CVE250X31	Coluna	2	14,40	442,09
TE75X10.5	Banzos	4	48,12	504,11
Peso Total				1241,30
Área Influência (24*6)				144,00
Taxa (kg/m²)				8,62

Na Figura 5.1 mostra-se o arranjo final de seções transversais do pórtico com treliça trapezoidal (TP) com vão livre de 24 metros, após conclusão das etapas de análise e dimensionamento.

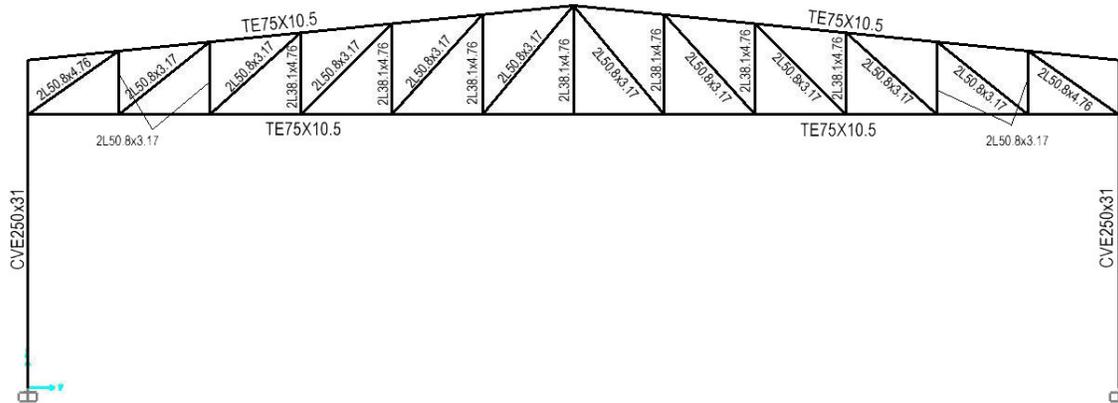


Figura 5.1 – Seções transversais dos elementos que compõem o pórtico com treliça trapezoidal (TP) com vão livre de 24 metros

5.3. Comparativo da Taxa de Consumo de Aço

Neste item apresenta-se a análise comparativa das taxas de consumo de aço para as diversas tipologias consideradas no estudo paramétrico, com vãos livres de 16, 20, 24, 28 e 32 metros. Nos gráficos apresentados utiliza-se a mesma identificação para as cinco tipologias distintas de pórtico transversal conforme definido no Capítulo 3:

- 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

5.3.1 – Variação da Taxa de Consumo de Aço para um Mesmo Vão Livre

Nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam-se as taxas de consumo de aço para os vãos livres de 16, 20, 24, 28 e 32 metros em função das tipologias estudadas. Na Figura 5.7 apresenta-se uma sobreposição dos resultados para os diferentes vãos livres considerados.

Em cada gráfico representam-se os resultados para as duas opções de composição dos banzos superiores e inferiores da treliça (perfis tipo TE eletro-soldado e cantoneira dupla). Para as vigas de cobertura do pórtico de alma cheia foi avaliada uma única solução em perfil

tipo I eletro-soldado. Por este motivo, as duas séries de cada gráfico sempre coincidem no ponto correspondente ao pórtico de alma cheia (AC).

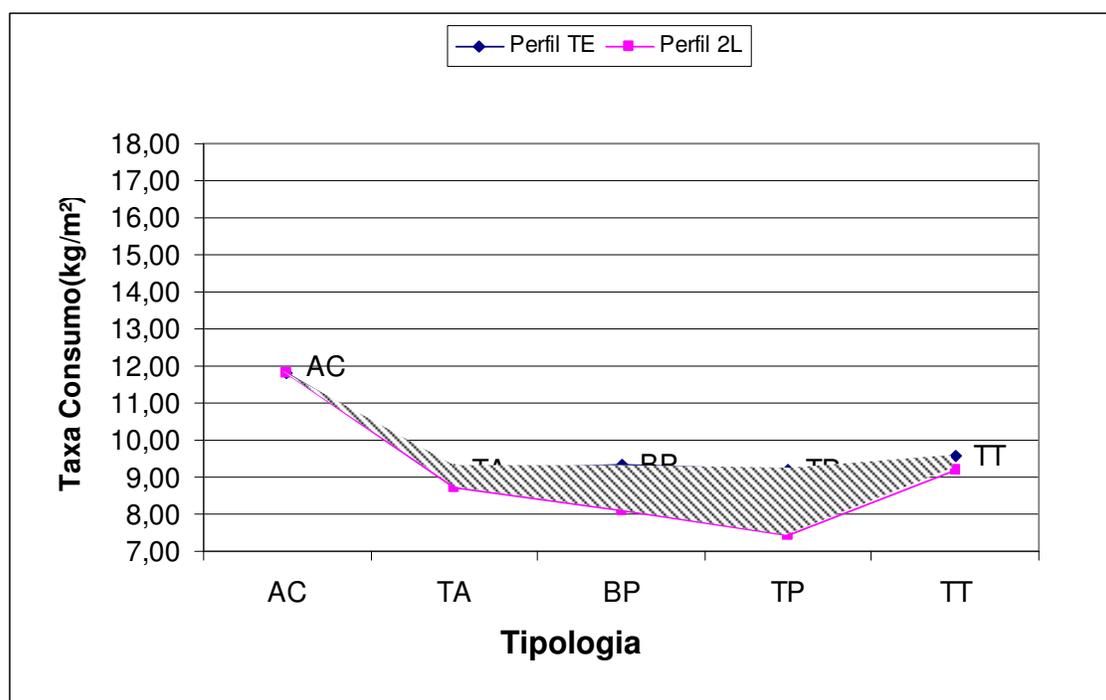


Figura 5.2 – Taxa de consumo aço para vão livre de 16 metros

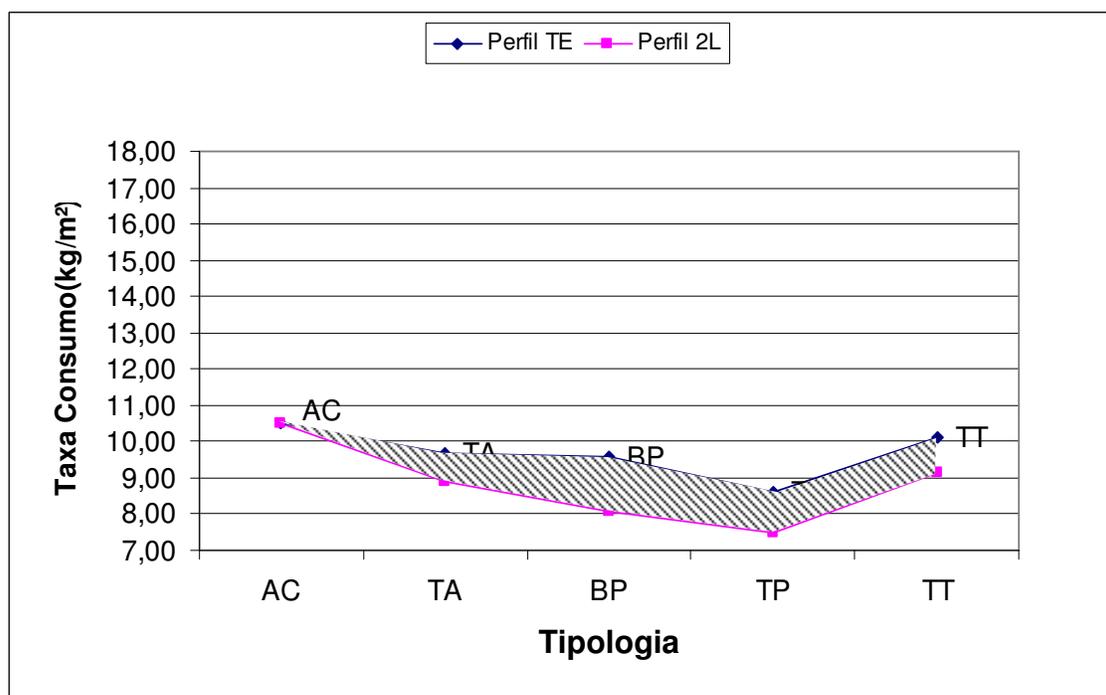


Figura 5.3 – Taxa de consumo aço para vão livre de 20 metros

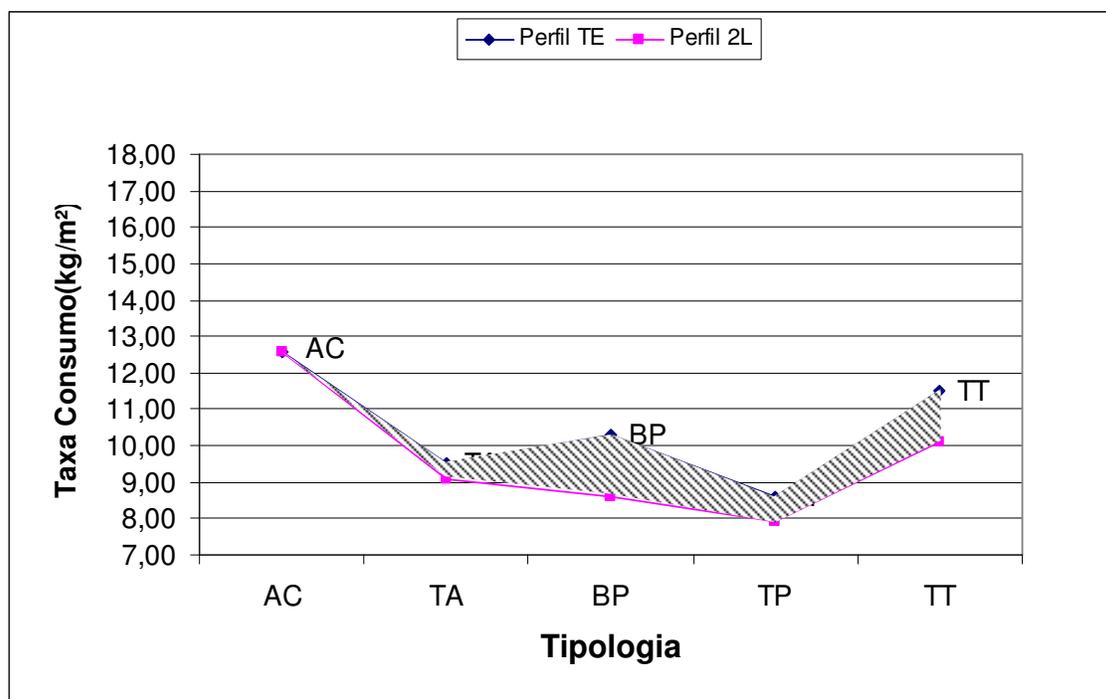


Figura 5.4 – Taxa de consumo aço para vão livre de 24 metros

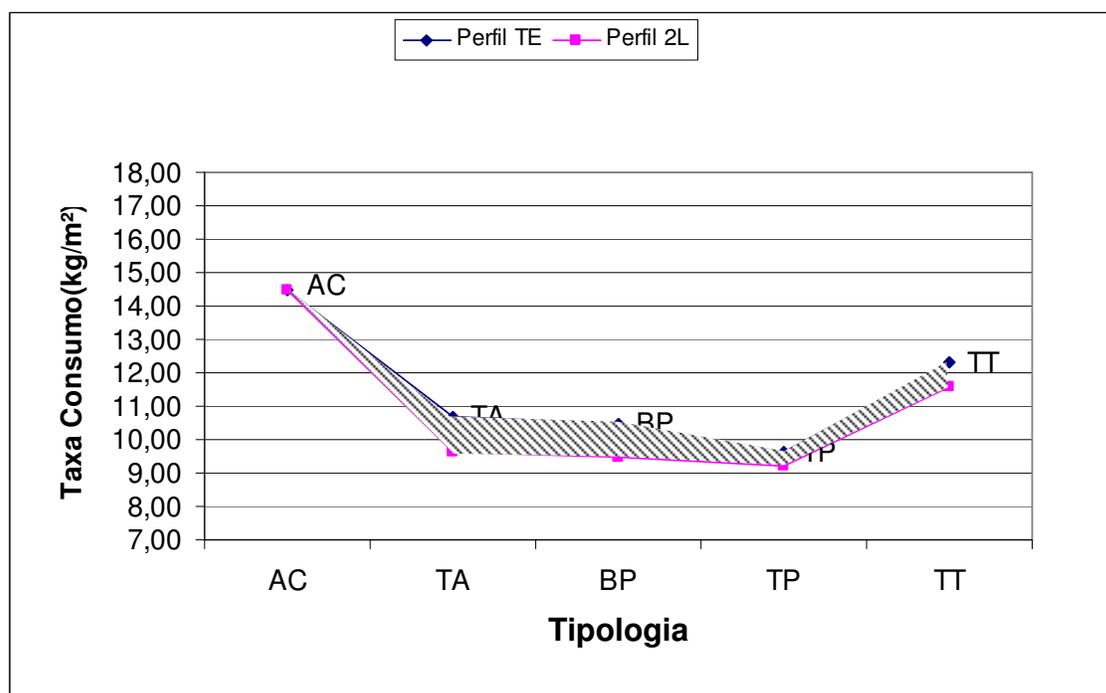


Figura 5.5 – Taxa de consumo aço para vão livre de 28 metros

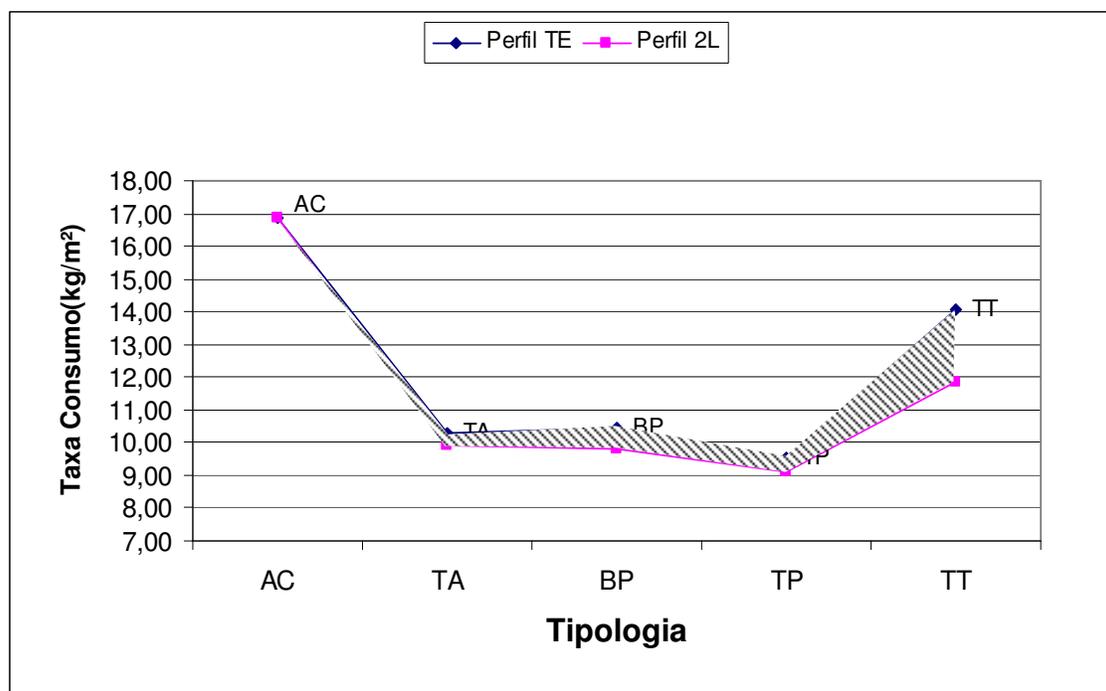


Figura 5.6 – Taxa de consumo aço para vão livre de 32 metros

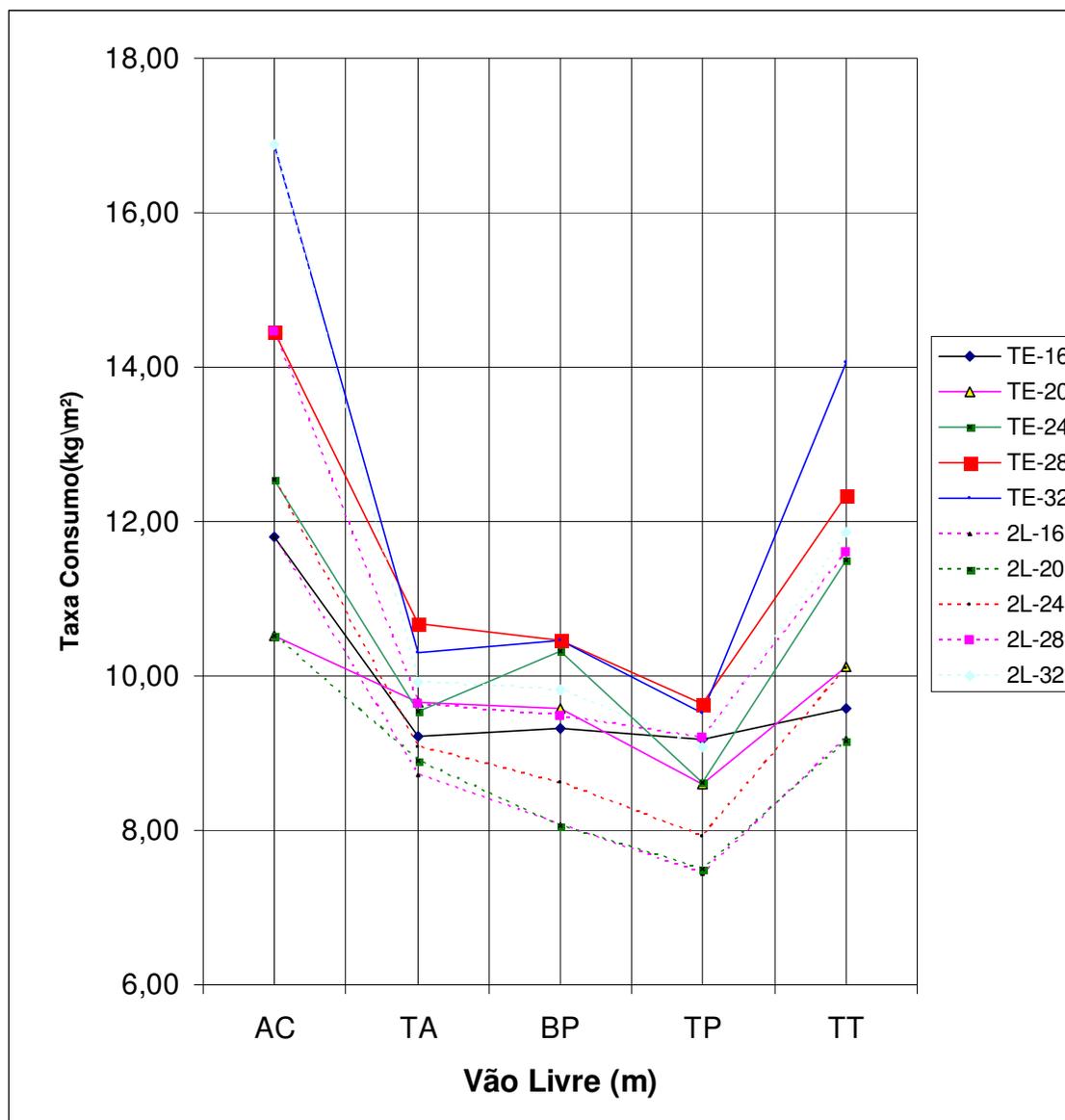


Figura 5.7 – Taxa de consumo aço para os vãos livres considerados, em função das tipologias

Como pode-se observar, em todos os gráficos (Figuras 5.2 a 5.6), as taxas de consumo de aço para os pórticos compostos por cantoneira dupla são sempre inferiores àquelas obtidas para os pórticos compostos por perfil TE eletro-soldado.

Isto está relacionado ao “salto de bitolas” dos perfis eletro-soldados, ou seja, existem poucas opções de bitolas para perfis TE eletro-soldados de pequenas dimensões. Por esse motivo, quando um determinado perfil TE chega ao seu limite de resistência para certa condição de carregamento e é necessário utilizar uma bitola maior, o próximo perfil é muito maior do que o anterior. Neste trabalho este fato foi chamado de “salto de bitola”.

Com a cantoneira dupla não ocorre o “salto de bitola” porque existe uma grande variação de espessuras para uma mesma dimensão externa da cantoneira. Comparativamente, para cada salto de bitola do perfil TE existem, em média, quatro possibilidades de bitola do perfil em cantoneira.

Com respeito à variação da taxa de consumo de aço para um mesmo vão livre, observa-se que existe pouca variação entre os resultados dos pórticos com treliças TA, BP e TP. Observa-se também que a taxa de consumo de aço da treliça triangular é sempre maior que as outras tipologias treliçadas, mas não supera a taxa de consumo obtida para os pórticos de alma cheia.

Com base na Figura 5.7, observa-se que as taxas de consumo de aço apresentam a mesma tendência de variação para todos os vãos livres, em função das tipologias estudadas.

Em função dessas análises observa-se que o modelo formado por pórtico com treliça trapezoidal (TP) apresenta uma ligeira vantagem em relação aos demais modelos, visto que em todos os gráficos a taxa de consumo de aço é menor do que a das demais tipologias. Em contrapartida, os modelos formados por pórticos de alma cheia apresentam taxas de consumo de aço superior às demais, seguido pelo modelo de pórtico com treliça triangular.

5.3.2 – Variação da Taxa de Consumo de Aço para uma Mesma Tipologia

Nas Figuras 5.8 a 5.12 apresentam-se as taxas de consumo de aço para as diversas tipologias estudadas em função do vão livre do pórtico transversal. Na Figura 5.13 apresenta-se uma sobreposição dos resultados para todas as tipologias consideradas.

Para os pórticos treliçados, em cada gráfico apresentam-se os resultados para as duas opções de composição dos banzos superiores e inferiores da treliça (perfil tipo TE eletro-soldado e cantoneira dupla). Para os pórticos de alma cheia foi avaliada uma única solução em perfis tipo I eletro-soldado.

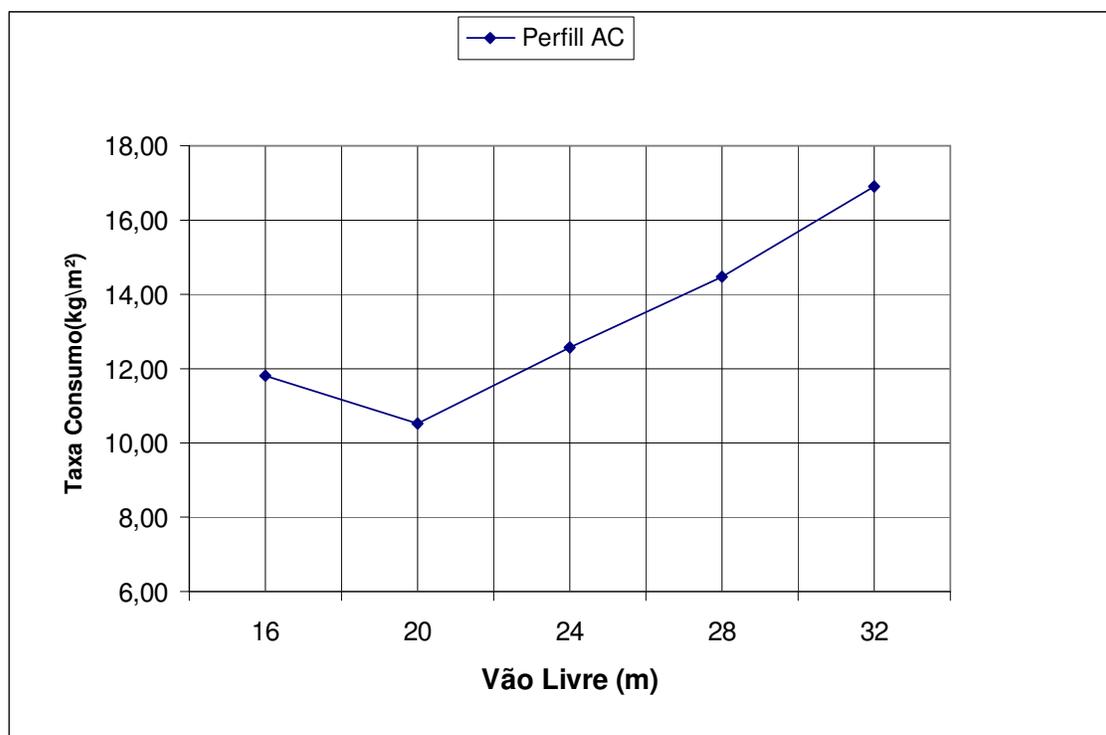


Figura 5.8 – Taxa de consumo de aço para pórtico de alma cheia (AC)

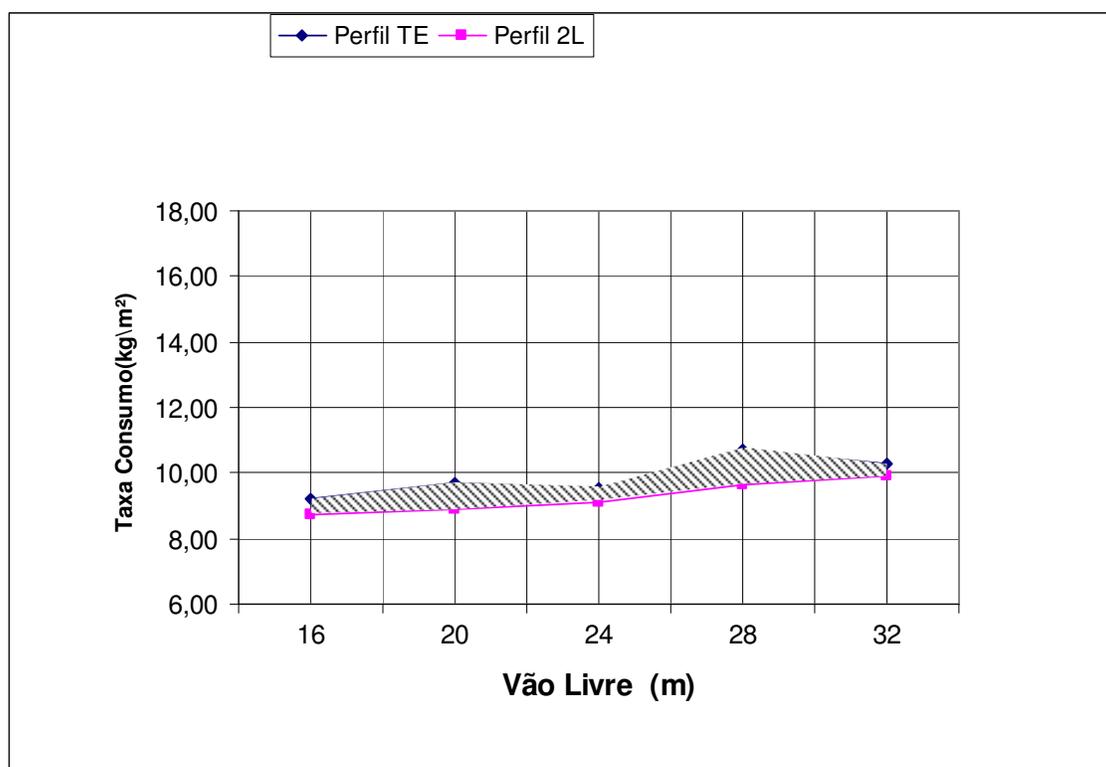


Figura 5.9 – Taxa de consumo de aço para pórtico com treliça em arco (TA)

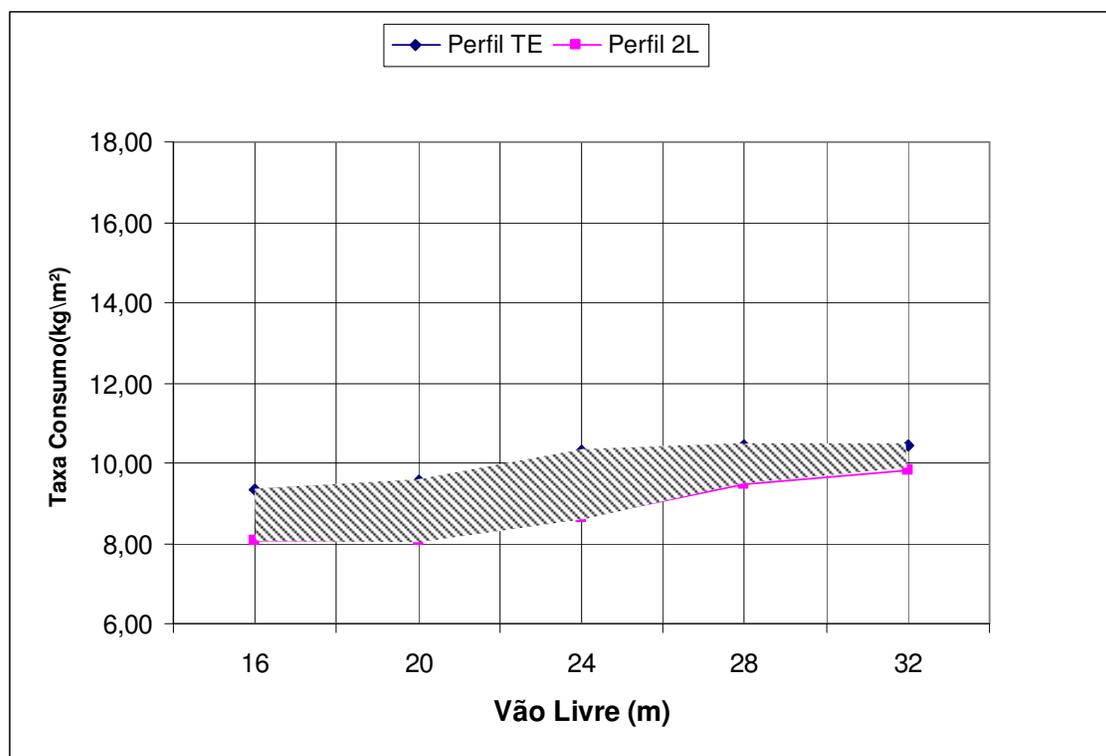


Figura 5.10 – Taxa consumo de aço para pórtico com treliça de banzos paralelos (BP)

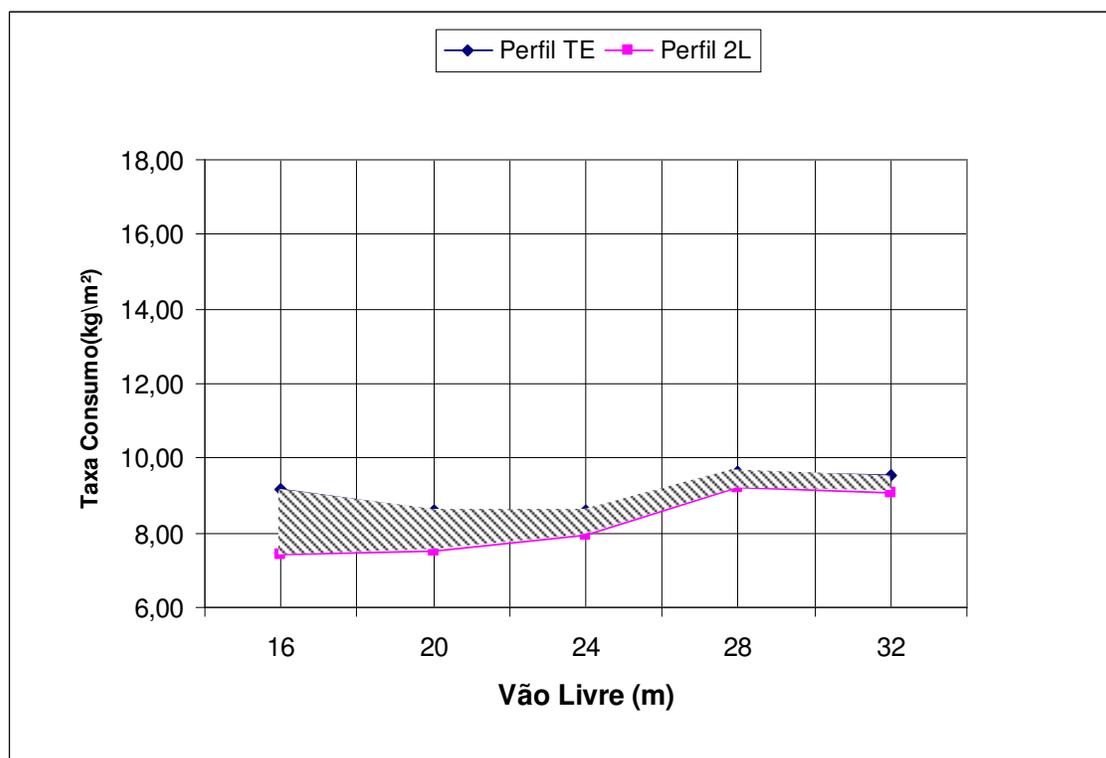


Figura 5.11 – Taxa de consumo de aço para pórtico com treliça trapezoidal (TP)

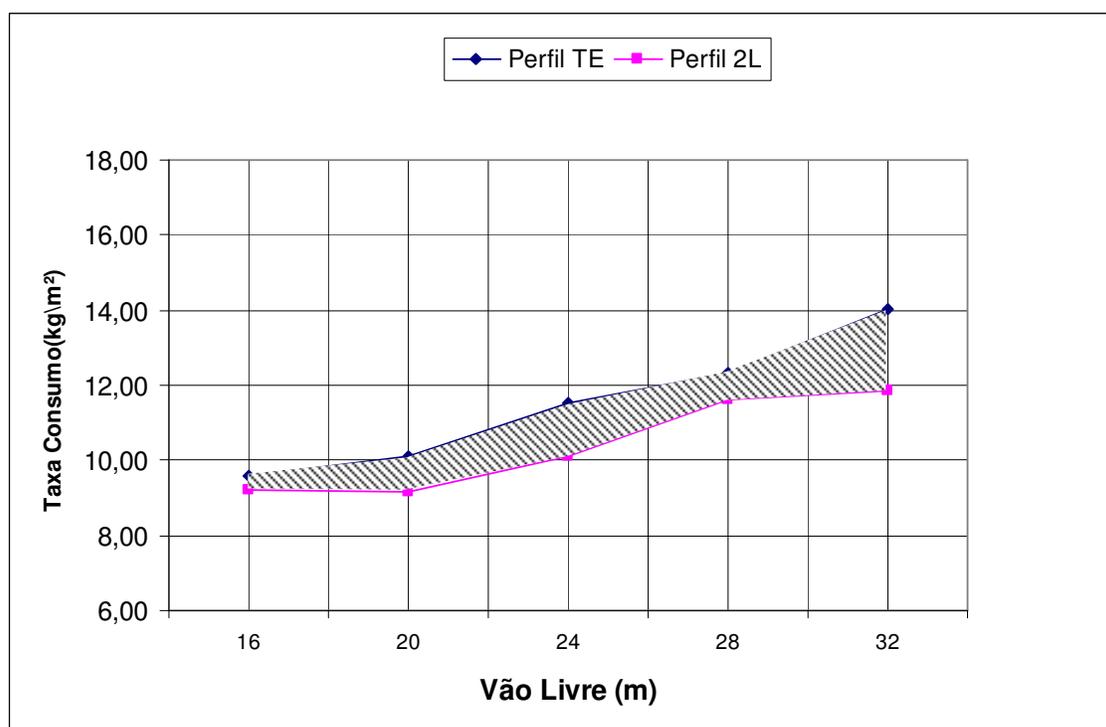


Figura 5.12 – Taxa de consumo de aço para pórtico com treliça triangular (TT)

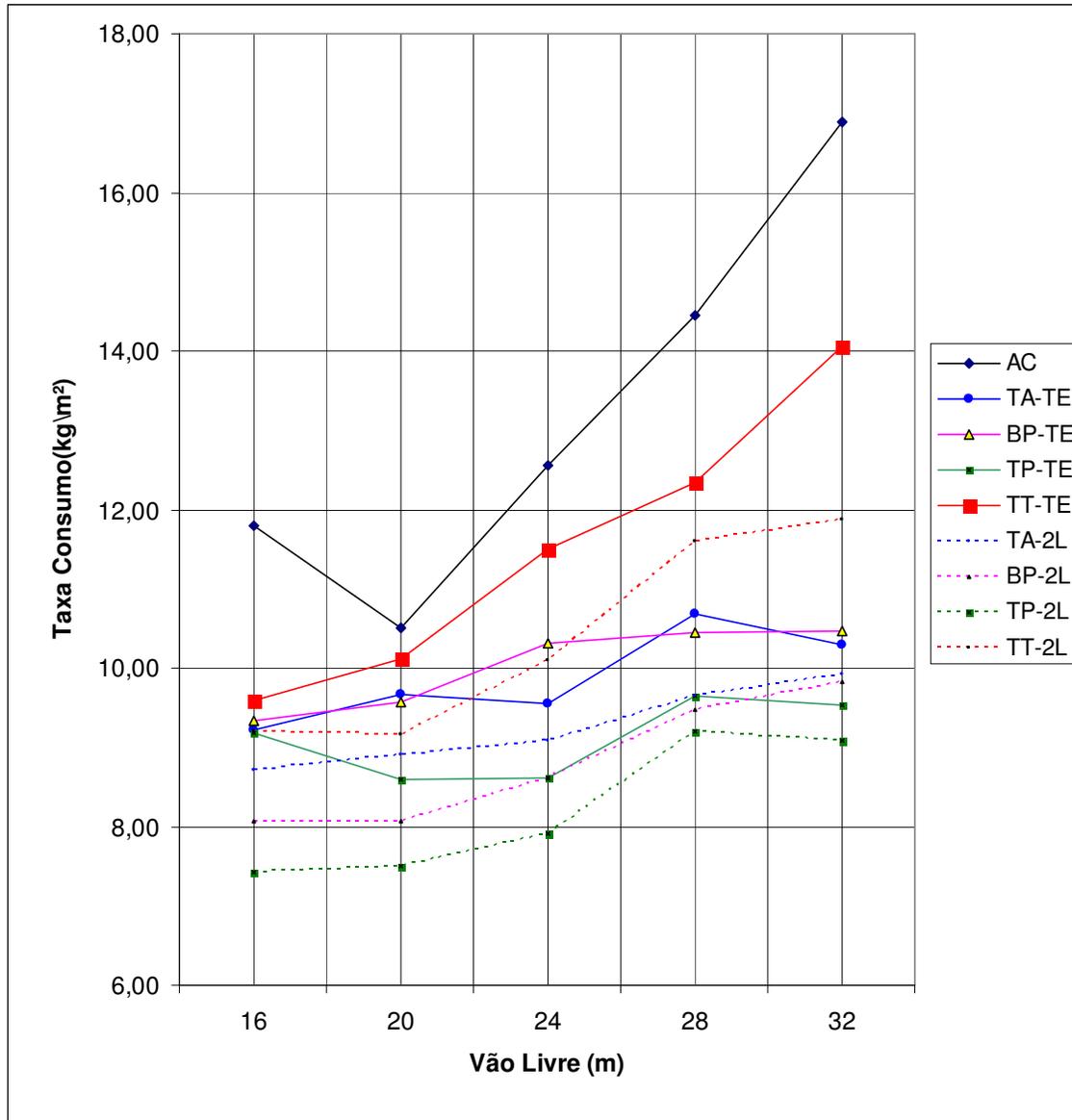


Figura 5.13 – Taxa de consumo aço para as tipologias de pórtico transversal consideradas, em função do vão livre

Com base na Figura 5.13 pode-se observar o desempenho das tipologias estudadas em função da variação do vão livre. Nota-se que a tipologia do pórtico transversal exerce maior influência à medida que aumenta o vão livre.

Com respeito à variação da taxa de consumo de aço para uma mesma tipologia, observa-se uma tendência de aumento da taxa com o aumento do vão livre, para todos os pórticos com treliças TA, BP e TP. O aumento da taxa de consumo é muito mais expressivo nos casos de pórticos com treliça triangular (TT) e alma cheia (AC).

Em função dessas análises observa-se que o pórtico de alma cheia apresenta maiores taxas de consumo de aço, seguido pelo pórtico formado por treliça triangular. O pórtico com treliça trapezoidal se sobressai com relação às demais tipologias.

Na Figura 5.11 apresenta-se a variação da taxa de consumo de aço para o pórtico com treliça trapezoidal. Observa-se que para o modelo com vão livre de 16 metros a taxa de consumo de aço é maior do que para o modelo com vão livre de 20 metros. Este resultado é influenciado pela bitola mínima do perfil TE eletro-soldado (TE75x10,5), que é utilizada tanto para o modelo de 16 metros, quanto para o modelo de 20 metros, levando a uma taxa de consumo maior no primeiro caso.

A taxa de consumo de aço para o modelo com vão livre de 16 metros também sofre influência da limitação de deslocamentos horizontais definida na NBR8800 (ABNT,1986). Em virtude dessa limitação foi necessário utilizar o mesmo perfil para as colunas dos modelos com 16 e 20 metros, apesar do modelo de 16 metros requerer um perfil mais leve na verificação da resistência. Ou seja, foi utilizado um perfil com uma folga de resistência em torno de 79% devido à imposição do deslocamento horizontal máximo. Isto ocorre também para pórtico de alma cheia com vão livre de 16 metros (Figura 5.8). No item 5.4 deste Capítulo apresenta-se uma discussão detalhada sobre os deslocamentos máximos recomendados e os resultados de deslocamentos dos modelos analisados.

De acordo com as Figuras 5.9 a 5.12 observa-se que as taxas de consumo de aço para os pórticos compostos por cantoneira dupla são sempre inferiores àquelas obtidas para os pórticos compostos por perfil TE eletro-soldado. Como comentado no item 5.3.1, esses resultados são influenciados pelo “salto de bitolas” dos perfis tipo TE eletro-soldado.

Em função da Figura 5.13, nota-se que os resultados dos pórticos treliçados formados por perfil TE com vão livre de 16 metros são muito próximos entre si devido à limitação de bitola mínima, ao contrário dos pórticos treliçados formados por perfil em cantoneira dupla.

Nas Figuras 5.14 a 5.18 apresenta-se um ajuste de curvas para a variação da taxa de consumo de aço para as diversas tipologias em função do vão livre do pórtico transversal.

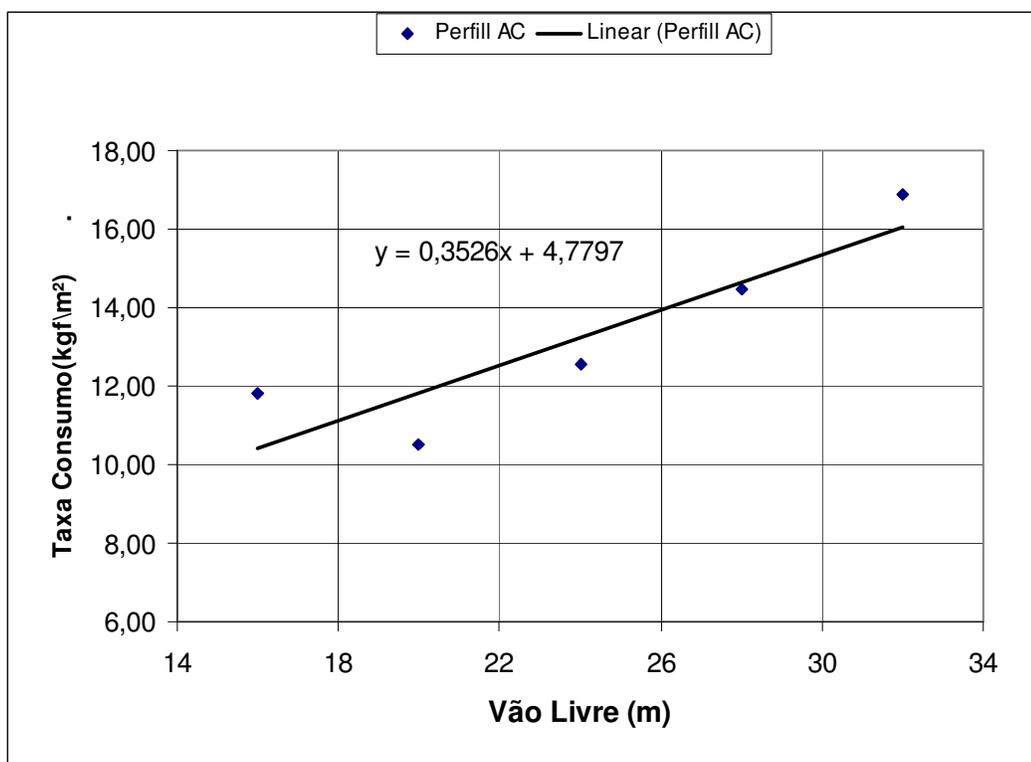


Figura 5.14 – Linha de tendência de consumo de aço para pórtico de alma cheia

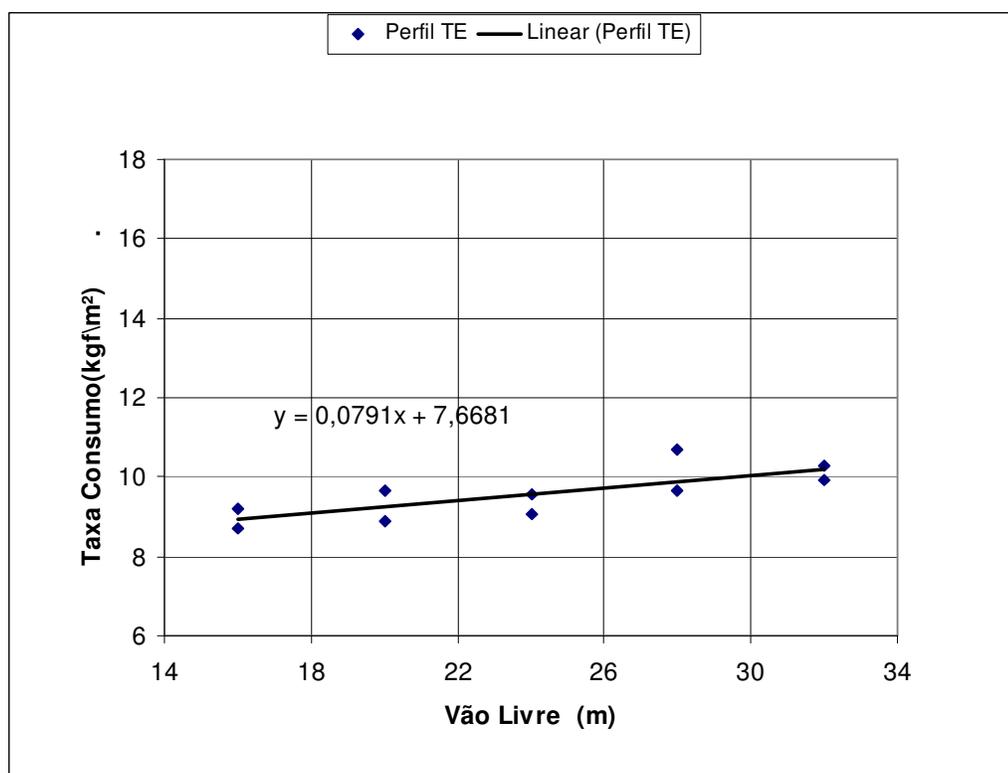


Figura 5.15 – Linha de tendência de consumo de aço para pórtico com treliça em arco

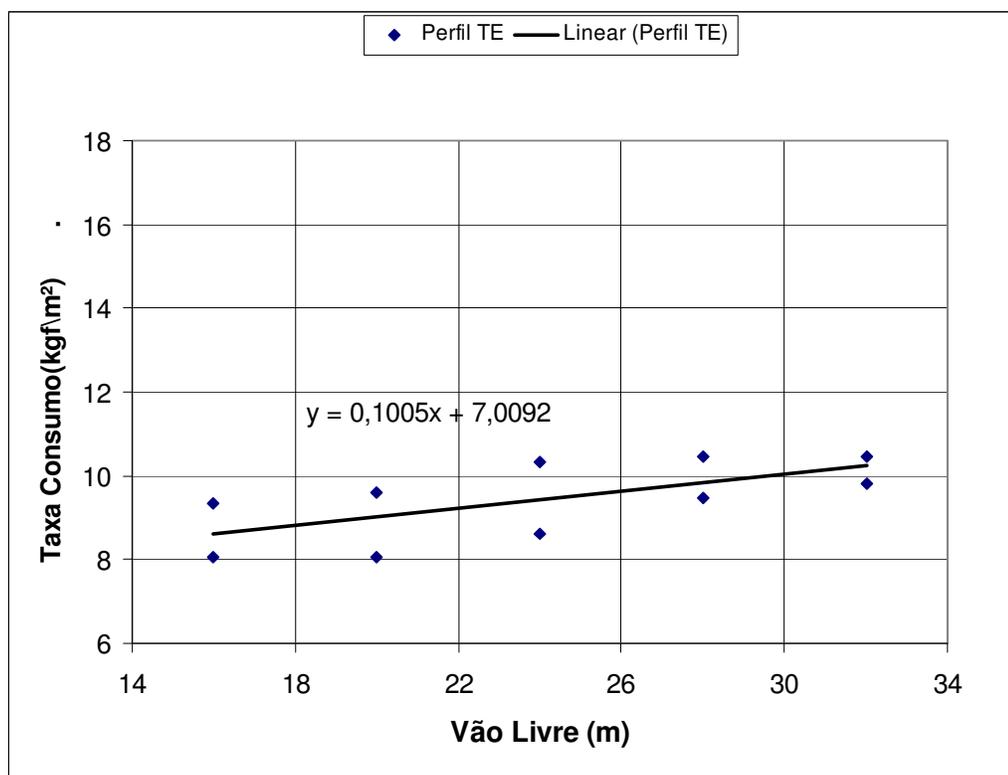


Figura 5.16 – Linha de tendência de consumo de aço para pórtico com treliça de banzos paralelos

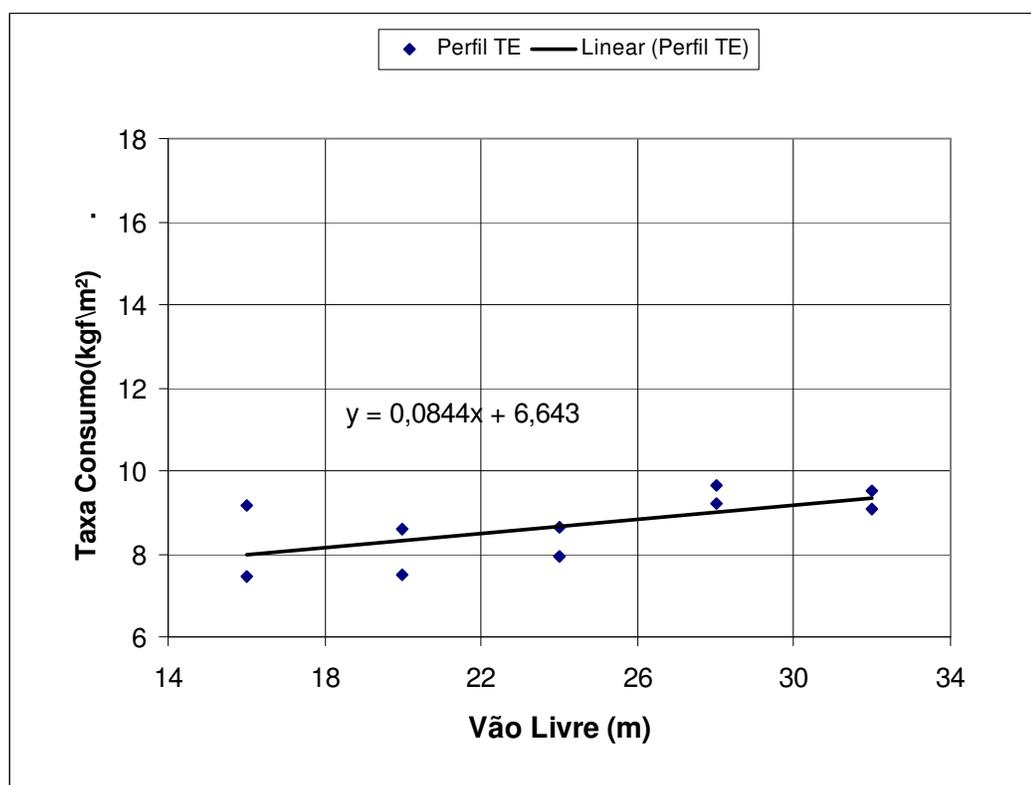


Figura 5.17 – Linha de tendência de consumo de aço para pórtico com treliça trapezoidal

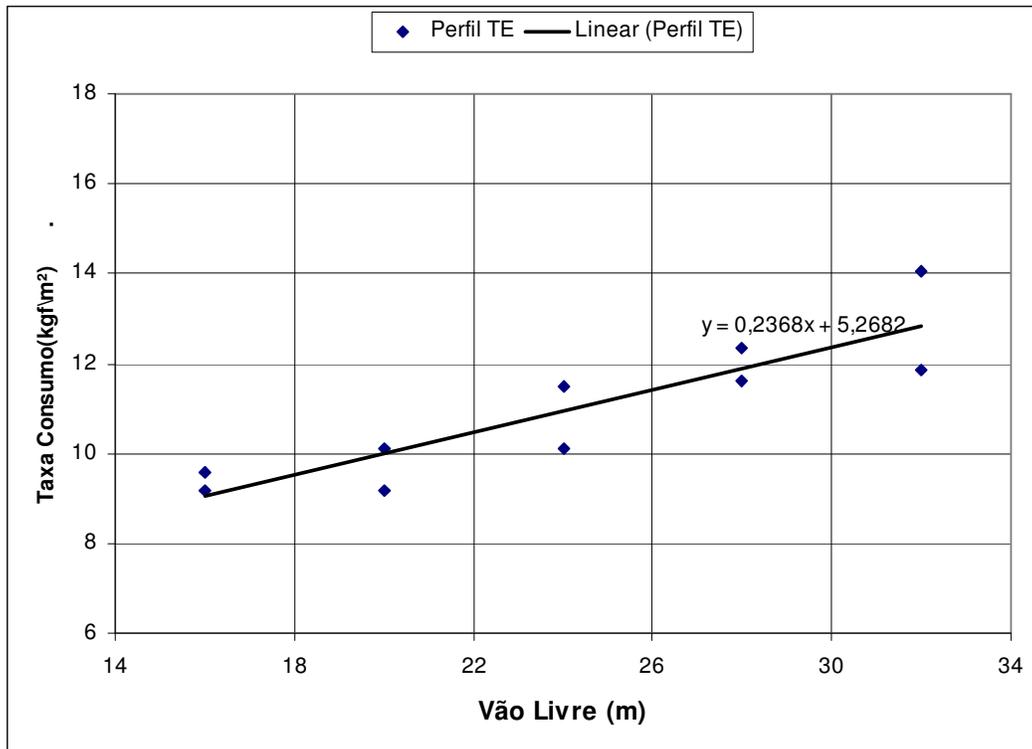


Figura 5.18 – Linha de tendência de consumo de aço para pórtico com treliça triangular

5.4. Deslocamentos dos Pórticos Transversais

O Anexo C da NBR8800 (ABNT, 1986) prescreve os valores máximos de deslocamentos elásticos verticais e horizontais para as estruturas. Esses deslocamentos máximos são utilizados para verificar o Estado Limite de Utilização de deslocamentos excessivos da estrutura.

Em galpões industriais deve-se verificar os deslocamentos verticais no meio do vão da viga de cobertura (ΔV) (Figura 5.19) e o deslocamentos horizontais no topo da coluna (ΔH) (Figura 5.20).

Normalmente, em galpões industriais os deslocamentos horizontais são causados pela movimentação de ponte rolante e pelo vento que atua na direção transversal do galpão. Os deslocamentos verticais são causados geralmente pelos carregamentos devidos ao vento, peso próprio e sobrecarga.

No caso dos deslocamentos verticais pode-se ou não considerar a utilização de uma contraflecha na viga de cobertura medida no meio do vão.

Segundo o Anexo C da NBR8800 (ABNT, 1986), o deslocamento horizontal máximo (ΔH) para edifícios industriais é de $H/400$ a $H/200$, onde H é a altura total da coluna. O deslocamento vertical máximo (ΔV) é de $L/180$, sendo L o vão teórico entre apoios.

Neste trabalho são considerados quatro casos de carga, conforme mostrado no Capítulo 4. 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 5.19 e 5.20 são mostradas as deformadas típicas de um modelo de pórtico transversal com treliça trapezoidal (TP-24). Para cada caso indica-se a posição onde devem ser verificados os deslocamentos máximos verticais e horizontais.

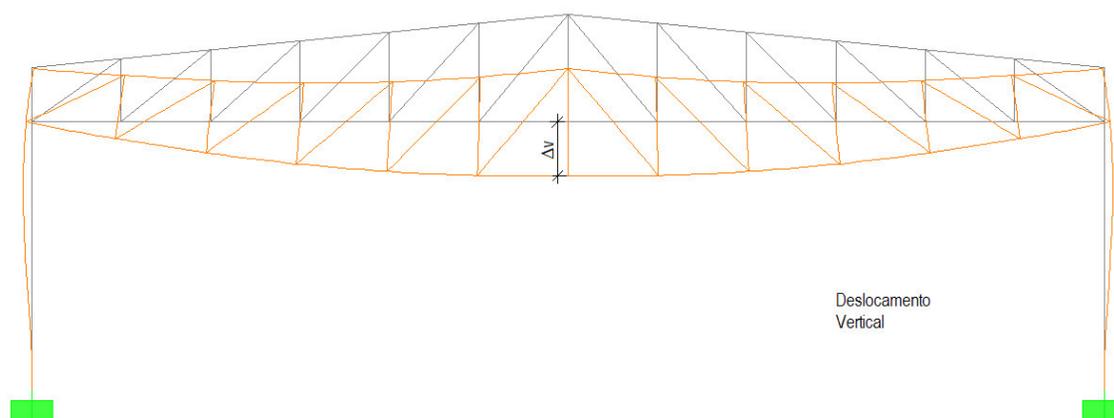


Figura 5.19 – Deslocamento vertical típico de um pórtico com treliça trapezoidal (TP)

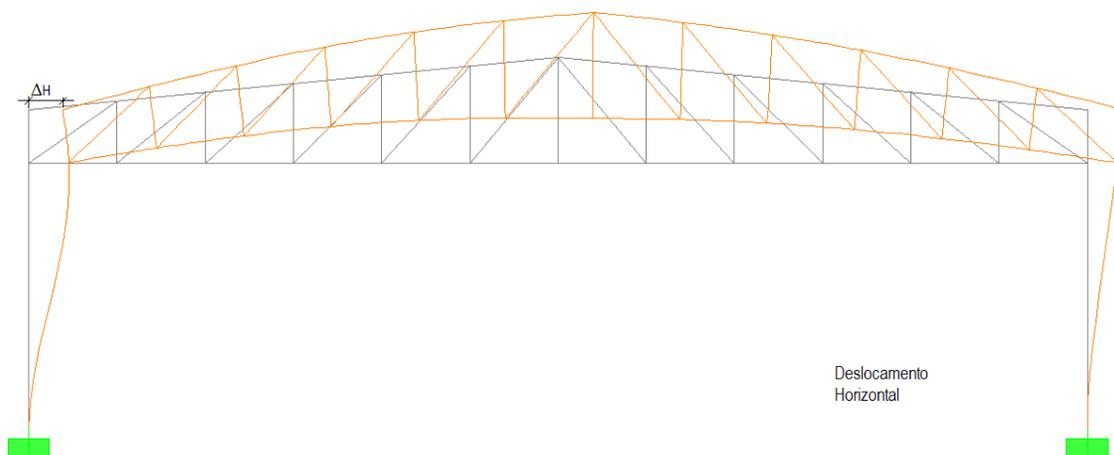


Figura 5.20 – Deslocamento horizontal típico de um pórtico com treliça trapezoidal (TP)

5.4.1. Deslocamentos para uma Mesma Tipologia

Para verificação do deslocamento vertical máximo em edifícios industriais, no Anexo C da NBR8800 (ABNT,1986) recomenda-se considerar a sobrecarga de cobertura e se estabelece um valor máximo de $L/180$ para o caso de estruturas biapoiadas suportando elementos de cobertura elásticos. Admitindo-se que atualmente tem sido comum não se utilizar contraflecha nas vigas de cobertura, considera-se uma combinação de peso próprio e sobrecarga ($COMB4 = G + Q$) para essa verificação.

Para verificação do deslocamento horizontal máximo, neste trabalho considera-se o critério indicado no Anexo C da NBR8800 (ABNT,1986), que recomenda levar em conta a ação do vento e estabelece um valor máximo médio de $H/300$.

Nas Figuras 5.21 a 5.25 apresentam-se os deslocamentos máximos horizontais (ΔH) e verticais (ΔV) para as diversas tipologias de pórtico transversal consideradas em função do vão livre.

Para os pórticos treliçados são apresentados quatro gráficos por tipologia. Os dois primeiros se referem aos deslocamentos horizontais e verticais para vigas de cobertura compostas por perfil TE eletro-soldado e os dois últimos para as compostas por cantoneira dupla.

A - Deslocamentos dos pórticos de alma cheia

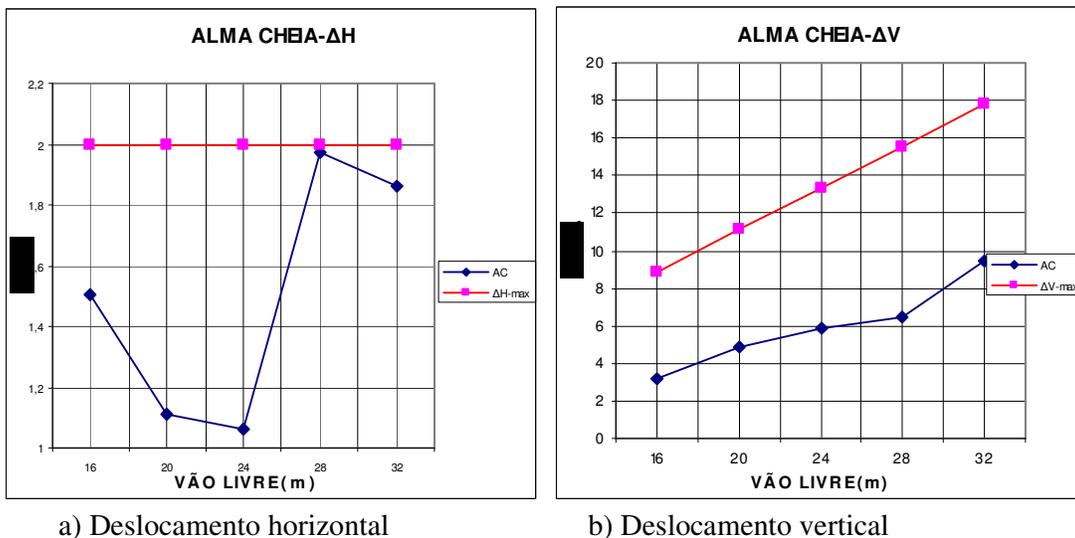


Figura 5.21 – Deslocamentos do pórtico de alma cheia

B - Deslocamentos dos pórticos com treliça em arco

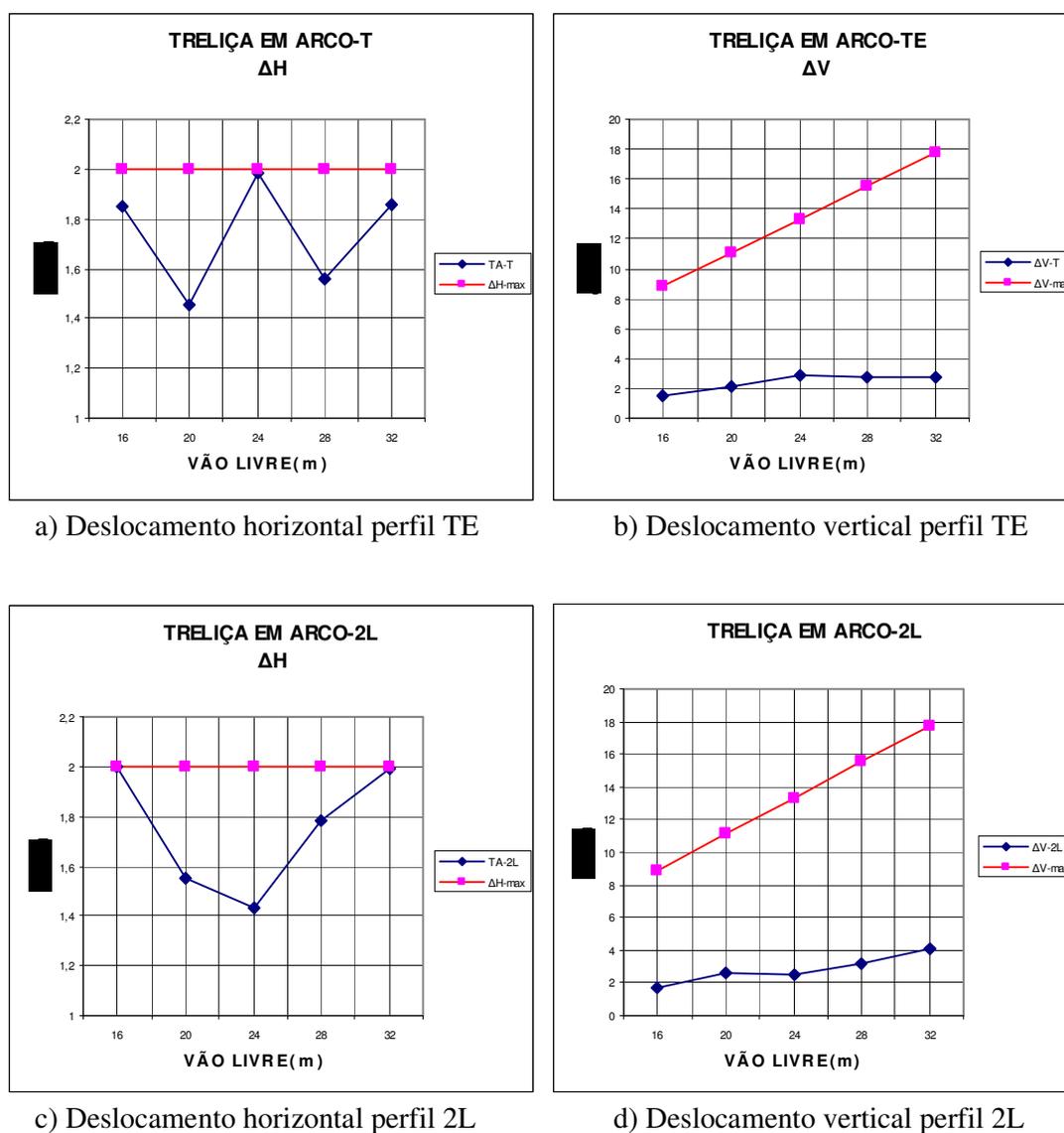


Figura 5.22 – Deslocamentos do pórtico com treliça em arco

C - Deslocamentos dos pórticos com treliça de banzos paralelos

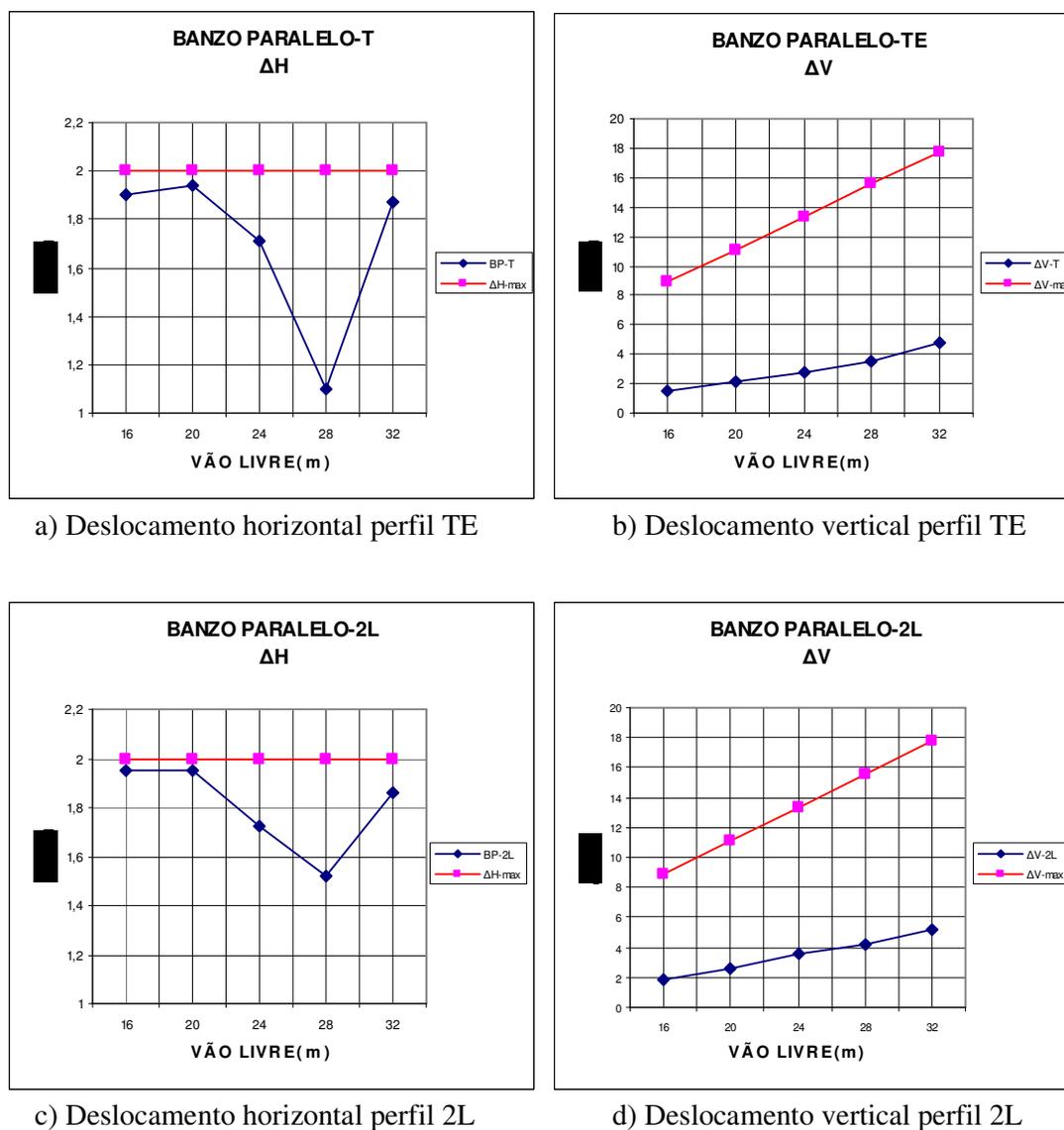
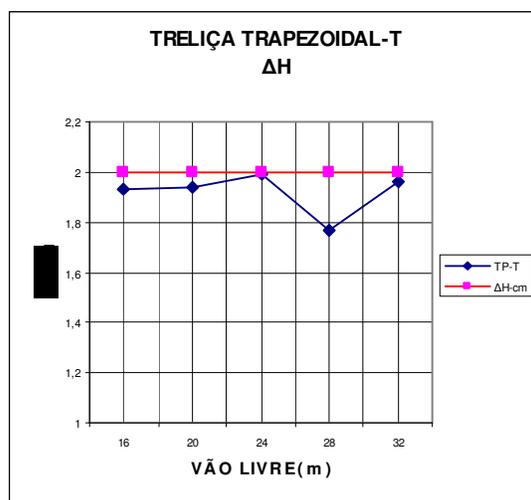
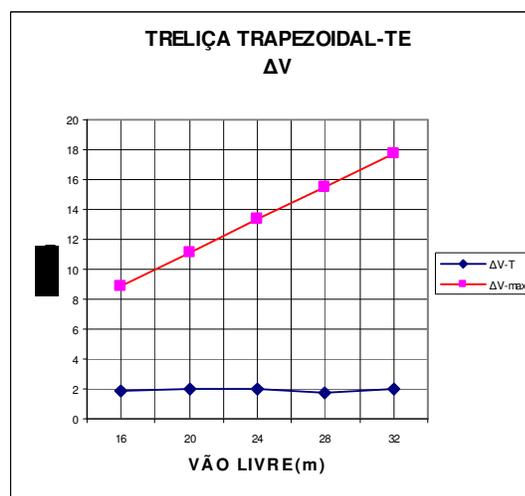


Figura 5.23 – Deslocamentos do pórtico com treliça de banzos paralelos

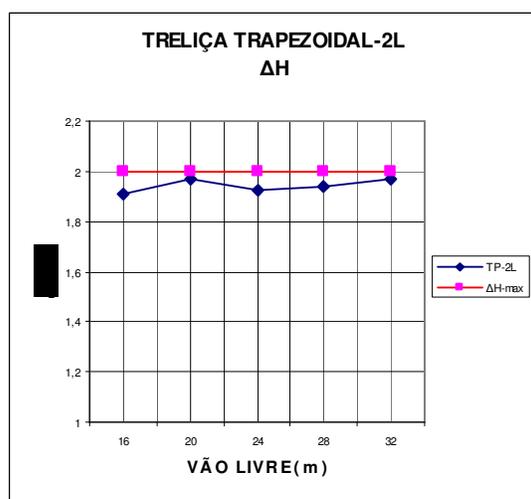
D - Deslocamentos dos pórticos com treliça trapezoidal



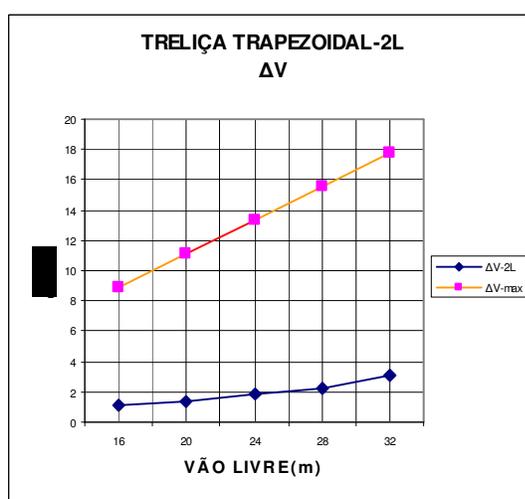
a) Deslocamento horizontal perfil TE



b) Deslocamento vertical perfil TE



c) Deslocamento horizontal perfil 2L



d) Deslocamento vertical perfil 2L

Figura 5.24 – Deslocamentos do pórtico com treliça trapezoidal

E - Deslocamentos dos pórticos com treliça triangular

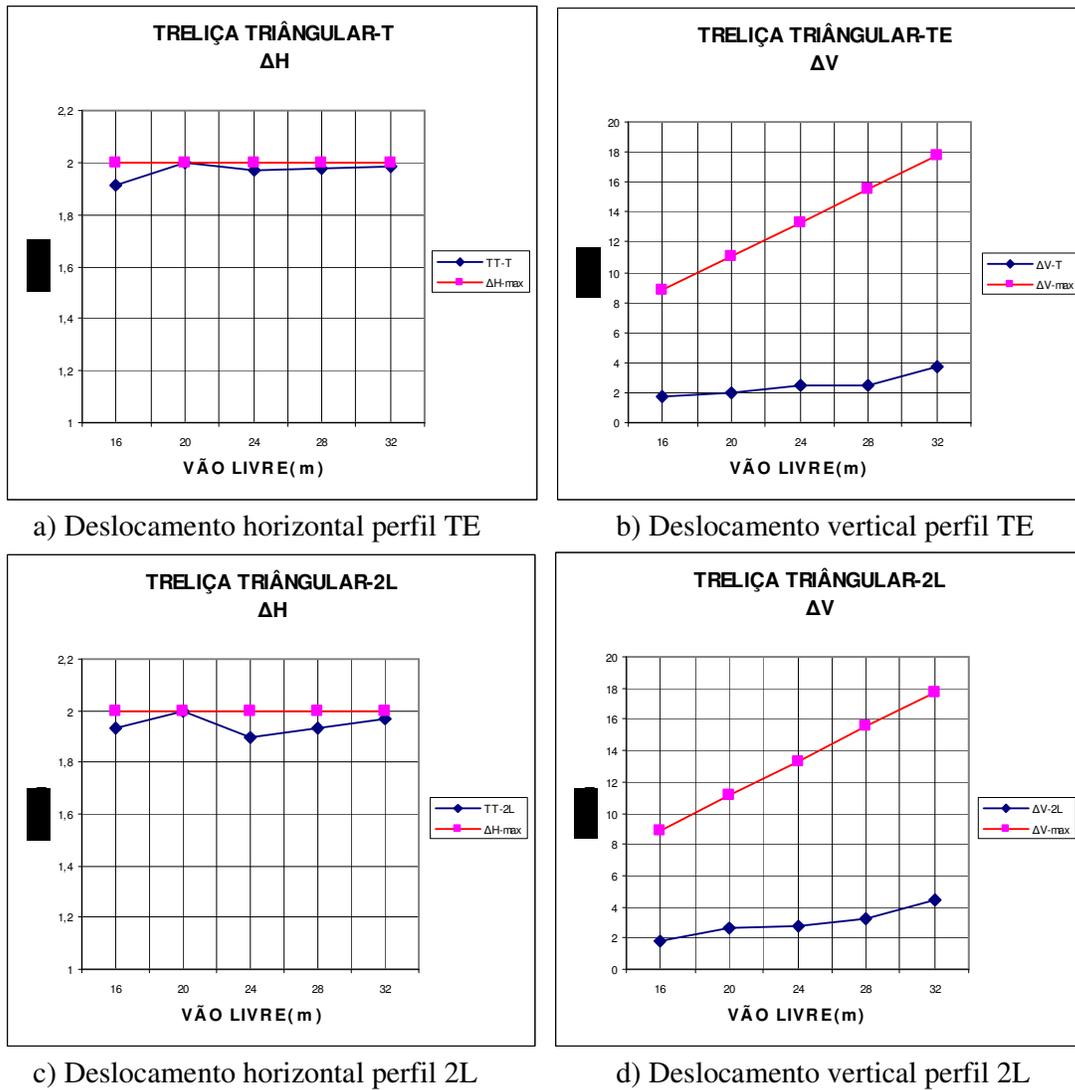


Figura 5.25 – Deslocamentos do pórtico com treliça triangular

Em todos os gráficos (Figuras 5.21 a 5.25) pode-se observar que os deslocamentos máximos horizontais e verticais não ultrapassam os valores limites em todos os modelos analisados. Isto demonstra que todos os modelos atendem ao Estado Limite de Utilização de deslocamentos excessivos da estrutura, de acordo com as recomendações da NBR8800 (ABNT, 1986).

Como o deslocamento horizontal máximo é função da altura da coluna e como todos os modelos apresentam mesma altura da coluna (6 metros), as séries referentes aos deslocamentos horizontais máximos formam uma linha horizontal. Por outro lado, como o deslocamento vertical máximo é função do vão livre da viga de cobertura e como há uma variação do vão livre no estudo, os valores limite formam uma linha inclinada..

5.4.2 – Comparativo dos Deslocamentos Verticais para Todas as Tipologias

Os deslocamentos do pórtico transversal também podem ser usados como uma referência para comparação do desempenho das diversas tipologias.

Apresentam-se a seguir, letras **A e B**, os comparativos dos deslocamentos verticais dos pórticos em alma cheia e treliçados formados por perfis TE e 2L.

A - Comparativo dos deslocamentos verticais dos pórticos de alma cheia e treliçados compostos por perfil TE

Na Figura 5.26 mostra-se o gráfico comparativo dos deslocamentos verticais para todas as tipologias em função do vão livre, sendo os pórticos treliçados formados por perfil TE eletro-soldado.

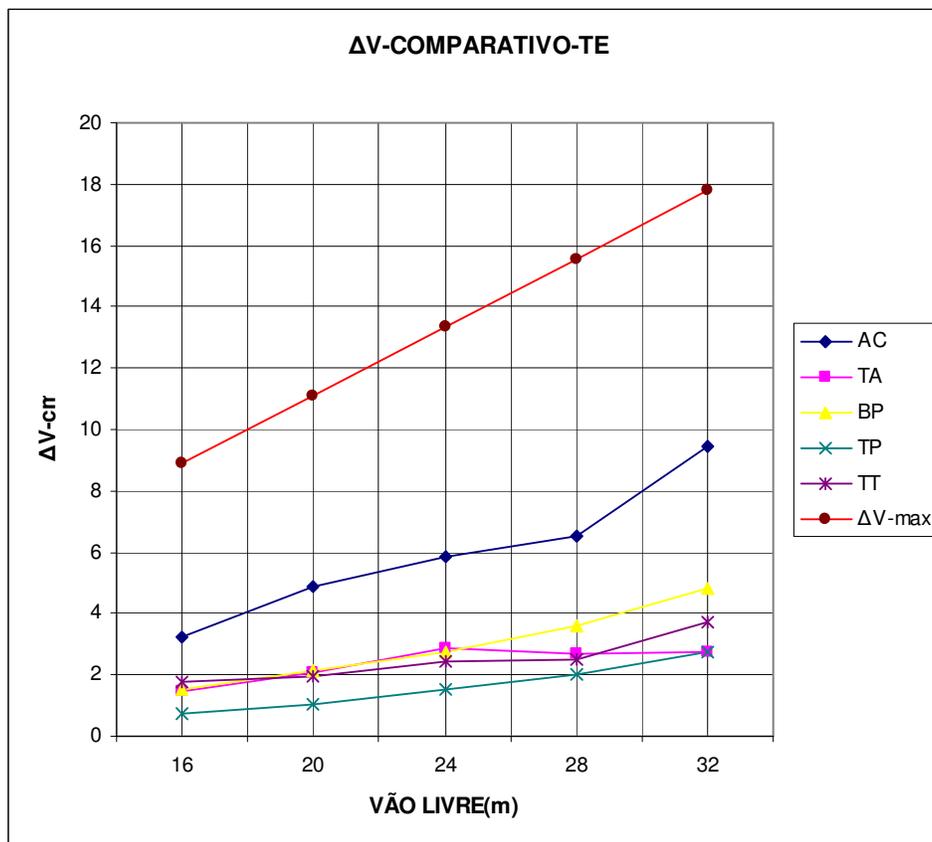


Figura 5.26 – Comparativo dos deslocamentos verticais para as diversas tipologias (pórticos treliçados formados por perfil TE eletro-soldado)

B - Comparativo dos deslocamentos verticais dos pórticos de alma cheia e treliçados compostos por perfil 2L

Na Figura 5.27 mostra-se o mesmo tipo de gráfico, porém com pórticos treliçados formados por cantoneira dupla.

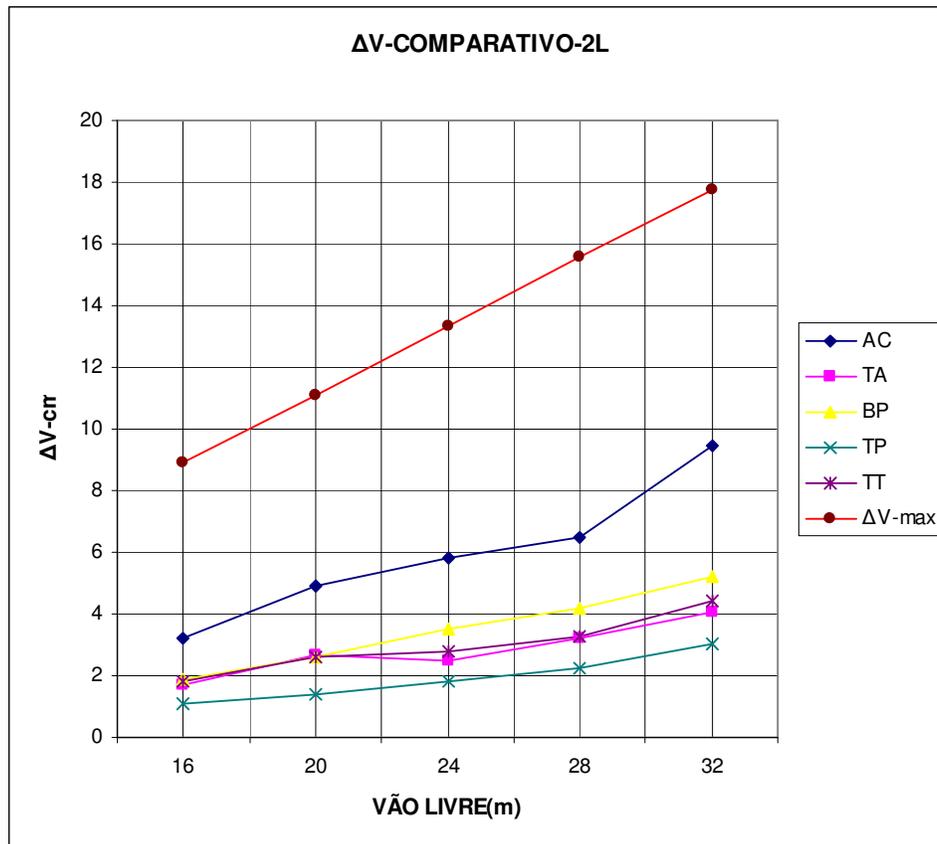


Figura 5.27 –Comparativo dos deslocamentos verticais para as diversas tipologias (pórticos treliçados formados por cantoneira dupla)

Tomando-se como referência uma viga simplesmente apoiada, submetida a um carregamento vertical, o fato que mais contribui para o controle da flecha é o momento de inércia equivalente do elemento estrutural.

Em um sistema estrutural mais complexo, como os pórticos transversais estudados, o que determinará o deslocamento vertical da viga de cobertura é a inércia da seção equivalente e o tipo de apoio com a coluna.

Como pode ser visto nos gráficos das Figuras 5.26 e 5.27, os deslocamentos dos modelos formados por pórticos de alma cheia são muito superiores àqueles verificados nos

pórticos treliçados.

O motivo dos deslocamentos do pórtico de alma cheia serem superiores deve-se à menor inércia das vigas de cobertura, quando comparada aos pórticos treliçados.

Dentre os pórticos treliçados, o pórtico com treliça trapezoidal é o que apresenta menores deslocamentos verticais. Isto se deve à grande inércia equivalente da viga treliçada trapezoidal e da ligação viga/coluna. Pode-se interpretar o pórtico com treliça trapezoidal como sendo uma viga equivalente com seção variável e ligação 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 vigas treliçadas com banzos paralelos e treliça em arco, a falta de um elemento para conter o deslocamento horizontal do topo das colunas ocasiona um deslocamento vertical superior aos das vigas treliçadas trapezoidais.

5.4.3 – Comparativo dos Deslocamentos Horizontais para Todas as Tipologias

Na Figura 5.28 apresenta-se o gráfico comparativo dos deslocamentos horizontais para todas as tipologias em função do vão livre, sendo os pórticos treliçados formados por perfil TE eletro-soldado. Na Figura 5.29 mostra-se o mesmo tipo de gráfico, porém com pórticos treliçados formados por cantoneira dupla.

A - Comparativo dos deslocamentos horizontais dos pórticos de alma cheia e treliçados compostos por perfil TE

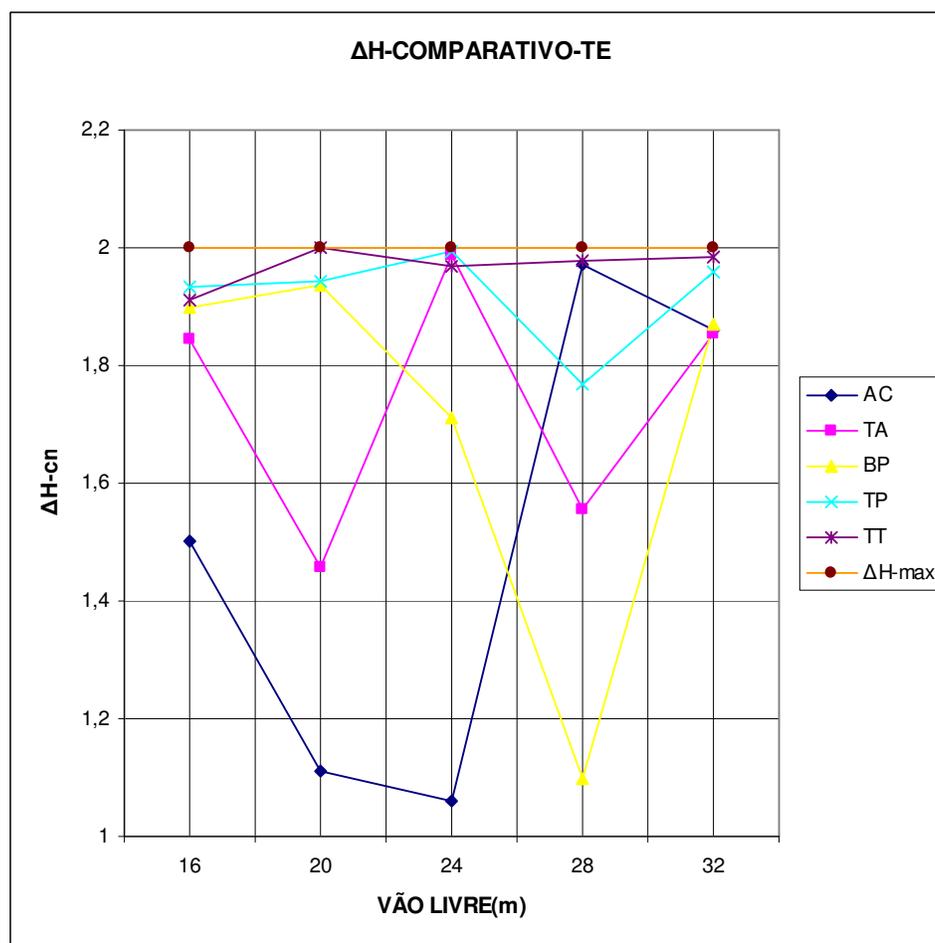


Figura 5.28 – Comparativo dos deslocamentos horizontais para as diversas tipologias (pórticos treliçados formados por perfil TE eletro-soldado)

B - Comparativo do deslocamentos horizontais dos pórticos de alma cheia e treliçados compostos por perfil 2L

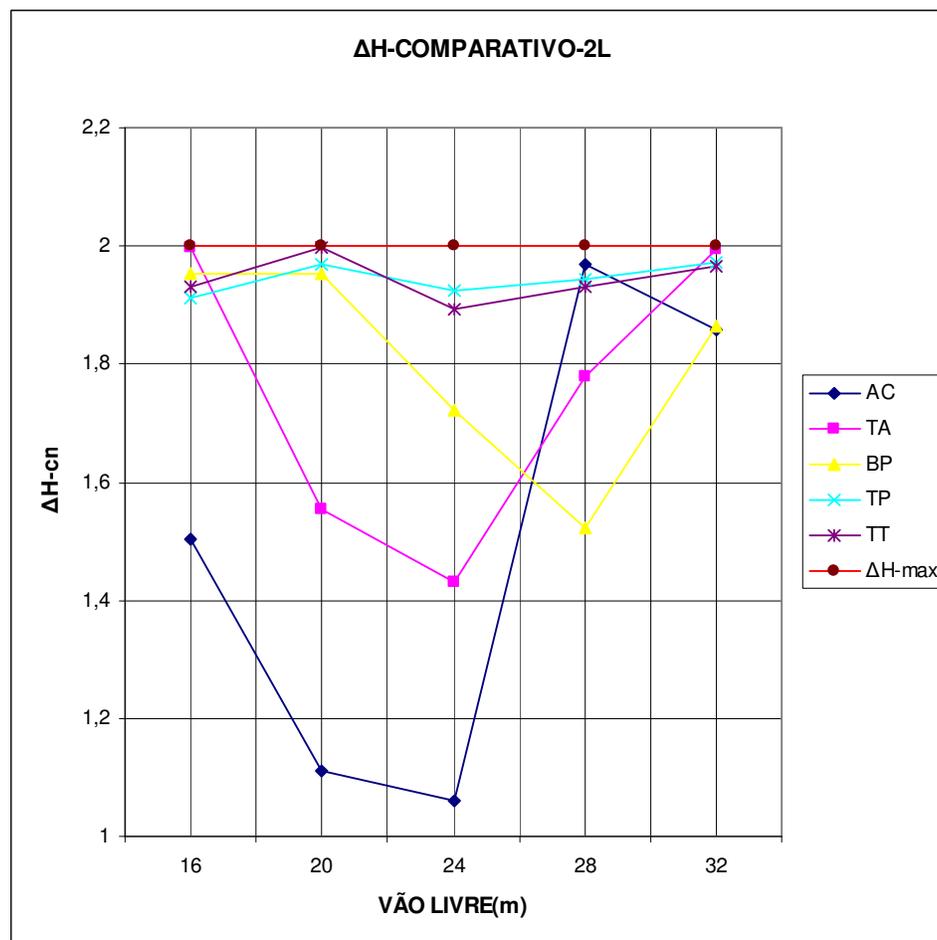


Figura 5.29 – Comparativo dos deslocamentos horizontais para as diversas tipologias (pórticos treliçados formados por cantoneira dupla)

Os principais elementos 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.

Não há uma definição clara sobre que tipo de pórtico é mais eficiente quanto ao deslocamento horizontal, como pode ser observado nos gráficos das Figuras 5.28 e 5.29. 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 TE eletro-soldados e cantoneira dupla.

Ainda assim, percebe-se que o pórtico de alma cheia apresenta uma pequena vantagem em relação os demais modelos para os vãos de 16, 20 e 24 metros. No entanto, essa diferença não é tão representativa a ponto de destacá-lo dos demais modelos.

Durante as análises observou-se que o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical são fatores condicionantes para o dimensionamento dos pórticos transversais.

5.5. Comparativo da Taxa de Consumo com a Literatura

Tendo em vista a possibilidade de comparar a taxa de consumo de aço obtido nas análises com resultados apresentados na literatura, é feito uma comparação da taxa de consumo de aço.

Dos dois estudos referentes a galpões industriais apresentados no Capítulo 2 o que mais se aproxima dos resultados do presente estudo foi o realizado por D'ALAMBERT (2004). Os resultados de taxa de consumo de aço apresentado no Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas (MIC/STI, 1986) é muito antigo e não apresenta compatibilidade de materiais. Por esse motivo serão usados os resultados de taxa de consumo de aço provenientes da publicação de D'ALAMBERT (2004).

A taxa de consumo de aço do modelo AC20 não considera o peso das telhas, terças e contraventamento. Para fazer a comparação da taxa obtida com os resultados de D'ALAMBERT (2004) é necessário acrescentar a taxa desses elementos secundários no valor obtido para o modelo AC20.

Considerando uma variação de 10 a 12 kg/m² para a taxa de consumo de aço das telhas, terças e contraventamentos. Temos uma taxa de aproximadamente 20,5 kg/m² para o modelo AC20.

Na Figura 5.30, apresenta-se o comparativo da taxa de consumo de aço do modelo AC20 (pórtico de alma cheia com vão livre de 20 metros) com o mesmo tipo estudado por D'ALAMBERT (2004). A curva “CC” em vermelho representa a taxa de consumo de aço para o modelo AC20 com o acréscimo da taxa devido as telhas, terças e contraventamento. A curva “CC” deve ser comparada com a curva Q5 de D'ALAMBERT (2004) que representa a taxa de consumo de aço para galpão em alma cheia com estudo de vento compatível ao deste trabalho.

Como pode ser observado a taxa de consumo de aço para os dois estudos estão muito próximas, o que indica a compatibilização dos resultados dos dois estudos.



Figura 5.30 – Comparativo do consumo de aço para galpão em pórtico de alma cheia.

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo apresentam-se as considerações finais sobre o trabalho realizado, abrangendo os aspectos relativos à variação da taxa de consumo de aço, considerações sobre os perfis utilizados e suas composições, deslocamentos do pórtico transversal e a eficiência estrutural das tipologias estudadas. Por fim, serão apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

6.1. Conclusões

As análises demonstraram que os pórticos de alma cheia apresentam taxas de consumo de aço maiores que todas as outras tipologias de pórticos treliçados estudados para todos os vãos livres.

À medida que aumenta o vão livre do pórtico, maior é a influência da tipologia sobre a taxa de consumo de aço, assim como aumenta a vantagem dos pórticos treliçados sobre os pórticos de alma cheia.

Quanto aos deslocamentos, os pórticos de alma cheia apresentam deslocamentos verticais maiores do que os pórticos treliçados estudados. Quanto aos deslocamentos horizontais não se pode apontar diretamente a melhor tipologia.

Como as vigas de coberturas apresentam um determinado grau de continuidade nas ligações com as colunas (exceto no caso das vigas em treliça triangular), o deslocamento horizontal é fortemente influenciado pelas colunas. Como as colunas para um mesmo vão livre são semelhantes, esse deslocamento passa a ser próximo um do outro, não sendo possível associar o desempenho à tipologia do pórtico transversal.

O pórtico com treliça triangular é a tipologia treliçada com menor eficiência para todos os vãos livres, visto que apresentou uma taxa de consumo de aço superior aos demais modelos. Para o vão livre de 20 metros, sua taxa de consumo ficou muito próxima à do pórtico em alma cheia.

O deslocamento vertical do pórtico com treliça triangular é muito próximo dos pórticos com banzos paralelos e em arco. As curvas referentes ao deslocamento vertical dessas tipologias se encontram entre a curva do pórtico em alma cheia e do pórtico com treliça trapezoidal.

As curvas de taxa de consumo de aço e deslocamento para o pórtico com treliça de banzos paralelos e com treliça em arco apresentam resultados muito próximos. A resposta estrutural dessas duas tipologias é muito parecida, visto que a forma do arco é muito próxima da forma da treliça de banzos paralelos. As vigas de cobertura das duas tipologias inserem esforços horizontais significativos no topo da coluna quando submetidos a ações verticais, principalmente no sentido da gravidade.

A tipologia que apresentou melhores resultados foi a do pórtico com treliça trapezoidal. A taxa de consumo de aço para todos os vãos livres tem valores menores que as demais tipologias. Até mesmo na comparação do deslocamento vertical essa tipologia se sobressai das demais.

O banzo inferior da treliça trapezoidal trabalha como um tirante que contribui significativamente para absorver os carregamentos do pórtico. Além disso, a inércia equivalente desta viga de cobertura é superior a das demais tipologias.

As seções transversais dos perfis influenciam fortemente a taxa de consumo de aço dos pórticos treliçados, independentemente da tipologia. A taxa de consumo de aço poderia até ser melhorada se fosse utilizada uma quantidade maior de bitolas numa mesma viga de cobertura, ou seja, se fosse construtivamente viável utilizar uma grande variação de seções transversais numa mesma treliça. Entretanto, isto não é um procedimento usual.

No Capítulo 4 foram avaliadas algumas composições de perfis para os pórticos treliçados. Observou-se que a existência de uma maior quantidade de bitolas sequenciais do perfil cantoneira dupla foi o fator decisivo para a variação da taxa de consumo de aço nas diversas tipologias de pórticos treliçados. Desta forma, consegue-se ajustar um perfil mais racional para uma determinada situação de carregamento.

O fato de uma tipologia sobressair-se em relação as 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. Se houver a necessidade de armazenar objetos que ocupam uma altura maior, provavelmente a tipologia que melhor irá atender os requisitos de projeto será o pórtico com treliça em arco ou o pórtico com treliça de banzos paralelos.

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

Conclui-se, portanto que sobre o ponto de vista estrutural, dentre as tipologias e vãos estudados, os pórticos treliçados são mais eficientes do que os pórticos de alma cheia. Das tipologias de pórticos treliçados, o pórtico com treliça trapezoidal é o mais eficiente, seguido dos pórticos com treliça em arco, com treliça de banzos paralelos e treliça triangular, nesta ordem.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Para o desenvolvimento de futuros trabalhos sugere-se:

- realizar novos estudos de galpões leves industriais levando-se em consideração a vinculação da base das colunas. Neste caso, poderia-se utilizar bases rotuladas e avaliar a influência dessa condição na fundação e no peso na estrutura.
- avaliar os sistemas estruturais estudados utilizando-se perfis formados a frio para compor as vigas dos pórticos treliçados.
- estudar as mesmas tipologias considerando-se a existência de pontes rolantes no galpão.
- estudar novas tipologias como: pórticos de alma cheia com seção variável, treliça em arco com seção variável, galpões em shed, dentre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION - AISC. *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*. New York: AISC, 1993.

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. *Perfis estruturais de aço soldados por alta frequência – eletrofusão – Requisitos: NBR-15279*. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 17p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *Projeto de Estruturas de Aço de Edifícios - Procedimento : NBR-8800*. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 200p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios - Procedimento : NBR-8800*.

- Rio de Janeiro: ABNT, 2007. Projeto de Revisão. 259p.
- BELLEI, Ildony H. *Edifícios Industriais em Aço - Projeto e Cálculo*. 5.ed. São Paulo: PINI, 2006.
- CHIARELLO, J. A.; PRAVIA, Z. M. C. *VisualVentos - Software para Determinação de Forças Devido ao Vento*. Passo Fundo: EDIUPF, 2003.
- 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.
- 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.
- REQUENA, J. A.V.; BRANCO, R.H.F. *AUTOVENTOS-ARCOS - Automação das Forças Devidas ao Vento em Edificações com Telhados em Arco*. Campinas: UNICAMP, 2001.
- 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.
- SANTOS, A.F.dos *Estruturas Metálicas - Projeto e Detalhes para Fabricação*. São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1977. 476p.
- SCHULTE, H., YAGUI, T., PITTA, J.A.A. *Estruturas Metálicas para Coberturas. Informações Construtivas para Projetos Escolares*. São Carlos: SET/ESSC/USP, 1978.
- VERÍSSIMO, G. S.; PAES, J.L.R.; RIBEIRO, J.C.L. *DESMET Versão 2.08 - Dimensionamento de Elementos Estruturais Metálicos*. Viçosa: UFV, 1998. Versão 2.08.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- AÇOMINAS. *Galpões em Estrutura Metálica (Coletânea Técnica do Uso do Aço)*. Belo Horizonte: Açominas, 1989. v.VII.
- ÁLVAREZ, R.A.; BUSTILLO, R.A.; MARTITEGUI, F.A.; REALES, J.R.A.; CALLEJA, J.J.M. *Estructuras de Acero: Uniones y Sistemas Estructurales*. v.2. Madrid: Bellisco, 2001.
- BELEIGOLI, E. A., 2004. *Eficiência dos contraventamentos horizontais em edifícios industriais de aço dotados de pontes rolantes*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP. Ouro Preto.
- 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.
- PFEIL, W. *Estruturas de Aço*. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 3v.
- VERÍSSIMO, G. S.; PAES, J.L.R.; RIBEIRO, J.C.L. *AUTOPERFIL Versão 2.08 - Gerenciador de Catálogos Automáticos de Produtos para Construção Metálica*. Viçosa: UFV, 1998. Versão 2.08.

ANEXO

Listas de Materiais

a. Pórtico de Alma Cheia

Lista Material AC16				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
CVE250X38	Coluna	2	12,00	451,32
VE300X33	Viga	2	16,08	681,94
Peso Total				1133,26
Area Estudada (16*6)				96,00
Taxa kgf/m ²				11,80

Lista Material AC20				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
CVE300X47	Coluna	2	12,00	569,63
VE350X35	Viga	2	20,10	692,01
Peso Total				1261,64
Area Estudada (20*6)				120,00
Taxa (kgf/m ²)				10,51

Lista Material AC24				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
CVE300X47	Coluna	2	12,00	569,63
VE450X51	Viga	2	24,12	1237,49
Peso Total				1807,12
Area Estudada (24*6)				144,00
Taxa (kgf/m ²)				12,55

Lista Material AC28				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
VE500X61	Coluna	2	28,14	1723,68
VE450X59	Viga	2	12,00	705,15
Peso Total				2428,83
Area Estudada (28*6)				168,00
Taxa (kgf/m ²)				14,46

Lista Material AC32				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
VE450X59	Coluna	2	12,00	705,15
VE500X79	Viga	2	32,16	2536,75
Peso Total				3241,90
Area Estudada (32*6)				192,00
Taxa (kgf/m ²)				16,88

b. Pórtico com Treliça em Arco

b.1. Pórtico com Treliça em Arco (Banzos em TE)

Lista Material TA16 -TE				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	M	Kgf
2L38.1X3.17	Diag/Mont	33	28,55	103,76
CVE250X31	Coluna	2	13,33	409,36
TE75X10.5	Banzos	4	35,44	371,27
Peso Total				884,39
Area Estudada (16*6)				96,00
Taxa kgf/m ²				9,21

Lista Material TA20-TE				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	M	Kgf
2L38.1X4.76	Diag	2	2,72	14,54
2L38.1X3.17	Diag/Mont	39	36,10	131,18
TE75X10.5	Banzo Sup	2	22,30	233,61
TE85X12	Banzo Inf	2	22,09	264,32
CVE250X38	Coluna	2	13,74	516,73
Peso Total				1160,38
Area Estudada (20*6)				120,00
Taxa (kgf/m²)				9,67

Lista Material TA24-TE				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	M	Kgf
2L38.1X4.76	Diag	2	2,91	15,51
2L38.1X3.17	Mont	47	49,30	179,16
CVE250X38	Colunas	2	14,28	537,1
TE100X12	Banzos	4	53,27	642,21
Peso Total				1373,98
Area Estudada (28*6)				144,00
Taxa (kgf/m²)				9,54

Lista Material TA28-TE				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	M	Kgf
2L38.1X4.76	Diag/Mont	57	66,83	356,77
CVE300X47	Coluna	2	14,65	695,23
TE85X12	Banzos	4	62,15	743,76
Peso Total				1795,76
Area Estudada (28*6)				168,00
Taxa (kgf/m²)				10,69

Lista Material TA32-TE				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	M	Kgf
2L50.8X3.17	Diag/Mont	65	83,30	408,01
CVE300X47	Coluna	2	15,01	712,54
TE100X12	Banzos	4	71,03	856,29
Peso Total				1976,84
Area Estudada (32*6)				192,00
Taxa (kgf/m²)				10,30

b.2. Pórtico com Treliça em Arco (Banzos em 2L)

Lista Material TA16-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	M	Kgf
2L63.5X4.76	Banzos	4	35,44	323,71
2L38.1X3.17	Diag/Mont	33	28,55	103,76
CVE250X31	Colunas	2	13,33	409,36
Peso Total				836,83
Area Estudada (16*6)				96,00
Taxa kgf/m ²				8,72

Lista Material TA20-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	M	Kgf
2L63.5X4.76	Banzos	4	44,39	405,43
2L38.1X4.76	Diag/Mont	2	2,72	14,54
2L38.1X3.17	Diag/Mont	39	36,10	131,18
CVE250X38	Colunas	2	13,74	516,73
Peso Total				1067,88
Area Estudada (20*6)				120,00
Taxa (kgf/m ²)				8,90

Lista Material TA24-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	M	Kgf
2L63.5X4.76	Banzos	4	26,50	242,07
2L50.8X4.76	Diag/Mont	24	26,77	193,7
2L38.1X4.76	Diag/Mont	2	2,91	15,51
2L38.1X3.17	Diag/Mont	47	49,30	179,16
CVE300X47	Colunas	2	14,28	677,89
Peso Total				1308,33
Area Estudada (24*6)				144,00
Taxa (kgf/m ²)				9,09

Lista Material TA28-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	M	Kgf
2L63.5X4.76	Banzos	4	62,15	567,68
2L38.1X4.76	Diag/Mont	57	66,83	356,77
CVE300X47	Colunas	2	14,65	695,23
Peso Total				1619,68
Area Estudada (28*6)				168,00
Taxa (kgf/m ²)				9,64

Lista Material TA32-2L				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	M	Kgf
2L50.8X3.17	Diag/Mont	65	83,30	408,01
2L76.2X4.76	Banzos	4	71,03	783,58
CVE300X47	Colunas	2	15,01	712,54
Peso Total				1904,13
Area Estudada (32*6)				192,00
Taxa (kgf/m ²)				9,92

c. Pórtico com Treliça de Banzos Paralelos

c.1. Pórtico com Treliça de Banzos Paralelos (Banzos em TE)

Lista Material BP16-TE				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	M	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	4	8,35	40,91
2L63.5X4.76	Diag	4	8,35	76,29
2L44.45X3.17	Mont	7	5,60	23,89
CVE250X31	Coluna	2	13,60	417,53
TE75X10.5	Banzos	4	32,16	336,91
Peso Total				895,53
Area Estudada (16*6)				96,00
Taxa kgf/m ²				9,33

Lista Material BP20-TE				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L63.5X4.76	Diag	10	21,54	196,76
2L44.45X3.17	Mont	9	9,00	38,40
CVE250X31	Colunas	2	14,00	429,81
TE100X12	Banzos	4	40,20	484,63
Peso Total				1149,60
Area Estudada (20*6)				120,00
Taxa (kgf/m ²)				9,58

Lista Material BP24-TE				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L63.5X4.76	Diag	2	4,47	40,85
2L50.8X4.76	Diag	10	22,36	161,81
2L44.45X3.17	Mont	11	13,20	56,31
CVE250X38	Colunas	2	14,40	541,58
TE100X14	Banzos	4	48,24	685,21
Peso Total				1485,76
Area Estudada (24*6)				144,00
Taxa (kgf/m ²)				10,32

Lista Material BP28-TE				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L63.5X4.76	Diag	14	32,65	298,26
2L44.45X3.17	Mont	13	18,20	77,64
CVE300X47	Coluna	2	14,80	702,55
TE100X12	Banzos	4	56,28	678,49
Peso Total				1756,94
Area Estudada (28*6)				168,00
Taxa (kgf/m ²)				10,46

Lista Material BP32-TE				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L63.5X4.76	Diag	16	39,06	356,79
2L44.45X3.17	Mont	15	24,00	102,39
CVE250X38	Coluna	2	15,20	571,67
TE125X15	Banzos	4	64,32	977,34
Peso Total				2008,19
Area Estudada (32*6)				192,00
Taxa (kgf/m ²)				10,46

c.2. Pórtico com Treliça de Banzos Paralelos (Banzos em 2L)

Lista Material BP16-2L				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	8	8,35	40,91
2L50.8X4.76	Banzos	4	40,51	293,15
2L44.45X3.17	Mont	7	5,60	23,89
CVE250X31	Coluna	2	13,60	417,53
Peso Total				775,48
Area Estudada (16*6)				96,00
Taxa kgf/m ²				8,08

Lista Material BP20-2L				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L63.5X4.76	Diag	20	40,20	367,19
2L44.45X3.17	Mont	9	9,00	38,4
CVE250X31	Coluna	2	14,00	429,81
2L63.5X3.17	Banzos	4	21,54	132,74
Peso Total				968,14
Area Estudada (20*6)				120,00
Taxa (kgf/m ²)				8,07

Lista Material BP24-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L63.5X4.76	Banzos	4	52,71	481,47
2L50.8X4.76	Diag	10	22,36	161,81
2L44.45X3.17	Mont	11	13,20	56,31
CVE250X38	Colunas	2	14,40	541,58
Peso Total				1241,17
Area Estudada (24*6)				144,00
Taxa (kgf/m²)				8,62

Lista Material BP28-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L63.5X4.76	Diag/Banzos	22	88,93	812,32
2L44.45X3.17	Mont	13	18,20	77,64
CVE300X47	Coluna	2	14,80	702,55
Peso Total				1592,51
Area Estudada (28*6)				168,00
Taxa (kgf/m²)				9,48

Lista Material BP32-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L63.5X4.76	Diag	16	39,06	356,79
2L63.5X6.35	Diag	16	32,16	386,78
2L44.45X3.17	Mont	15	24,00	102,39
2L76.2X6.35	Banzos	4	32,16	468,2
CVE250X38	Coluna	2	15,20	571,67
Peso Total				1885,83
Area Estudada (32*6)				192,00
Taxa (kgf/m²)				9,82

d. Pórtico com Treliça Trapezoidal

d.1. Pórtico com Treliça Trapezoidal (Banzos em TE)

Lista Material TP16-TE				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X4.76	Diag	2	4,47	32,36
2L44.45X3.17	Mont	6	14,67	62,58
2L38.1X3.17	Diag	7	8,80	31,98
TE75X10.5	Banzos	4	32,08	336,07
CVE250X31	Colunas	2	13,60	417,53
Peso Total				880,52
Area Estudada (16*6)				96,00
Taxa kgf/m²				9,17

Lista Material TP20-TE				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	4	10,54	51,62
2L50.8X4.76	Diag	2	4,66	33,76
2L44.45X3.17	Mont	4	10,50	44,81
2L38.1X3.17	Diag/Mont	9	14,00	50,88
CVE250X31	Colunas	2	14,00	429,81
TE75X10.5	Banzos	4	40,10	420,09
Peso Total				1030,97
Area Estudada (20*6)				120,00
Taxa (kgf/m²)				8,59

Lista Material TP24-TE				
Perfil	Tipo	Nº Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	8	23,23	113,80
2L50.8X4.76	Diag	4	10,01	72,40
2L38.1X4.76	Mont	11	20,40	108,90
CVE250X31	Colunas	2	14,40	442,09
TE75X10.5	Banzos	4	48,12	504,11
Peso Total				1241,30
Area Estudada (24*6)				144,00
Taxa (kgf/m²)				8,62

Lista Material TP28-TE				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L44.45X4.76	Diag	2	4,80	30,18
2L50.8X3.17	Diag	4	12,19	59,73
2L63.5X4.76	Diag	10	29,60	270,40
2L44.45X3.17	Mont	3	8,00	34,13
2L38.1X4.76	Mont	8	15,20	81,14
CVE250X38	Colunas	2	14,80	556,63
TE75X10.5	Banzos	28	56,14	588,13
Peso Total				1620,34
Area Estudada (28*6)				168,00
Taxa (kgf/m²)				9,64

Lista Material TP32-TE				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L44.45X4.76	Mont	10	22,00	138,32
2L50.8X3.17	Diag	5	14,80	72,49
2L63.5X4.76	Diag	6	20,14	183,96
CVE250X38	Colunas	2	15,20	571,67
TE75X10.5	Banzo Sup	16	32,16	336,91
TE85X10	Banzo Inf	16	32,00	325,5
2L63.5X3.17	Diag	10	31,29	191,01
Peso Total				1819,86
Area Estudada (32*6)				192,00
Taxa (kgf/m²)				9,53

d.2. Pórtico com Treliça Trapezoidal (Banzos em 2L)

Lista Material TP16-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L44.45X4.76	Diag	8	16,08	101,09
2L50.8X3.17	Banzos	4	20,47	100,27
2L44.45X3.17	Mont	6	14,67	62,58
2L38.1X3.17	Diag	7	8,80	31,98
CVE250X31	Colunas	2	13,60	417,53
Peso Total				713,45
Area Estudada (16*6)				96,00
Taxa kgf/m²				7,43

Lista Material TP20-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	4	10,54	51,62
2L50.8X4.76	Banzos	4	44,76	323,92
2L44.45X3.17	Diag	4	10,50	44,81
2L38.1X3.17	Mont	9	14,00	50,88
CVE250X31	Colunas	2	14,00	429,81
Peso Total				901,04
Area Estudada (20*6)				120,00
Taxa (kgf/m²)				7,51

Lista Material TP24-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	8	23,23	113,80
2L50.8X6.35	Banzos	4	24,00	227,88
2L50.8X4.76	Mont	16	34,12	246,93
2L38.1X4.76	Diag	11	20,40	108,90
CVE250X31	Colunas	2	14,40	442,09
Peso Total				1139,60
Area Estudada (24*6)				144,00
Taxa (kgf/m²)				7,91

Lista Material TP28-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L44.45X4.76	Diag	2	4,80	30,18
2L50.8X3.17	Diag	4	12,19	59,73
2L63.5X4.76	Banzos	4	85,74	783,19
2L44.45X3.17	Mont	3	8,00	34,13
2L38.1X4.76	Mont	8	15,20	81,14
CVE250X38	Colunas	2	14,80	556,63
Peso Total				1545,00
Area Estudada (28*6)				168,00
Taxa (kgf/m²)				9,20

Lista Material TP32-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L44.45X4.76	Diag	10	22,00	138,32
2L50.8X3.17	Mont	5	14,80	72,49
2L63.5X4.76	Banzos	4	84,30	770
CVE250X38	Colunas	2	15,20	571,67
2L63.5X3.17	Mont/Diag	10	31,29	191,01
Peso Total				1743,49
Area Estudada (32*6)				192,00
Taxa (kgf/m²)				9,08

e. Pórtico com Treliça Triangular**e.1. Pórtico com Treliça Triangular (Banzos em TE)**

Lista Material TT16-TE				
Perfil	Tipo	N ^a	Comp. Total	Peso Total
		Peças		
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	2	4,65	22,76
2L50.8X4.76	Diag	2	5,09	36,86
2L38.1X4.76	Diag	2	4,30	22,95
2L38.1X3.17	Mont	7	6,31	22,92
TE100X12	Banzo Sup	2	16,00	192,89
TE75X10.5	Banzo Inf	2	16,31	170,84
CVE250X38	Colunas	2	12,00	451,32
Peso Total				920,54
Area Estudada (16*6)				96,00
Taxa kgf/m ²				9,59

Lista Material TT20-TE				
Perfil	Tipo	N ^a	Comp. Total	Peso Total
		Peças		
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	2	4,65	22,76
2L63.5X4.76	Diag	2	5,62	51,29
2L50.8X4.76	Diag	2	5,09	36,86
2L38.1X4.76	Diag	2	4,30	22,95
2L38.1X3.17	Mont	9	9,85	35,81
CVE250X38	Colunas	2	12,00	451,32
TE100X14	Banzo Sup	2	20,38	289,55
TE125X15	Banzo Inf	2	20,00	303,90
Peso Total				1214,44
Area Estudada (20*6)				120,00
Taxa (kgf/m ²)				10,12

Lista Material TT24-TE				
Perfil	Tipo	N ^a	Comp. Total	Peso Total
		Peças		
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	2	4,65	22,76
2L50.8X4.76	Diag	4	10,71	77,49
2L63.5X6.35	Diag	2	6,19	74,49
2L38.1X4.76	Diag	2	4,30	22,95
2L38.1X3.17	Mont	11	14,19	51,56
CVE250X38	Colunas	2	12,00	451,32
TE100X14	Banzo Sup	2	24,46	347,46
TE175X25	Banzo Inf	2	24,00	609,33
Peso Total				1657,36
Area Estudada (24*6)				144,00
Taxa (kgf/m ²)				11,51

Lista Material TT28-TE				
Perfil	Tipo	N ^a	Comp. Total	Peso Total
		Peças		
		Unidades	m	Kgf
2L44.45X4.76	Diag	2	4,73	29,73
2L50.8X3.17	Diag	2	4,65	22,76
2L50.8X4.76	Diag	3	7,85	56,82
2L63.5X6.35	Diag	6	18,62	223,99
2L38.1X4.76	Mont	2	4,30	22,95
2L38.1X3.17	Mont	10	11,82	42,97
CVE250X38	Colunas	2	12,00	451,32
TE125X18	Banzo Sup	2	28,54	511,76
TE175X25	Banzo Inf	2	28,00	710,89
Peso Total				2073,19
Area Estudada (28*6)				168,00
Taxa (kgf/m ²)				12,34

Lista Material TT32-TE				
Perfil	Tipo	N ^a	Comp. Total	Peso Total
		Peças		
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	2	4,65	22,76
2L50.8X6.35	Diag	7	19,02	180,55
2L50.8X4.76	Diag	2	5,09	36,86
2L63.5X6.35	Diag	4	13,01	156,46
2L38.1X4.76	Mont	2	4,30	22,95
2L38.1X3.17	Mont	10	11,82	42,97
2L76.2X6.35	Diag	2	7,47	108,72
CVE250X38	Colunas	2	12,00	451,32
TE125X18	Banzo Sup	2	32,62	584,87
TE180X34	Banzo Inf	2	32,00	1090,98
Peso Total				2698,44
Area Estudada (32*6)				192,00
Taxa (kgf/m ²)				14,05

e.2. Pórtico com Treliça Triangular (Banzos em 2L)

Lista Material TT16-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	2	4,65	22,76
2L63.5X4.76	Diag	8	16,31	148,96
2L50.8X4.76	Diag	2	5,09	36,86
2L76.2X4.76	Banzos	4	16,00	176,51
2L38.1X4.76	Mont	2	4,30	22,95
2L38.1X3.17	Mont	7	6,31	22,92
CVE250X38	Colunas	2	12,00	451,32
Peso Total				882,28
Area Estudada (16*6)				96,00
Taxa kgf/m ²				9,19

Lista Material TT20-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	2	4,65	22,76
2L63.5X4.76	Diag	12	26,00	237,49
2L50.8X4.76	Diag	2	5,09	36,86
2L38.1X4.76	Mont	2	4,30	22,95
2L38.1X3.17	Mont	9	9,85	35,81
2L76.2X6.35	Banzos	4	20,00	291,17
CVE250X38	Colunas	2	12,00	451,32
Peso Total				1098,36
Area Estudada (20*6)				120,00
Taxa (kgf/m ²)				9,15

Lista Material TT24-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	2	4,65	22,76
2L63.5X4.76	Diag	4	11,81	107,87
2L50.8X4.76	Diag	2	5,09	36,86
2L38.1X4.76	Mont	2	4,30	22,95
2L38.1X3.17	Mont	11	14,19	51,56
CVE250X38	Colunas	2	12,00	451,32
2L81.9X6.35	Banzos	4	48,46	760,61
Peso Total				1453,93
Area Estudada (24*6)				144,00
Taxa (kgf/m ²)				10,10

Lista Material TT28-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L44.45X4.76	Diag	2	4,73	29,73
2L50.8X3.17	Diag	2	4,65	22,76
2L50.8X4.76	Diag	3	7,85	56,82
2L63.5X6.35	Diag	6	18,62	223,99
2L38.1X4.76	Mont	2	4,30	22,95
2L38.1X3.17	Mont	10	11,82	42,97
2L81.9X7.94	Banzos	4	56,54	1098,36
CVE250X38	Colunas	2	12,00	451,32
Peso Total				1948,90
Area Estudada (28*6)				168,00
Taxa (kgf/m²)				11,60

Lista Material TT32-2L				
Perfil	Tipo	Nª Peças	Comp. Total	Peso Total
		Unidades	m	Kgf
2L50.8X3.17	Diag	2	4,65	22,76
2L50.8X6.35	Diag	7	19,02	180,55
2L50.8X4.76	Diag	2	5,09	36,86
2L63.5X6.35	Diag	4	13,01	156,46
2L38.1X4.76	Mont	2	4,30	22,95
2L38.1X3.17	Mont	10	11,82	42,97
2L76.2X6.35	Mont	2	7,47	108,72
2L81.9X7.94	Banzos	4	64,62	1255,27
CVE250X38	Colunas	2	12,00	451,32
Peso Total				2277,86
Area Estudada (32*6)				192,00
Taxa (kgf/m²)				11,86