



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ - UNIFAP**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E GRADUAÇÃO - PROGRAD**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS - DCET**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**GABRIEL CAVALCANTE DE SOUSA**

**MODELAGEM NUMÉRICA, ANÁLISE ESTRUTURAL E PROPOSTA DE  
OTIMIZAÇÃO DE COBERTURA METÁLICA**

**MACAPÁ**  
**2025**

GABRIEL CAVALCANTE DE SOUSA

**MODELAGEM NUMÉRICA, ANÁLISE ESTRUTURAL E PROPOSTA DE  
OTIMIZAÇÃO DE COBERTURA METÁLICA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado na Universidade Federal do  
Amapá como requisito básico para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Me. Adenilson Costa de Oliveira

MACAPÁ  
2025

GABRIEL CAVALCANTE DE SOUSA

**MODELAGEM NUMÉRICA, ANÁLISE ESTRUTURAL E PROPOSTA DE  
OTIMIZAÇÃO DE COBERTURA METÁLICA**

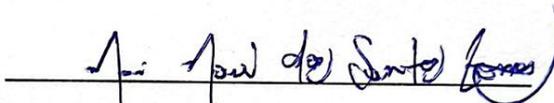
Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado na Universidade Federal do  
Amapá como requisito básico para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

APROVADO EM: 22 / 04 / 2025.

**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Me. Adenilson Costa de Oliveira  
Universidade Federal do Amapá  
Orientador



Prof. Me. Jair José dos Santos Gomes  
Universidade Federal do Amapá

---

Profa. Dra. Jennefer Lavor Bentes  
Universidade Federal do Amapá



Documento assinado digitalmente

JULIO CESAR SANTOS AMARAL

Data: 07/05/2025 20:45:09-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Eng. Civil Júlio César Santos Amaral

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Central/UNIFAP-Macapá-AP  
Elaborado por Cristina Fernandes – CRB-2 / 1569

---

S725m Sousa, Gabriel Cavalcante de.  
Modelagem numérica, análise estrutural e proposta de otimização de cobertura metálica /  
Gabriel Cavalcante de Sousa. - Macapá, 2025.  
1 recurso eletrônico.  
99 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Amapá,  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil, Macapá, 2025.  
Orientador: Adenilson Costa de Oliveira.  
Coorientador: .

Modo de acesso: World Wide Web.  
Formato de arquivo: Portable Document Format (PDF).

1. Estruturas metálicas . 2. Treliza . 3. Desempenho estrutural. I. Oliveira, Adenilson Costa de  
Oliveira, orientador. II. Universidade Federal do Amapá . III. Título.

CDD 23. ed. – 624.182

---

SOUSA, Gabriel Cavalcante de. **Modelagem numérica, análise estrutural e proposta de otimização de cobertura metálica**. Orientador: Adenilson Costa de Oliveira. 2025. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Civil. Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2025.

## RESUMO

No projeto de uma estrutura metálica para um galpão existe uma ampla gama de possibilidades que podem ser adotadas para o arranjo estrutural do edifício. Nesse sentido, o trabalho apresentou a análise estrutural de um galpão metálico projetado para abrigar uma unidade de saúde do tipo policlínica, originalmente concebido com pórticos transversais de treliça trapezoidal. A proposta foi analisar criticamente a concepção inicial da estrutura e verificar seu desempenho à luz das normas técnicas brasileiras, em especial a NBR 8800:2008 e a NBR 14762:2010. O estudo teve como objetivo principal avaliar a adequação normativa do projeto original e, a partir disso, propor e comparar diferentes tipologias de pórticos transversais quanto ao consumo de aço e desempenho estrutural. A metodologia adotada baseou-se em modelagem numérica e análise estrutural realizada por meio do software Cype3D, no qual o projeto original e a análise comparativa foram verificados em relação aos Estados Limites Últimos (ELU) e de Serviço (ELS). Desenvolveu-se um estudo paramétrico com diferentes alternativas estruturais de pórticos transversais, incluindo pórticos com viga de alma cheia, viga com banzos paralelos, treliça trapezoidal e treliça em arco. Todos os modelos foram submetidos às mesmas condições de carregamento, com as combinações normativas previstas para o dimensionamento. Os critérios adotados para avaliação comparativa foram a taxa de consumo de aço, como indicador econômico, e os deslocamentos estruturais, como indicativo de rigidez e desempenho. A metodologia aplicada neste trabalho permite não apenas a verificação técnica de um projeto existente, mas também a busca por soluções otimizadas e mais eficazes para o dimensionamento de galpões metálicos, contribuindo para projetos mais seguros, econômicos e compatíveis com as exigências normativas. As análises revelaram inconsistências relevantes, como barras com aproveitamento superior a 100%, índices de esbeltez acima dos limites normativos em perfis comprimidos, ausência de elementos estabilizadores como as linhas de corrente, além de deslocamentos verticais superiores aos valores admissíveis. Também se constatou que a geometria adotada na treliça (com uma relação vão/flexa de  $L/17$  e inclinação de cobertura de apenas 8%) comprometeu o desempenho global da estrutura, resultando em maiores esforços internos. Os resultados do estudo paramétrico mostraram que o pórtico com viga de alma cheia apresentou o maior consumo de aço, embora tenha atendido aos critérios de verificação. A treliça em arco se destacou pelo menor deslocamento vertical, mas com um consumo de aço intermediário. Já a treliça trapezoidal apresentou o melhor desempenho geral, com a menor taxa de consumo de aço e deslocamentos aceitáveis, sendo, portanto, considerada a solução estrutural mais eficiente dentro do escopo analisado. A comparação entre os modelos demonstrou a importância da escolha adequada da tipologia estrutural, considerando tanto o comportamento mecânico quanto a racionalização no uso de materiais.

**Palavras-chave:** Estruturas metálicas; Treliça; Desempenho estrutural.

## ABSTRACT

In the design of a steel structure for an industrial shed, there is a wide range of possibilities that can be adopted for the structural arrangement of the building. In this context, the present work presents the structural analysis of a steel shed designed to house a healthcare facility of the polyclinic type, originally conceived with trapezoidal truss-type transverse frames. The objective was to critically analyze the initial structural design and assess its performance based on Brazilian technical standards, particularly NBR 8800:2008 and NBR 14762:2010. The main goal of this study was to evaluate the normative compliance of the original design and, based on that, propose and compare different typologies of transverse frames in terms of steel consumption and structural performance. The adopted methodology was based on numerical modeling and structural analysis carried out using the Cype3D software, through which both the original project and the comparative analysis were verified according to Ultimate Limit States (ULS) and Serviceability Limit States (SLS). A parametric study was developed with different structural alternatives for the transverse frames, including solid-web beam frames, parallel chord trusses, trapezoidal trusses, and arch trusses. All models were subjected to the same loading conditions, following the normative combinations required for structural design. The criteria adopted for comparative evaluation were the steel consumption rate, as an economic indicator, and structural displacements, as indicators of stiffness and overall performance. The methodology applied in this work enables not only the technical verification of an existing project but also the search for optimized and more efficient solutions for the structural design of steel sheds, contributing to safer, more economical projects in accordance with technical standards. The analyses revealed significant inconsistencies, such as members with utilization ratios exceeding 100%, slenderness indices above normative limits in compressed profiles, absence of stabilizing elements such as tie rods, and vertical displacements exceeding allowable limits. It was also found that the geometry adopted in the Truss (featuring a span-to-rise ratio of  $L/17$  and a roof slope of only 8%) compromised the overall structural performance, leading to higher internal forces. The results of the parametric study showed that the solid-web beam frame presented the highest steel consumption, although it complied with verification criteria. The arch truss stood out for having the lowest vertical displacement, though with intermediate steel usage. The trapezoidal truss demonstrated the best overall performance, with the lowest steel consumption rate and acceptable displacement values, thus being considered the most efficient structural solution within the analyzed scope. The comparison between models highlighted the importance of properly selecting the structural typology, considering both mechanical behavior and the rational use of materials.

**Keywords:** Steel structures; Truss; Structural performance.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Componentes de uma estrutura metálica.....	16
<b>Figura 2</b> - Pórtico transversal.....	17
<b>Figura 3</b> - Pórtico transversal com viga de alma cheia .....	18
<b>Figura 4</b> - Elementos de uma treliça.....	19
<b>Figura 5</b> - Tipologia de treliças .....	20
<b>Figura 6</b> - Seções de barras de treliça.....	22
<b>Figura 7</b> - Ligação soldada sem chapa auxiliar .....	23
<b>Figura 8</b> - Modelos de análises estruturais para treliças .....	23
<b>Figura 9</b> - Mapa de isopleias .....	27
<b>Figura 10</b> - Deslocamento típico de um pórtico treliçado.....	29
<b>Figura 11</b> - Planta de locação de pilares metálicos .....	36
<b>Figura 12</b> - Planta de locação da cobertura.....	37
<b>Figura 13</b> - Elevação do pórtico transversal tipo um do projeto original .....	37
<b>Figura 14</b> - Área de influência do pórtico transversal 6 .....	39
<b>Figura 15</b> - Modelagem 3D do galpão metálico .....	40
<b>Figura 16</b> - Detalhamento da treliça .....	40
<b>Figura 17</b> - Seção transversal dos perfis metálicos .....	41
<b>Figura 18</b> - Treliça real executada na obra .....	42
<b>Figura 19</b> - Montagem da estrutura metálica do galpão .....	42
<b>Figura 20</b> - Coeficientes de formas externos para as paredes .....	46
<b>Figura 21</b> - Coeficientes de formas externos para o telhado .....	46
<b>Figura 22</b> - Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão do vento 0° .....	47
<b>Figura 23</b> - Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão do vento 90° .....	47
<b>Figura 24</b> - Cargas para o vento longitudinal 0° .....	48
<b>Figura 25</b> - Cargas para o vento transversal 90° .....	48
<b>Figura 26</b> - Combinações das ações <i>Cype3d</i> para elementos de perfis formados a frio .....	52
<b>Figura 27</b> - Tipologia de pórticos transversais .....	54
<b>Figura 28</b> - Pórtico de alma cheia (medidas em milímetros) .....	55
<b>Figura 29</b> - Esquema geral de um galpão industrial constituído por pórticos de alma cheia.....	56

<b>Figura 30</b> - Pórtico com treliça trapezoidal (medidas em milímetros) .....	57
<b>Figura 31</b> - Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça trapezoidal.....	57
<b>Figura 32</b> - Pórtico com treliça com banzos paralelos (medidas em milímetros).....	58
<b>Figura 33</b> - Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliças em banzos paralelos .....	58
<b>Figura 34</b> - Pórtico com treliça em arco (medidas em milímetros).....	59
<b>Figura 35</b> - Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliças em arco .....	60
<b>Figura 36</b> - Perfis cantoneiras de abas iguais.....	61
<b>Figura 37</b> - Seção dupla cantoneira.....	62
<b>Figura 38</b> - Seção cantoneira simples .....	62
<b>Figura 39</b> - Ação do vento 0° em um galpão de duas águas .....	66
<b>Figura 40</b> - Ação do vento 90° em um galpão de duas águas.....	66
<b>Figura 41</b> - Coeficiente de forma para parede de um galpão em arco .....	67
<b>Figura 42</b> - Coeficiente de forma externo para telhado em arco.....	68
<b>Figura 43</b> - Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão .....	68
<b>Figura 44</b> - Casos de carga para o vento 0° e 90° (kN/m <sup>2</sup> ).....	69
<b>Figura 45</b> - Resultado da análise estrutural do projeto original.....	71
<b>Figura 46</b> - Treliça e terças mais carregadas do projeto .....	71
<b>Figura 47</b> - Verificação à flexo-tração da terça mais solicitada.....	73
<b>Figura 48</b> - Verificação do índice de esbeltez da terça mais solicitada .....	74
<b>Figura 49</b> - Resultado das verificações realizadas na treliça do projeto original.....	75
<b>Figura 50</b> - Verificação a compressão do banzo superior mais solicitado .....	76
<b>Figura 51</b> - Verificação a compressão do banzo inferior mais solicitado .....	77
<b>Figura 52</b> - Deslocamento padrão para cargas verticais sem a influência do vento.	78
<b>Figura 53</b> - Deslocamento padrão para cargas verticais com a influência do vento.	79
<b>Figura 54</b> - Verificação a compressão da diagonal mais solicitada .....	79
<b>Figura 55</b> - Verificação da resistência à compressão do montante mais solicitado..	80
<b>Figura 56</b> - Verificação da resistência à flexo-compressão do pilar mais solicitado .	81
<b>Figura 57</b> - Pontos de verificação dos deslocamentos .....	82
<b>Figura 58</b> - Deslocamento vertical máximo.....	83
<b>Figura 59</b> - Deslocamento horizontal máximo .....	84
<b>Figura 60</b> - Consumo de aço para os pórticos transversais .....	89

<b>Figura 61</b> - Taxa de consumo de aço global .....	90
<b>Figura 62</b> - Deslocamentos horizontais do estudo paramétrico.....	91
<b>Figura 63</b> - Deslocamentos verticais do estudo paramétrico .....	93

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Coeficiente de flambagem por flexão para peças isoladas .....	31
<b>Tabela 2</b> - Quadro de materiais da treliça tipo um .....	43
<b>Tabela 3</b> - Quadro de materiais do projeto original .....	43
<b>Tabela 4</b> - Seção de perfil UDC .....	63
<b>Tabela 5</b> - Ação do vento nas tipologias de treliças .....	66
<b>Tabela 6</b> – Verificações não satisfeitas para a terça mais solicitada .....	73
<b>Tabela 7</b> – Verificações não satisfeitas para o banzo superior mais solicitado .....	76
<b>Tabela 8</b> – Verificações não satisfeitas para o banzo inferior mais solicitado .....	76
<b>Tabela 9</b> - Deslocamentos máximos em milímetros da estrutura original .....	82
<b>Tabela 10</b> - Lista de material do pórtico de alma cheia.....	85
<b>Tabela 11</b> - Lista de material do pórtico com treliça de banzos paralelos.....	86
<b>Tabela 12</b> - Lista de material do pórtico com treliça trapezoidal .....	86
<b>Tabela 13</b> - Lista de material do pórtico com treliça em arco.....	87
<b>Tabela 14</b> - Lista de materiais comuns entre as tipologias .....	88

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	10
1.2 OBJETIVO GERAL .....	12
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1.4 JUSTIFICATIVA.....	13
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>14</b>
2.1 COBERTURAS METÁLICAS.....	14
2.2 SISTEMAS ESTRUTURAIS DE CONSTRUÇÕES DE GALPÕES METÁLICOS.....	15
2.3 COMPONENTES DAS COBERTURAS METÁLICAS .....	15
2.4 TERÇAS .....	16
2.5 CONTRAVENTAMENTOS.....	17
2.6 PÓRTICO TRANSVERSAL .....	17
2.6.1 Pórtico transversal de alma cheia .....	18
2.6.2 Pórtico transversal treliçado .....	19
2.7 TIPOLOGIA DE TRELIÇAS PARA COBERTURAS.....	19
2.7.1 Pórtico com treliça em arco.....	20
2.7.2 Pórtico com treliça trapezoidal .....	21
2.7.3 Pórtico com treliça de banzos paralelos .....	21
2.8 TIPOS DE BARRAS DE TRELIÇAS .....	21
2.9 TIPOS DE LIGAÇÕES.....	22
2.10 ANÁLISES ESTRUTURAIS DE TRELIÇAS.....	23
2.11 CARREGAMENTOS.....	23
2.11.1 Ações permanentes.....	24
2.11.2 Ações variáveis .....	24
2.11.3 Ações do vento.....	25
2.12 COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....	28
2.13 DESLOCAMENTO LIMITE .....	29
2.14 COMPRESSÃO SIMPLES.....	29
2.15 FLAMBAGEM POR FLEXÃO.....	30
2.16 TRAÇÃO SIMPLES .....	32
2.17 FLEXÃO SIMPLES .....	33
2.18 FLEXÃO COMPOSTA .....	33
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>35</b>

3.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO REAL .....	36
3.2	PÓRTICO TRANSVERSAL DO PROJETO REAL.....	40
3.3	QUANTITATIVO DE AÇO DO PROJETO REAL .....	43
3.4	AÇÕES ATUANTES NO PROJETO .....	44
3.5	CARGA DE VENTO.....	44
3.6	PROGRAMAS UTILIZADOS.....	48
3.7	COMBINAÇÕES PADRÃO DO <i>CYPE3D</i> .....	50
<b>4</b>	<b>ESTUDO PARAMÉTRICO.....</b>	<b>53</b>
4.1	CRITÉRIOS DE PARAMETRIZAÇÃO .....	53
4.2	DEFINIÇÃO DOS MODELOS.....	54
4.3	PÓRTICO DE ALMA CHEIA .....	55
4.4	PÓRTICO COM TRELIÇA TRAPEZOIDAL .....	56
4.5	PÓRTICO COM TRELIÇA DE BANZOS PARALELOS .....	57
4.6	PÓRTICO COM TRELIÇA EM ARCO.....	59
4.7	COMPOSIÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS .....	60
4.8	CARREGAMENTOS ATUANTES.....	63
4.8.1	Estudo de vento típico para galpão de duas águas.....	65
4.8.2	Estudo de vento típico para galpão em arco .....	67
4.9	COMBINAÇÃO DE ESFORÇOS DO ESTUDO PARAMÉTRICO .....	69
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>70</b>
5.1	ESTRUTURA ORIGINAL .....	70
5.1.1	Terças .....	72
5.1.2	Treliça.....	74
5.1.3	Pilares .....	81
5.1.4	Deslocamentos.....	82
5.2	RESULTADOS DO ESTUDO PARAMÉTRICO .....	84
5.2.1	Quantitativo de material.....	85
5.2.2	Variação da taxa de consumo de aço .....	88
5.2.3	Comparativo dos deslocamentos horizontais das diversas tipologias.....	91
5.2.4	Comparativo dos deslocamentos verticais das diversas tipologias .....	92
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>95</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>97</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>98</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dentre os diversos aspectos que caracterizam as construções metálicas, destacam-se a elevada resistência mecânica do aço em comparação a outros materiais tradicionais, a eficiência proporcionada pelo processo de construção industrializada, a flexibilidade no desenvolvimento de soluções arquitetônicas e estruturais, bem como a facilidade de montagem, desmontagem, reforço e ampliação das estruturas. Como consequências diretas dessas características, observam-se benefícios expressivos, tais como a redução das cargas transmitidas às fundações, o aumento da área útil da edificação, a diminuição do tempo de execução da obra e a redução da área necessária para o canteiro de obras (CHAVES, 2007).

Bellei (2008) destaca que início da fabricação em ferro no Brasil deu-se por volta de 1812. Acredita-se que a primeira obra a usar ferro fundido, no Estaleiro Mauá, em Niterói, foi a Ponte de Paraíba do Sul, com cinco vãos de 30 metros, cuja data de construção é de 1857. A primeira obra a usar aço importado no Brasil foi o teatro Santa Izabel, em Recife.

O avanço na fabricação de perfis metálicos em larga escala ocorreu com o surgimento das grandes siderúrgicas, conforme destacado por Pinheiro (2005). Devido aos avanços tecnológicos na siderurgia, a construção civil consolidou-se como um dos principais setores consumidores de aço no mundo.

Segundo Pfeil (2009), no Brasil, os aços de maiores resistência começaram a ser empregados em escala crescente a partir de 1950. A indústria de siderurgia foi implantada após a segunda Guerra Mundial, com a construção da Usina Presidente Vargas da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em Volta Redonda, no Estado do Rio de Janeiro.

No Brasil, galpões industriais representam uma parcela significativa das edificações metálicas e são amplamente utilizados em indústrias, comércios e centros logísticos. Estruturas de pavimento único, por sua versatilidade e economia, tornaram-se uma alternativa atrativa para diversos segmentos da construção civil.

O projeto de uma estrutura envolve diversas etapas, como a definição do sistema estrutural, a identificação e quantificação das cargas, a definição das condições de contorno, a escolha de materiais, a análise estrutural, o

dimensionamento das seções transversais, o detalhamento e as especificações técnicas. O resultado é uma síntese de decisões tomadas durante o processo de projeto, considerando uma série de opções técnicas para cada aspecto envolvido.

Neste trabalho, será analisada uma cobertura metálica, frequentemente empregada na construção de galpões industriais com vãos livres de grandes dimensões. Após a verificação estrutural dos elementos que compõem a cobertura existente, serão propostas diferentes tipologias de pórticos metálicos, com o objetivo de avaliar a influência da geometria da treliça no desempenho global da estrutura. A análise comparativa entre as alternativas visa identificar soluções mais eficientes em termos de comportamento estrutural e consumo de material.

Atualmente, o uso de softwares computacionais tem se tornado uma ferramenta indispensável na modelagem de estruturas. Esses programas permitem que o projetista forneça dados como geometria da estrutura, carregamentos, seções pré-dimensionadas, condições de vinculação e tipo de análise a ser realizada, resultando em informações precisas sobre esforços e deslocamentos. Essa abordagem permite que o engenheiro se concentre na otimização das estruturas e na busca por soluções mais eficientes.

A modelagem numérica da cobertura estudada, assim como as sugestões de otimização para os pórticos transversais foram realizadas com o software *CYPECAD*, que conta com o módulo de dimensionamento integrado *Cype3D*. A validação dos resultados seguiu as prescrições das normas NBR 8800 (ABNT, 2008) e NBR14762 (ABNT, 2010).

No Capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica, abordando diversos temas relacionados ao projeto de galpões de uso geral, incluindo conceitos sobre estruturas metálicas, tipologias de pórticos e critérios normativos de dimensionamento. No Capítulo 3, é descrita a metodologia da pesquisa, com a caracterização do projeto estrutural real e a definição dos parâmetros utilizados para o dimensionamento de diferentes configurações de treliças.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos a partir das análises estruturais realizadas, seguidos da discussão crítica sobre o desempenho das tipologias avaliadas, tendo como base principal as taxas de consumo de aço e os deslocamentos nodais verificados tanto no projeto da cobertura original quanto nos diversos modelos desenvolvidos no estudo paramétrico.

Por fim, no Capítulo 5, são expostas as conclusões do trabalho, assim como sugestões de temas para pesquisas futuras, visando a continuidade e o aprofundamento dos estudos na área de estruturas metálicas para galpões.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é realizar o diagnóstico estrutural de uma cobertura metálica construída na cidade de Macapá por meio da verificação dos elementos que compõem a estrutura e da avaliação de seu desempenho frente às condições de carregamentos permanentes e variáveis. A análise busca identificar a conformidade do sistema estrutural em relação aos critérios estabelecidos pelas normas técnicas vigentes, assegurando a verificação quanto aos Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Serviço (ELS).

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) analisar o projeto estrutural utilizado para a construção da obra;
- b) realizar o levantamento das cargas permanentes, sobrecargas e das forças devido ao vento aplicadas na estrutura em análise;
- c) realizar o cálculo da força devido ao vento atuante no galpão analisado utilizando o programa *Visualventos*;
- d) criar plantas e detalhamentos dos modelos de coberturas metálicas analisadas através do programa de modelagem de estrutura metálica *AdvanceSteel*.
- e) criar o modelo numérico tridimensional (3D) a partir do estudo do projeto para a análise da estrutura utilizando o software *Cype3D*;
- f) avaliar o desempenho da estrutura sob diferentes condições de carregamentos e identificar os pontos críticos;
- g) apresentar concepções de tipologias de treliças para o galpão estudado;
- h) sugerir diversas soluções de treliças metálicas como base em um estudo paramétrico, avaliando o desempenho de algumas soluções estruturais usuais utilizadas em galpões de estrutura metálica.
- i) avaliar o desempenho estrutural de cada tipo de treliça através da obtenção dos gráficos de consumo aproximado de aço e de deslocamentos máximos.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

A utilização de cobertura metálica tem se tornado uma solução amplamente adotada no município de Macapá (AP), abrangendo uma variedade de edificações, desde residenciais e comerciais até prédios públicos. Essa crescente popularidade deve-se às diversas vantagens que esse tipo de estrutura oferece, tais como leveza, rapidez na montagem, maior controle de qualidade durante a fabricação e menor desperdício de materiais.

Nesse contexto, a realização de um estudo aprofundado envolvendo coberturas metálicas apresenta-se como uma contribuição significativa para a evolução tecnológica e aprimoramento das práticas construtivas na região. O desenvolvimento de projetos mais eficientes e seguros depende da compreensão detalhada das características desse tipo de estrutura, incluindo seu comportamento mecânico, desempenho frente às condições climáticas locais e otimização dos materiais empregados.

Portanto, um estudo que explore de forma sistemática as diversas tipologias de estruturas metálicas, especialmente no contexto das edificações do município de Macapá, trará subsídios importantes para que projetistas possam tomar decisões mais embasadas e fundamentadas. Isso contribuirá para o aprimoramento técnico do mercado da construção civil local, resultando em edificações mais eficientes, seguras e com melhor desempenho. Além disso, a adoção de soluções estruturais otimizadas pode resultar em economia de materiais e redução de custos, ampliando a viabilidade de novos empreendimentos e impulsionando o crescimento do setor na região.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os pavilhões industriais destinam-se usualmente a fábricas, armazéns, superfícies comerciais, recintos desportivos, exposições e congressos. O tipo de utilização e modo de funcionamento destes edifícios normalmente impõe que toda a área interior seja livre, impedindo a localização de pilares intermédios. Esta condicionante leva a que estas estruturas tenham que vencer vãos que podem variar desde os 10 metros a mais de 60 metros. A estrutura de um pavilhão industrial tem em geral uma planta retangular e apenas um piso. Em termos de desenvolvimento longitudinal a estrutura é formada por um conjunto de pórticos principais travados pelas terças e pelos sistemas de contraventamento. Em termos de desenvolvimento transversal, os pórticos podem ser de dois tipos: com a viga treliçada; ou com perfis de alma cheia (OLIVEIRA, 2011).

### 2.1 COBERTURAS METÁLICAS

As estruturas de aço para galpões são produzidas utilizando principalmente perfis soldados, laminados a quente e conformados a frio. As estruturas formadas por estes materiais podem ser fabricadas e montadas no local de construção da obra ou até fabricadas em partes nos galpões de uma empresa especializada e, posteriormente, levada ao local da obra para ser montado (CHAVES, 2007).

Nas estruturas de coberturas metálicas são empregados perfis metálicos. De acordo com Pfeil (2009), um galpão metálico simples é composto pela combinação de elementos lineares e sistemas planos. Nesse contexto, as terças desempenham um papel essencial como vigas longitudinais instaladas nos planos da cobertura, cuja função é transferir as cargas atuantes nesses planos, como o peso do telhado e os esforços gerados por sobre pressões e sucções causadas pelo vento para a estrutura principal. O sistema estrutural principal consiste no pórtico transversal, que é formado pela conexão rígida entre a treliça de cobertura e as duas colunas. Esse pórtico é responsável por suportar tanto a ação do vento nas fachadas longitudinais e na cobertura quanto as cargas gravitacionais.

O aço e sua alta resistência nos variados estados de tensão, seja, tração, flexão ou compressão, permite que os elementos estruturais suportem grandes esforços, embora possua uma área de seção relativamente pequena. Por isso, o aço estrutural,

apesar de sua grande densidade, torna-se mais leves quando comparados com os elementos produzidos em concreto armado (BELLEI, 2010).

## 2.2 SISTEMAS ESTRUTURAIS DE CONSTRUÇÕES DE GALPÕES METÁLICOS

Os galpões, considerados edifícios industriais para usos gerais, compreendem um espaço horizontal amplo e coberto, que garantem proteção para utilização diversa. Portanto, de acordo com Chamberlain (2013) a estrutura de aço pode apresentar várias concepções, e dentro delas destacam-se:

- a) edifício industrial em duas águas, com vigas de cobertura em alma cheia;
- b) edifício industrial em duas águas, com sistemas treliçados na cobertura;
- c) edifício industrial em duas águas, em perfis de alma cheia, com viga de rolamento apoiada em mísula;
- d) edifício industrial em duas águas, com coluna treliçada e vigas de cobertura em alma cheia, com viga de rolamento;
- e) edifício industrial em duas meias-águas, geminado;
- f) edifício industrial com quatro meias-águas, geminado;
- g) cobertura em arco treliçado.

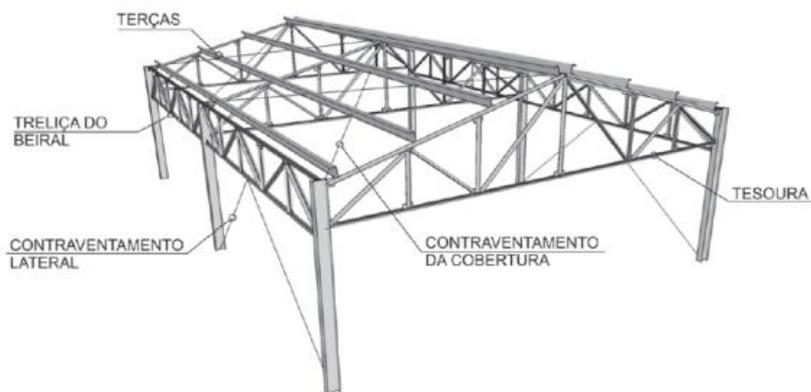
## 2.3 COMPONENTES DAS COBERTURAS METÁLICAS

De acordo com o Manual de Construção em Aço do Instituto Aço Brasil CBCA (2010), a construção de galpões metálicos com perfis em aço como elementos estruturais é uma solução bastante utilizada devido à rapidez na montagem, leveza da estrutura e eficiência econômica. A seguir mostra-se a forma mais comum de construção de um galpão metálico com um único vão transversal e cobertura de duas águas.

A configuração básica de galpões com perfil metálico de cobertura em duas águas pode ser adaptada conforme as necessidades específicas do projeto, como o tamanho do vão, as cargas previstas e o uso do galpão.

Na Figura 1 observa-se o arranjo estrutural típico de um galpão industrial com tesoura treliçada e coluna em perfis I com o travamento lateral em K.

**Figura 1** - Componentes de uma estrutura metálica



Fonte: CBCA,2010.

De acordo com Chaves (2007), 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.

Um galpão industrial de médio porte em aço, com sistema estrutural de pórticos treliçados, pode demandar milhares de elementos estruturais. Caso esses elementos sejam variados, o benefício da industrialização no processo de fabricação é comprometido. Por isso, para viabilizar a produção industrial de uma estrutura desse tipo, é recomendado padronizar os elementos estruturais, visando obter o maior número possível de peças com características semelhantes, sempre considerando a viabilidade econômica (BARREIRO, 2015).

## 2.4 TERÇAS

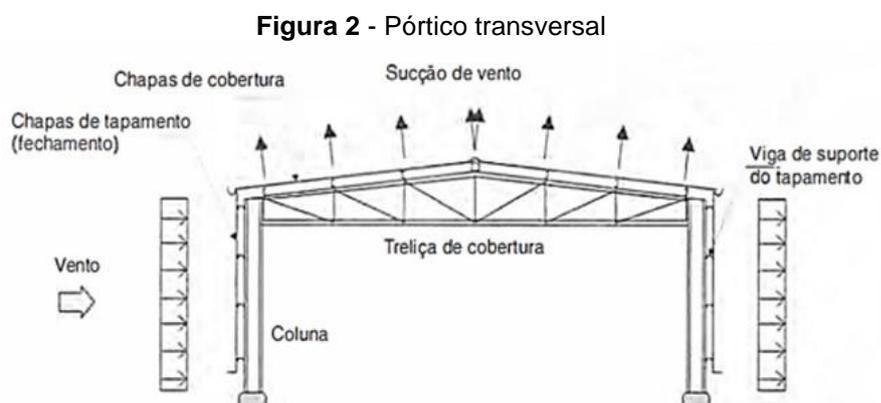
Terças são vigas longitudinais dispostas nos planos da cobertura e destinadas a transferir à estrutura principal as cargas atuantes naqueles planos, tais como peso do telhado e sobre pressões e sucções devidas ao vento. As cargas de vento produzem nas terças flexão reta em torno do eixo de maior inércia, enquanto as cargas gravitacionais produzem flexão oblíqua (PFEIL, 2009).

## 2.5 CONTRAVENTAMENTOS

Os contraventamentos são sistemas fundamentais das estruturas que permitem transmitir parte das cargas horizontais às fundações, impedindo instabilidades locais dos elementos ou global da estrutura. As cargas que estes transmitem à fundação incluem a componente horizontal da ação do vento e a componente resultante de instabilidades locais de elementos comprimidos dos pórticos (OLVEIRA, 2011).

## 2.6 PÓRTICO TRANSVERSAL

A associação entre a treliça de cobertura e as duas colunas forma um pórtico transversal, como mostrado na Figura 2, o qual deve ter capacidade de suportar não só as cargas gravitacionais, mas também as forças do vento nas fachadas longitudinais e na cobertura (PFEIL, 2009).



Fonte: Pfeil, 2009.

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 deformação horizontal da estrutura (CHAVES, 2007).

De acordo com Bellei (2010), para receber as cargas de coberturas (telhas, terças, chuvas, poeiras e sobrecargas em geral) e transmiti-las às colunas, são empregadas vigas que ao mesmo tempo servem para dar estabilidade às estruturas, que podem ser em alma cheia ou vazada ou em tesoura e treliças.

De acordo com Nogueira (2009), existem diversas alternativas para composição de pórticos planos transversais destinados aos galpões de uso geral. Um pórtico plano típico de um galpão é formado por duas colunas e uma viga de cobertura. A diferenciação entre as soluções estruturais se dá, basicamente, pela variação de alternativas para composição das colunas e vigas que formam esta estrutura principal.

### 2.6.1 Pórtico transversal de alma cheia

Vigas de cobertura em alma cheia são formadas por perfis laminados, soldados ou vazados, originados de ambos. Podem ser em altura constante, para vão até 30 metros, ou variáveis, este último muito usado em grandes vãos, acima de 30 metros para galpões sem ponte rolante (BELLEI, 2010).

A Figura 3 representa o esquema estrutural de um pórtico transversal constituído por viga de alma cheia.

**Figura 3** - Pórtico transversal com viga de alma cheia



Fonte: Bellei, 2010.

De acordo com Chaves (2007), 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

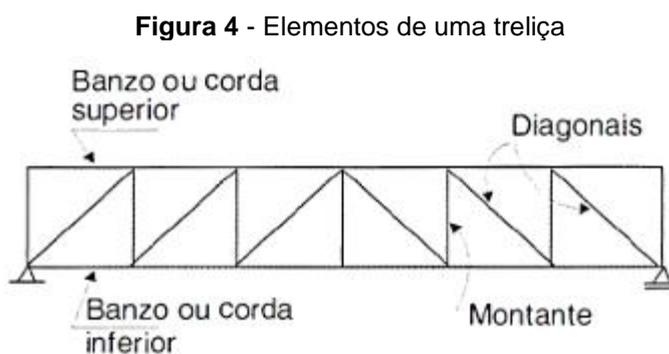
transversal de alma cheia apresenta boa eficiência no processo de montagem por ter um reduzido número de peças e ligações, o que leva a um canteiro de obras mais organizado e a um tempo de montagem menor.

### 2.6.2 Pórtico transversal treliçado

De acordo com Pfeil (2009), os sistemas de elementos lineares são formados pela combinação dos principais elementos lineares (tirantes, colunas e vigas), constituindo as estruturas das construções civis. A treliça é um sistema utilizado tipicamente em coberturas de edifícios industriais (galpões). Nas treliças as hastes trabalham predominantemente a tração ou compressão simples. O modelo teórico de análise estrutural de treliça tem os nós rotulados, porém as treliças construídas na prática têm os nós rígidos, os quais introduzem momentos fletores nas hastes. Entretanto, como as hastes individuais são geralmente esbeltas, as tensões de flexão resultam pequenas.

As treliças utilizadas são constituídas de segmentos de hastes, unidos em pontos denominados nós, formando uma configuração geométrica estável, de base triangular, que pode ser isostática ou hiperestática. (PFEIL, 2009).

Os elementos básicos de uma treliça estão ilustrados na Figura 4.



Fonte: Pfeil, 2009.

São estruturas treliçadas do tipo trapezoidais, triangulares e especiais, que suportam duas superfícies planas, com declividades iguais ou distintas, unidas por uma linha central denominada cumeeira. O espaçamento (4 a 8 m) entre as tesouras vai depender do tipo terço e vedação (BRITO, 2010).

## 2.7 TIPOLOGIA DE TRELIÇAS PARA COBERTURAS

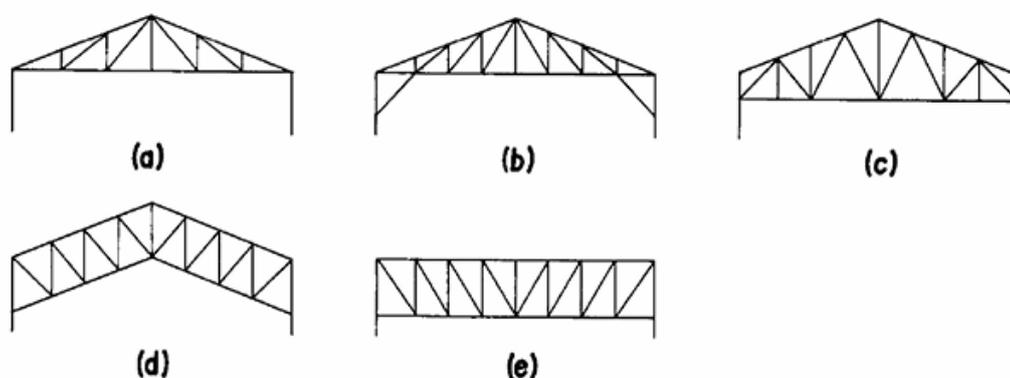
As principais vantagens das vigas de cobertura treliçadas são: a eficiência estrutural, as amplas possibilidades de composição das treliças e a simplicidade dos equipamentos necessários para a fabricação (CHAVES, 2007).

A utilização de treliças metálicas em edifícios industriais é amplamente difundida devido à sua eficiência estrutural, versatilidade e economia de material.

Conforme destacado por Bellei (2010), a escolha do tipo de treliça deve considerar fatores como o tipo de carregamento, o vão da estrutura e as condições ambientais. Além disso, para edificações industriais, o dimensionamento correto dessas soluções é essencial para garantir não apenas a estabilidade estrutural, mas também o desempenho e a durabilidade do sistema ao longo do tempo.

Existem diversas configurações que podem ser adotadas conforme as necessidades específicas de cada projeto, sendo algumas delas descritas a seguir com base nas representações da Figura 5.

**Figura 5** - Tipologia de treliças



Fonte: Bellei, 2010.

### 2.7.1 Pórtico com treliça em arco

Uma cobertura em curva pode ser projetada em arco conectado às colunas 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 (CHAVES, 2007).

São estruturas de grandes vãos e que suportam grandes cargas verticais. É uma estrutura muito flexível, e constituída normalmente por treliças de banzos paralelos de pequena altura (BRITO, 2010).

### 2.7.2 Pórtico com treliça trapezoidal

As treliças trapezoidais 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 (CHAVES, 2007).

Essas estruturas resolvem melhor os detalhes de apoio no que diz respeito ao encaixe das calhas. Podem ser articuladas ou engastadas. A vinculação segue o mesmo princípio adotado nos modelos em pórtico com treliça de banzos paralelos, ou seja, colunas engastadas na base, ligação rígida entre os banzos da treliça e a coluna e extremidades das diagonais e montantes rígidos (BARREIRO, 2015).

### 2.7.3 Pórtico com treliça de banzos paralelos

Para grandes inclinações podem-se usar treliças com banzo inferior não horizontal ou treliças de banzos paralelos. As treliças de banzos paralelos são muito flexíveis e os apoios devem ser rígidos e fixos. A rigidez da estrutura pode ser melhorada com adição de tirantes ligando os apoios. Entretanto esta solução tem o inconveniente do tirante só trabalhar a tração (BRITO, 2010).

As treliças de banzos paralelos apresentam diagonais e montantes de mesmo comprimento, o que permite padronizar os elementos estruturais e proporciona uma grande racionalização do processo de fabricação (CHAVES, 2007).

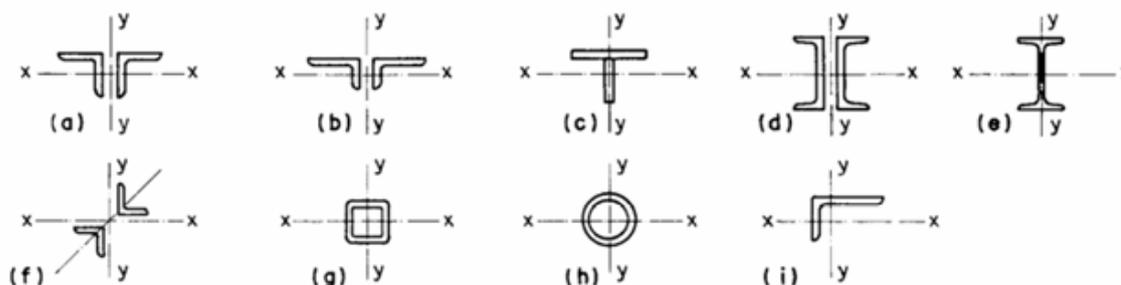
## 2.8 TIPOS DE BARRAS DE TRELIÇAS

As barras das treliças são, em geral, constituídas por perfis laminados únicos ou agrupados, e por perfis de chapa dobrada. As treliças mais leves são formadas por cantoneiras ou perfis, ligados por solda ou parafuso (BARREIRO, 2015).

De acordo com Bellei (2010), os tipos de seção empregados na formação de elementos das armações das coberturas devem ser selecionados sob o ponto de vista

técnico e econômico, procurando-se a solução mais apropriada. Os principais tipos de seção empregados na formação das armações são os indicados na Figura 6.

**Figura 6** - Seções de barras de treliça



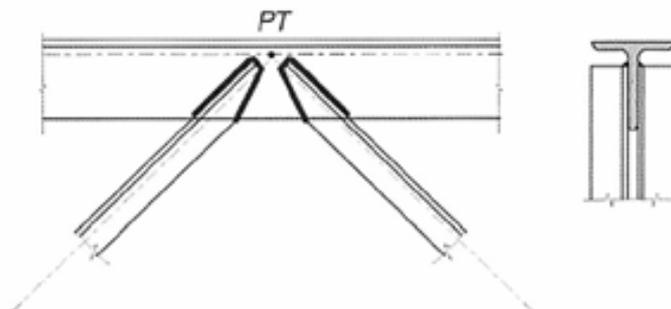
Fonte: Bellei, 2010.

A solução empregando-se perfis “U” é uma alternativa muito empregada, principalmente devido à facilidade de fabricação e montagem das estruturas treliçadas. Portanto, com essas considerações, optou-se por utilizar nos modelos de galpões deste trabalho seções de perfis cantoneiras para as diagonais e montantes, e a solução de perfis “2L” dupla cantoneira para as cordas ou banzos superiores e inferiores.

## 2.9 TIPOS DE LIGAÇÕES

As ligações são elementos fundamentais, uma vez que são os pontos notáveis de uma estrutura. As ligações são elementos de grande sensibilidade por se tratar de pontos de descontinuidade entre as barras, cujo comportamento é determinante na análise e no cálculo da estrutura. Uma das dificuldades com que o projetista se depara em fase de modelação da estrutura é exatamente definir o comportamento das ligações. (OLIVEIRA, 2011).

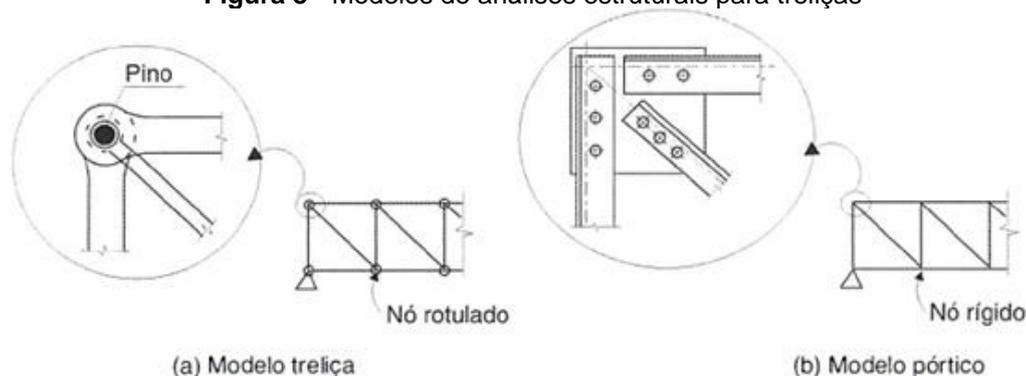
Segundo Pfeil (2009), nas treliças soldadas, ou os nós podem ter gusset's ou as hastes podem ser ligadas entre si diretamente, sem chapa auxiliar (Figura 7). Moderadamente, a construção soldada é mais econômica. A tendência, em treliças pequenas, é de fazer as ligações de fábrica com solda e as de campo com parafusos (para evitar o risco de soldas defeituosas no campo).

**Figura 7** - Ligação soldada sem chapa auxiliar

Fonte: Pfeil, 2009.

## 2.10 ANÁLISES ESTRUTURAIS DE TRELIÇAS

O modelo de cálculo tradicional para treliças (Figura 8) é aquele em que as cargas são aplicadas nos nós e as ligações entre as barras são rotuladas, isto é, não há impedimento à rotação relativa entre as barras, não sendo, portanto, transmitidos momentos fletores. No passado, construíam-se treliças com nós providos de pinos, a fim de materializar as rótulas admitidas no cálculo. Os nós rotulados são caros, além disso, desenvolvem atrito suficiente para impedir o funcionamento da rótula (PFEIL, 2009).

**Figura 8** - Modelos de análises estruturais para treliças

Fonte: Pfeil, 2009.

## 2.11 CARREGAMENTOS

Conforme a NBR 14762 (ABNT, 2010), que trata do Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio - Procedimento, no projeto dessas estruturas é necessário considerar as ações que geram impactos significativos

nos estados limite último e de serviço. Essas ações, descritas no item 6.1.2 da norma, são classificadas em permanentes, variáveis e excepcionais, com base em sua variabilidade ao longo do tempo. As ações permanentes correspondem a um conjunto de esforços com valores praticamente constantes durante a vida útil da edificação. Em contraste, as ações variáveis englobam aquelas que apresentam considerável flutuação ao longo do tempo (BARREIRO, 2015).

#### 2.11.1 Ações permanentes

Para efeitos de cálculo, a NBR 6120 (ABNT, 2019), que trata das Ações para o cálculo de estruturas de edificações, apresenta valores tabelados destinados à estimativa do peso próprio (PP) de cada elemento construtivo. No entanto, devido à utilização de um software para realizar o cálculo estrutural, esse procedimento pode ser dispensado, permitindo a adoção de dados mais realistas. Isso ocorre porque o programa simula automaticamente o peso próprio de cada elemento, a partir da definição do tipo de material e dos perfis selecionados. Assim, com o uso do aço especificado e dos perfis levantados, o peso próprio foi considerado automaticamente.

Apesar dessa funcionalidade, o software apenas calcula o peso próprio dos elementos construtivos da estrutura principal. Outros carregamentos, como os relacionados a terças, telhas, tirantes e demais elementos fixos à edificação, devem ser inseridos manualmente. Tais cargas adicionais consideradas ações permanentes (PERM) são essenciais para atender às diretrizes estabelecidas pela NBR 6120 (ABNT, 2019).

#### 2.11.2 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 (CHAVES, 2007).

Para a estrutura metálica de um galpão podem considerados dois tipos de cargas dentro da classificação de ações variáveis: a sobrecarga mínima estabelecida pela NBR 8800 (ABNT, 2008) e as cargas devidas ao vento incidente na edificação.

O item B.5.2 do anexo B da NBR 8800 (ABNT, 2008) define uma sobrecarga mínima (SC) de 0,25 kN/m<sup>2</sup>, aplicada em projeção horizontal. Essa carga visa compensar os pesos das instalações elétricas, hidráulicas, isolamentos termoacústicos e pequenas peças fixadas na cobertura.

### 2.11.3 Ações do vento

As forças geradas pelo vento são um dos principais fatores de carregamento em edificações, podendo afetar tanto a segurança quanto a durabilidade das construções. A Norma Brasileira NBR 6123 (ABNT, 1988) estabelece os critérios e as metodologias para o cálculo dessas forças, permitindo que os engenheiros projetem estruturas que resistam adequadamente aos efeitos do vento. Este item aborda as principais disposições, a importância do dimensionamento correto das forças devidas ao vento e os aspectos técnicos envolvidos no processo de cálculo e aplicação dessa norma nas edificações.

O dimensionamento das forças devidas ao vento depende de uma série de fatores, que devem ser considerados no cálculo das pressões atuantes nas superfícies das edificações. A NBR 6123 (ABNT, 1988) classifica esses fatores de maneira detalhada, abordando as características do terreno, a localização geográfica e o formato das construções.

O cálculo das forças devidas ao vento envolve a determinação da pressão do vento sobre as superfícies expostas da edificação. A fórmula básica utilizada para o cálculo das forças é determinada pela equação (01).

$$F = q ( C_e - C_i ) A \quad (01)$$

Onde:

$q$  = Pressão dinâmica do vento (N/m<sup>2</sup>);

$C_e$  = Coeficiente de pressão externa;

$C_i$  = Coeficiente de pressão interna;

$A$  = Área de incidência da pressão dinâmica (m<sup>2</sup>).

A pressão dinâmica (N/m<sup>2</sup>) é determinada pela equação (02).

$$q = 0,613 V k^2 \quad (02)$$

Onde:

$V_k$  = Velocidade característica do vento (m/s).

O vento geralmente não atinge uma edificação com sua velocidade básica, mas sim com uma velocidade característica. Conforme a NBR 6123 (ABNT, 1988), isso ocorre devido a diversos fatores que influenciam seu trajeto, como a topografia local, a rugosidade do terreno, as alturas e dimensões específicas da edificação, as condições particulares de vida útil, sua importância e as possíveis consequências de sua ruína para o meio ambiente. A velocidade característica do vento é calculada por meio da equação (03).

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (03)$$

Onde:

$V_0$  = Velocidade básica do vento (m/s);

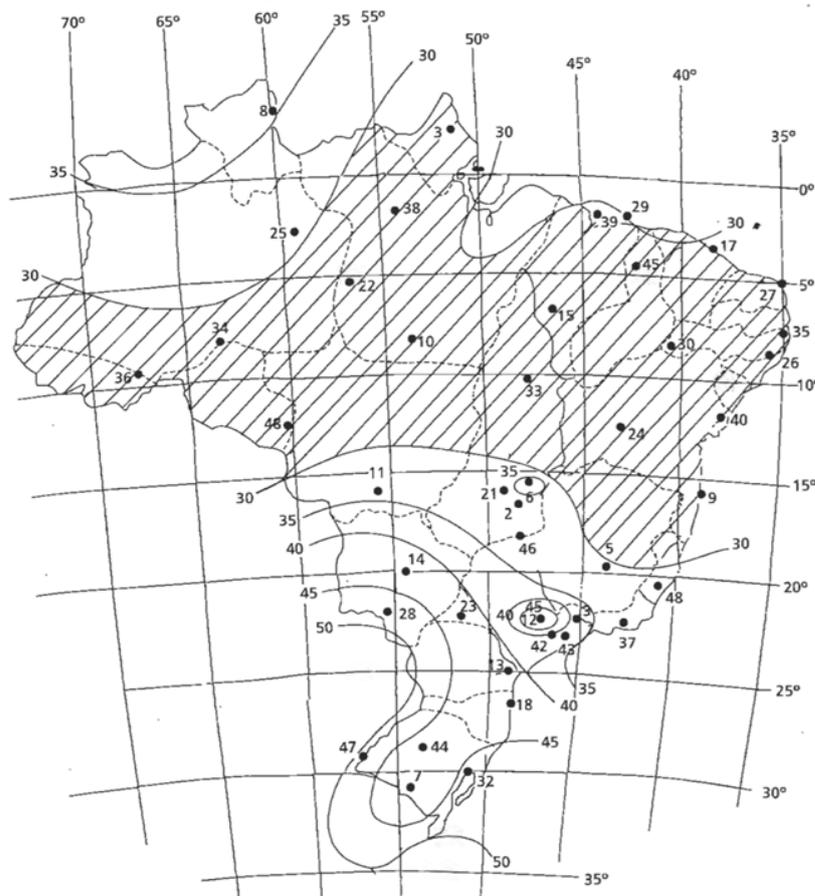
$S_1$  = Fator topográfico;

$S_2$  = Fator de rugosidade;

$S_3$  = Fator estatístico.

A velocidade básica corresponde à máxima velocidade média do vento registrada em uma região específica, com duração de 3 segundos, medida a 10 metros de altura em relação ao terreno, em um local plano e aberto, sem a presença de obstáculos. Este valor, que é excedido apenas uma vez a cada 50 anos, pode ser obtido no mapa de isoplelas apresentado na NBR 6123 (ABNT, 1988), representado pela Figura 9.

**Figura 9 - Mapa de isopletas**



Fonte: NBR 6123, 1988.

O fator  $S_1$  ajusta a velocidade do vento considerando a influência da geografia nos arredores da edificação. Em outras palavras, sua aplicação depende exclusivamente da variação do relevo do terreno.

O fator  $S_2$ , conforme definido pela NBR 6123 (ABNT, 1988), considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em análise. Para sua aplicação, é necessário classificar o terreno em uma das cinco categorias especificadas no item 5.3.1 da referida norma. Em seguida, com base na geometria da edificação, deve-se enquadrá-la em uma das três classes possíveis descritas no item 5.3.2.

O fator  $S_3$  leva em conta conceitos estatísticos, refletindo o grau de segurança necessário para a construção e considerando uma vida útil de 50 anos. Seus valores estão disponíveis na Tabela 3 da NBR 6123 (ABNT, 1988).

Os coeficientes de pressão interna e externa utilizados na equação (01) são determinados com base na geometria da edificação. O coeficiente interno é

influenciado pelas aberturas da estrutura, que permitem a movimentação de ar. Quando o ar entra na edificação, ocorre uma sobrepressão nas paredes internas e na cobertura, enquanto a saída de ar provoca uma sucção nessas mesmas superfícies. Para calcular esses coeficientes internos, a norma apresenta diferentes configurações de aberturas.

## 2.12 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Os critérios para a combinação das ações estruturais, ou seja, aquelas que possuem probabilidade de ocorrer simultaneamente em um determinado período, estão estabelecidos na norma NBR 8800 (ABNT, 2008). Esses critérios são essenciais para garantir a segurança e o desempenho adequado das estruturas metálicas, considerando diferentes condições de carregamento ao longo da vida útil da edificação.

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

As combinações últimas (ELU) são utilizadas para a verificação da resistência dos elementos estruturais, assegurando que a estrutura suporte as cargas máximas previstas sem atingir a ruptura ou colapso. Essas combinações são determinadas com base no item 4.7.7.2 da ABNT NBR 8800 (ABNT, 2008). As combinações últimas obtidas para a estrutura são:

- a) comb1 (ELU) = (1,25. PP+ 1,50. PERM) + 1,50.SC
- b) comb2 (ELU) = (1,0. PP+ 1,0. PERM) + 1,40.vento 0°
- c) comb3 (ELU) = (1,0. PP+ 1,0. PERM) + 1,40.vento 90°

As combinações de serviço (ELS) são utilizadas para a verificação das deformações da estrutura, garantindo que os deslocamentos e vibrações permaneçam dentro dos limites aceitáveis para o uso e conforto dos ocupantes. Essas combinações são definidas conforme o item 4.7.7.3 da ABNT NBR 8800 (ABNT, 1988). As combinações de serviço obtidas para a estrutura são:

- a) comb1 (ELS) = (1,0. PP+ 1,0. PERM) + 0,70.SC
- b) comb2 (ELS) = (1,0. PP+ 1,0. PERM) + 1,0.vento 0° + 0,70.SC

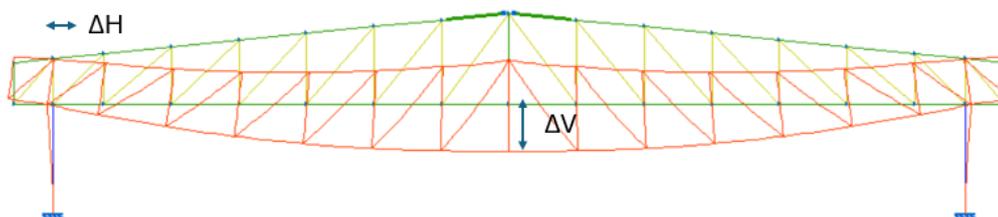
$$c) \text{ comb3 (ELS) } = (1,0. \text{ PP} + 1,0. \text{ PERM}) + 1,0. \text{ vento } 90^\circ + 0,70. \text{ SC}$$

### 2.13 DESLOCAMENTO LIMITE

O Anexo C da NBR 8800 (ABNT, 2008) estabelece os valores máximos para deslocamentos elásticos verticais e horizontais em estruturas. Esses limites são utilizados para verificar o Estado Limite de Serviço em relação a deslocamentos excessivos da estrutura.

O maior deslocamento horizontal é causado pelo vento transversal (vento $90^\circ$ ). As demais ações (PP, PERM, SC e vento $0^\circ$ ) são responsáveis pelos maiores deslocamentos verticais. A Figura 10 mostra as deformações típicas de um modelo de pórtico transversal com treliça trapezoidal. Para cada caso indica-se a posição onde devem ser verificados os deslocamentos máximos verticais e horizontais.

**Figura 10** - Deslocamento típico de um pórtico treliçado



Fonte: Adaptado *Cype3D*, 2025.

Em galpões industriais, é necessário avaliar os deslocamentos verticais no meio do vão da viga de cobertura (V) e os deslocamentos horizontais no topo da coluna (H).

De acordo com o Anexo C da NBR 8800, os valores máximos permitidos são:

- deslocamento horizontal máximo (H):  $H/300$ , onde H é a altura total da coluna;
- deslocamento vertical máximo (V):  $L/250$ , sendo L o vão teórico entre apoios.

Esses critérios garantem que os deslocamentos permaneçam dentro de limites aceitáveis para a funcionalidade e segurança da estrutura.

### 2.14 COMPRESSÃO SIMPLES

Uma peça está submetida à compressão simples quando a carga é aplicada de forma centrada ao seu centro de gravidade, resultando exclusivamente em um esforço

de compressão. Essa condição é mais comum em elementos de treliça, uma vez que esses componentes são, geralmente, considerados rotulados em ambas as extremidades, o que evita a introdução de momentos fletores.

Conforme Pfeil (2009), o esforço de compressão, ao contrário do esforço de tração, tende a acentuar mais as imperfeições geométricas da peça, aumentando o risco de ocorrência da flambagem por flexão. Esse fenômeno é crítico, pois pode comprometer a estabilidade do elemento estrutural, sendo necessário um dimensionamento cuidadoso para garantir sua segurança e eficiência.

## 2.15 FLAMBAGEM POR FLEXÃO

Pfeil (2009) traz a definição de flambagem como sendo um deslocamento horizontal da barra devido uma carga aplicada paralela ao seu comprimento (efeito semelhante a uma flecha em vigas). Este fenômeno depende de alguns fatores como, por exemplo, a forma que a peça foi construída, local de aplicação da carga (centrada ou excêntrica), irregularidades de fabricação etc. Este deslocamento é classificado como global, quando envolve todo o sistema, ou local, quando envolve os elementos isolados que compõe a peça (mesa e alma, em perfis I).

A determinação da carga crítica, ou carga de Euler, se dá através das características da peça, como pode ser visto na equação (04).

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (04)$$

Onde:

$N_{cr}$  = Carga nominal crítica;

$E$  = Módulo de elasticidade;

$I$  = Inércia;

$l$  = Comprimento da barra.

O comprimento de flambagem é definido como a distância entre os pontos de momento fletor nulo em uma haste submetida à compressão e deformada lateralmente. De acordo com Bellei (2010), o índice de esbeltez de uma barra comprimida é calculado pela relação entre o comprimento efetivo de flambagem e o raio de giração da seção transversal.

O comprimento efetivo de flambagem é determinado pelo comprimento real da barra que não está contra ventada, multiplicado por um fator que pode ser interpretado



montagem ou construção. Antagonicamente, os valores recomendados levam esses empecilhos em consideração, uma vez que ele prevê imperfeições geométricas (incluindo tensões residuais) e erros de montagem.

De acordo com Bellei (2010), o índice de esbeltez é a razão do comprimento de flambagem pelo raio de giração mínimo da seção transversal, como mostra a equação (06).

$$\lambda = \frac{fl}{i} \quad (06)$$

Onde:

$\lambda$  = Índice de esbeltez;

$fl$  = Comprimento efetivo de flambagem;

$i$  = Raio de giração.

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), o índice de esbeltez das barras comprimidas, tomando como a maior relação entre o produto KL e o raio de giração correspondente, sendo L o comprimento destravado, não deve ser superior a 200.

## 2.16 TRAÇÃO SIMPLES

Conforme apontado por Pfeil (2009), os efeitos da tração tendem a retificar a peça, reduzindo as imperfeições relacionadas a curvaturas iniciais. No entanto, se o perfil for enrijecido, é comum ocorrer o fenômeno da distorção, que comprime algumas partes da peça devido à tensão de tração. Esse efeito é mais frequente em perfis formados a frio, que apresentam maior sensibilidade a esse comportamento.

Em elementos submetidos à tração, destacam-se duas regiões principais: a seção bruta e a seção líquida. A seção bruta corresponde à geometria original da peça, enquanto a seção líquida é obtida ao subtrair da seção bruta as áreas referentes a cortes ou furos. A distribuição de tensões na seção bruta é considerada uniforme, enquanto na seção líquida ocorre uma concentração de tensões nas proximidades de elementos de fixação, como parafusos ou soldas.

O dimensionamento de elementos tracionados é considerado mais simples em comparação aos elementos comprimidos. De acordo com a norma NBR 8800 (ABNT, 2008), a resistência nominal à tração na seção bruta é determinada pela equação 07.

$$Nt, sd = \frac{Agfy}{\gamma a1} \quad (07)$$

Onde:

$Nt, sd$  = Resistência a tração;

$Ag$  = Área da seção bruta (mm<sup>2</sup>);

$fy$  = Tensão de escoamento (Mpa);

$\gamma a1$  = Coeficiente de ponderação.

## 2.17 FLEXÃO SIMPLES

Pfeil (2009) define que uma peça está submetida a flexão simples quando é submetida ao esforço de momento fletor e cortante. O procedimento de dimensionamento se resume a determinar os esforços submetidos a uma barra e posteriormente compará-los a resistência do perfil de análise, conforme as equações (08) e (09). Além disso, outros dois fatores afetam a resistência a flexão das vigas: flambagem lateral e flambagem local.

Como já fora mencionado, a flambagem local, diferentemente da global, acontece quando há a perda de instabilidade de alguma chapa constituinte do perfil (isto pode diminuir a resistência ao esforço cortante). Já a flambagem lateral é algo muito comum nas terças da cobertura, e ocorre quando o perfil perde instabilidade no plano principal de flexão e apresenta deslocamentos laterais. Por isso faz-se necessária a adoção de linhas de corrente para diminuir o comprimento de flambagem da peça, de forma econômica.

$$Msd \leq Mrd \quad (08)$$

$$Vsd \leq Vrd \quad (09)$$

Onde:

$Msd$  = Momento fletor solicitante de cálculo;

$Mrd$  = Momento fletor resistente de cálculo;

$Vsd$  = Força cortante solicitante de cálculo;

$Vrd$  = Força cortante resistente de cálculo.

## 2.18 FLEXÃO COMPOSTA

A flexão composta ocorre quando o momento fletor solicitante de cálculo e a força normal solicitante de cálculo atuam em conjunto. Neste cenário, estas solicitações devem satisfazer a equação 10.

$$\frac{N_{sd}}{N_{rd}} + \frac{M_{x,sd}}{M_{x,rd}} + \frac{M_{y,sd}}{M_{y,rd}} \leq 1,0 \quad (10)$$

Onde:

$N_{sd}$  = Força normal solicitante de cálculo;

$N_{rd}$  = Força normal resistente de cálculo;

$M_{x,sd}$  = Momento fletor no eixo x solicitante de cálculo;

$M_{x,rd}$  = Momento fletor no eixo x resistente de cálculo;

$M_{y,sd}$  = Momento fletor no eixo y solicitante de cálculo;

$M_{y,rd}$  = Momento fletor no eixo y resistente de cálculo.

O resultado desta expressão normalmente é tratado em porcentagem. As frações de momento são referentes aos eixos x e y, respectivamente.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho consistiu no estudo do projeto estrutural da cobertura metálica analisada, contemplando a caracterização geométrica da estrutura e a identificação dos perfis metálicos utilizados na fabricação dos elementos constituintes. Realizou-se o levantamento das cargas atuantes sobre a estrutura, considerando tanto as ações permanentes quanto as variáveis. As forças decorrentes da ação do vento foram determinadas com o auxílio do programa *VisualVentos*, seguindo os critérios estabelecidos pela norma NBR 6123 (ABNT, 1988).

A modelagem numérica e a análise estrutural da cobertura foram desenvolvidas por meio do software *Cype3D*, no qual o projeto original foi verificado quanto aos Estados Limites Últimos (ELU) e aos Estados Limites de Serviço (ELS), conforme as prescrições das normas NBR 8800 (ABNT, 2008) e NBR 14762 (ABNT, 2010).

As sugestões de otimização da estrutura foram elaboradas com base em um estudo paramétrico, levando em consideração as características da estrutura original, e envolvendo diferentes configurações de pórticos transversais, entre elas: treliça trapezoidal, pórticos de alma cheia, treliça com banzos paralelos e treliça em arco. O desempenho estrutural dessas tipologias foi avaliado utilizando parâmetros técnicos, como a taxa de consumo de aço e os deslocamentos verticais e horizontais. Todos os modelos propostos foram dimensionados com o auxílio do software *Cype3D*, que possibilita simulações detalhadas das ações e combinações de carregamentos, conforme os critérios normativos vigentes.

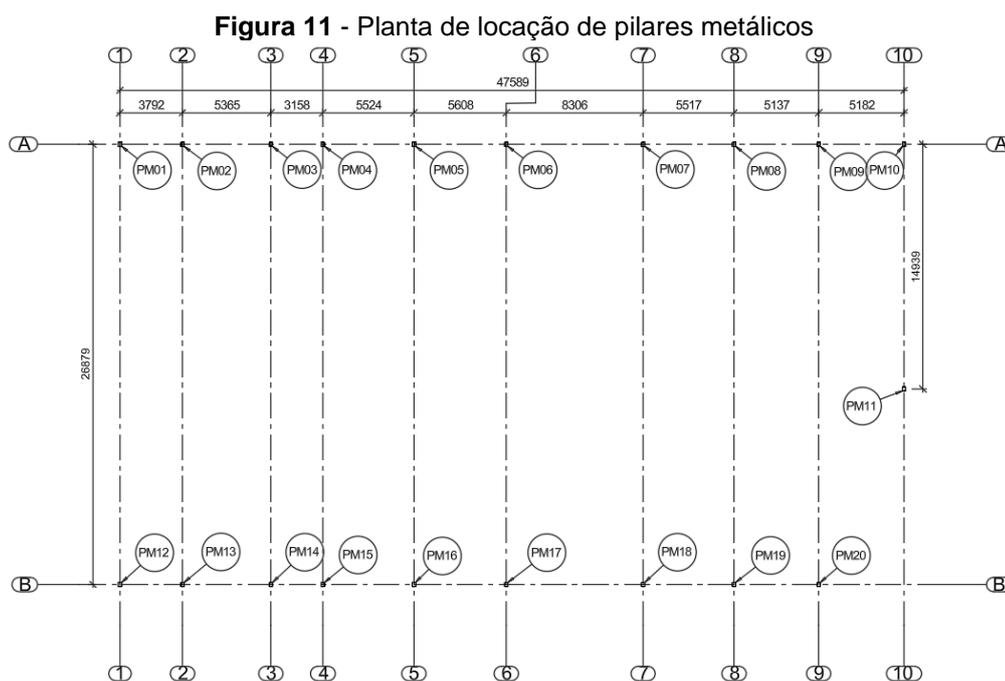
As plantas e os detalhamentos das estruturas foram desenvolvidos utilizando o software *Advance Steel*. Este programa foi empregado na elaboração dos desenhos das estruturas analisadas, permitindo uma representação gráfica clara, precisa e detalhada, compatível com os requisitos técnicos de documentação de projetos de estruturas metálicas.

Este estudo concentrou-se na análise crítica do pórtico treliçado do projeto real, o qual serviu como base para o dimensionamento e avaliação de quatro configurações alternativas de pórticos transversais. Todo o procedimento de cálculo e verificação foi conduzido em conformidade com as especificações das normas brasileiras NBR 8800 (ABNT, 2008), NBR 14762 (ABNT, 2010), NBR 6120 (ABNT, 2019) e NBR 6123 (ABNT, 1988).

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO REAL

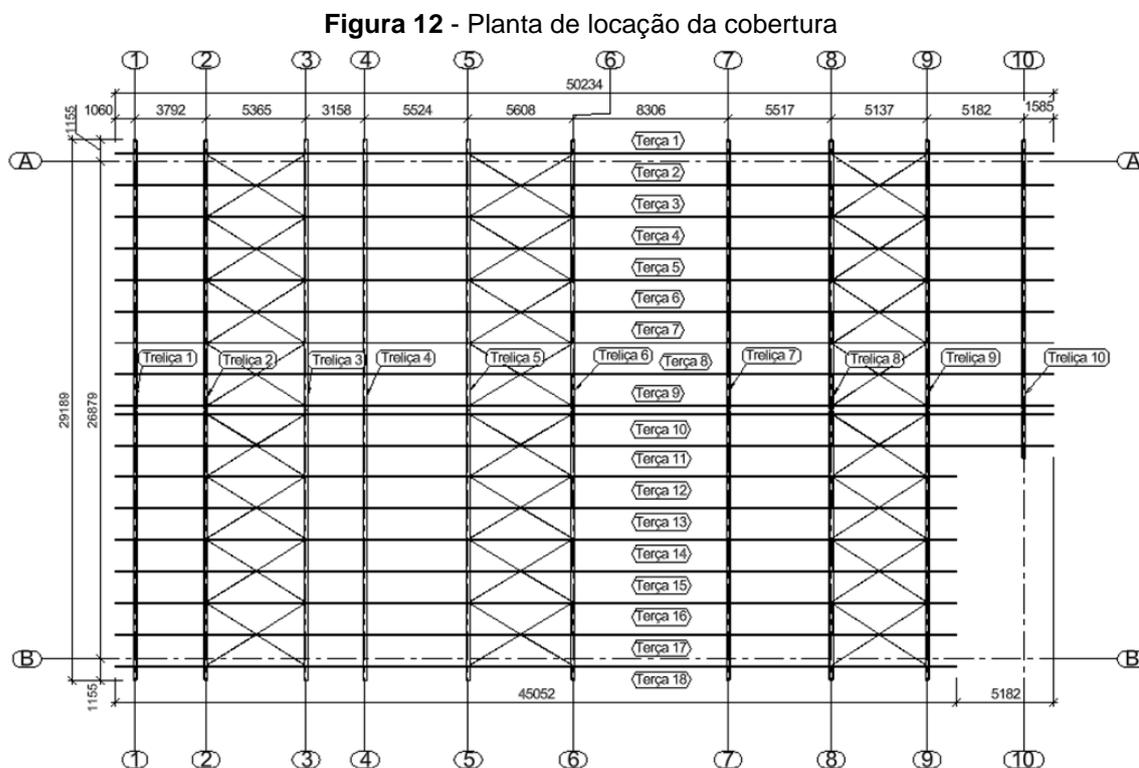
O projeto real analisado consiste em uma cobertura metálica de um galpão de duas águas, caracterizado pela presença de nove pórticos transversais treliçados, dispostos com espaçamento variável ao longo da estrutura. Os pilares que sustentam o galpão são metálicos, apresentando seções uniformes, ou seja, sem variações dimensionais entre eles. Para as vedações laterais, foram utilizados painéis termoacústicos, que oferecem isolamento térmico e acústico, proporcionando maior eficiência energética e conforto no interior do galpão. A cobertura do galpão é composta por isotelhas de 7 cm de espessura, fabricadas com duas camadas de chapa de aço.

O galpão em análise apresenta dimensões expressivas, a Figura 11 apresenta a planta de locação dos pilares metálicos da estrutura. A cobertura conta com dois tipos de treliça, o tipo um para as treliças dos eixos de 1 a 9, no qual o vão real da treliça metálica medido entre os eixos dos pilares é de 26,88 metros. O tipo de treliça de número dois é usada no eixo 10 e equivale aproximadamente metade do vão livre da treliça do tipo um. As colunas metálicas que sustentam a edificação possuem uma altura individual de 3,25 metros, resultando em uma altura total da construção de 4,815 metros. Temos então uma área construída de 1.399 m<sup>2</sup>.



Fonte: Autor, 2025.

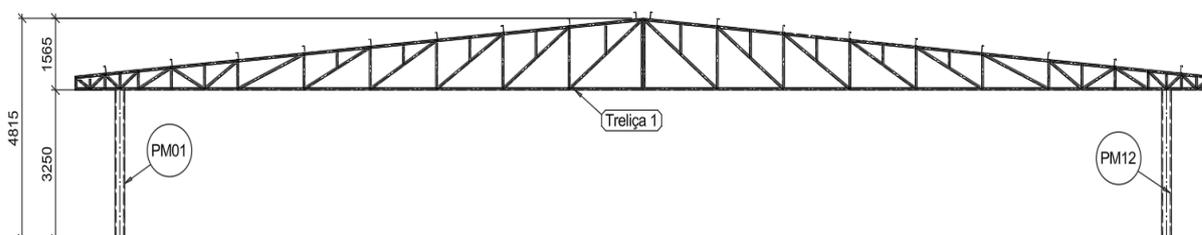
A Figura 12 representa a planta de localização da cobertura do galpão a ser analisado.



Fonte: Autor, 2025.

Na Figura 13 é possível observar a estrutura em vista, apresentando os detalhes das treliças tipo um, bem como suas cotas verticais. Ressalta-se que os valores estão em milímetros.

**Figura 13 - Elevação do pórtico transversal tipo um do projeto original**



Fonte: Autor, 2025.

A edificação em análise foi projetada para abrigar um instituto pediátrico, o que adiciona um nível de complexidade e especificidade às suas características estruturais. Esse uso exige a integração de diversas instalações hospitalares, como

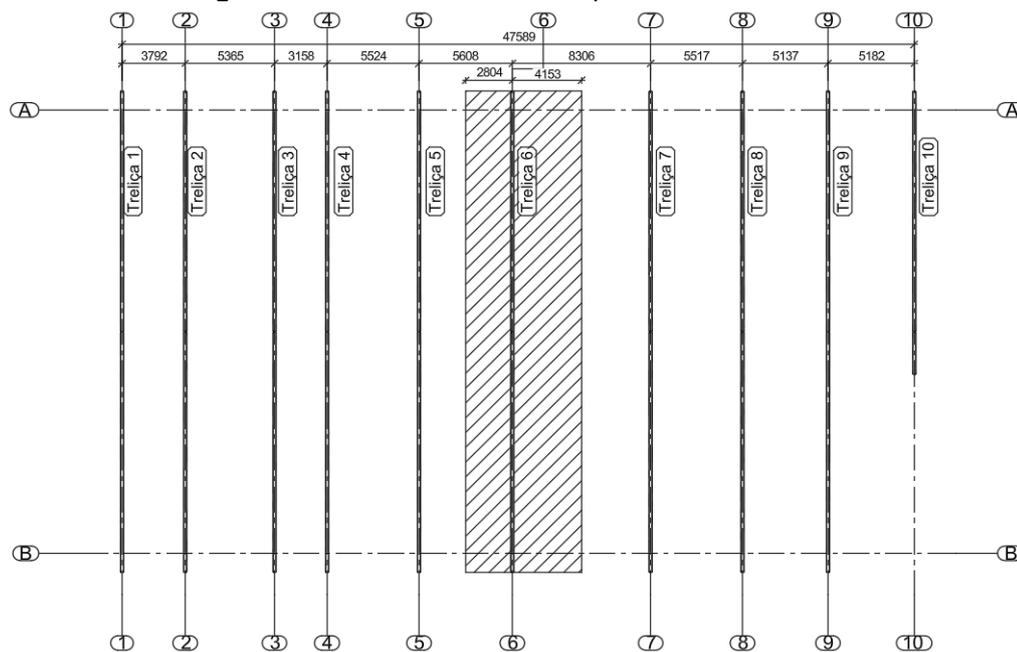
sistemas de climatização, redes hidráulicas, elétricas, de gases medicinais, além de elementos arquitetônicos e funcionais próprios de ambientes de saúde.

Esses fatores devem ser criteriosamente considerados na análise das cargas atuantes na cobertura metálica. A presença desses sistemas pode implicar em cargas adicionais e distribuições de peso que influenciam diretamente o dimensionamento e a estabilidade da estrutura, exigindo um projeto robusto e adaptado às demandas particulares de um hospital.

Além disso, é necessário atender aos rigorosos requisitos normativos de edificações hospitalares, que abrangem aspectos como acessibilidade, segurança contra incêndios, isolamento acústico e controle térmico, todos os quais têm impacto sobre a concepção e o desempenho estrutural da edificação. Essas condições tornam a análise estrutural ainda mais crítica, garantindo não apenas a segurança e a funcionalidade do galpão, mas também o conforto e a proteção dos pacientes, profissionais de saúde e demais usuários.

Os pórticos transversais, elementos estruturais fundamentais para a estabilidade do galpão, estão dispostos de forma variável ao longo de seu comprimento. Em especial, destaca-se o pórtico número 6, que se sobressai por possuir a maior área de influência em relação aos carregamentos atuantes. Este pórtico apresenta uma largura de influência de 2,804 metros na lateral esquerda e 4,153 metros na lateral direita, conforme mostra na Figura 14, evidenciando uma distribuição assimétrica das forças atuantes.

**Figura 14 - Área de influência do pórtico transversal 6**



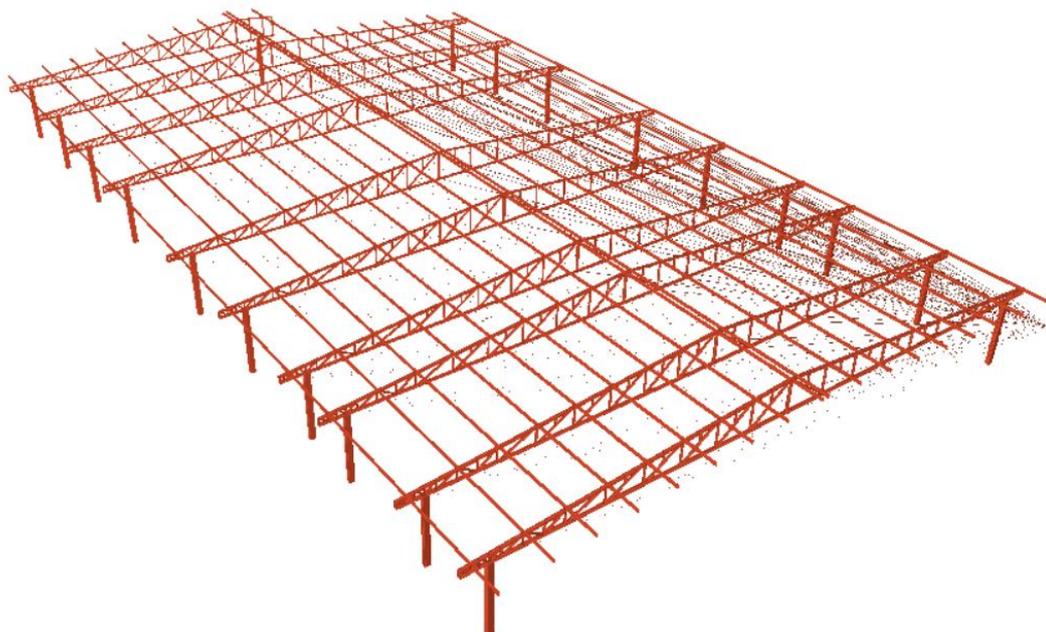
Fonte: Autor, 2025.

Essa configuração peculiar faz com que a treliça metálica associada a este pórtico esteja deslocada em relação ao ponto central da área de influência, o que pode demandar uma análise estrutural diferenciada para assegurar a eficiência e a segurança do sistema, considerando as cargas desiguais que atuam sobre ele.

A cobertura é composta por terças metálicas e isotelhas de 7 cm de espessura, a estrutura possui a inclinação de 8%. O fechamento lateral é feito com painéis isolantes e a fundação do galpão é projetado com um radier de 12 cm de espessura.

A Figura 15 mostra a modelagem 3D do galpão a ser analisado.

**Figura 15** - Modelagem 3D do galpão metálico



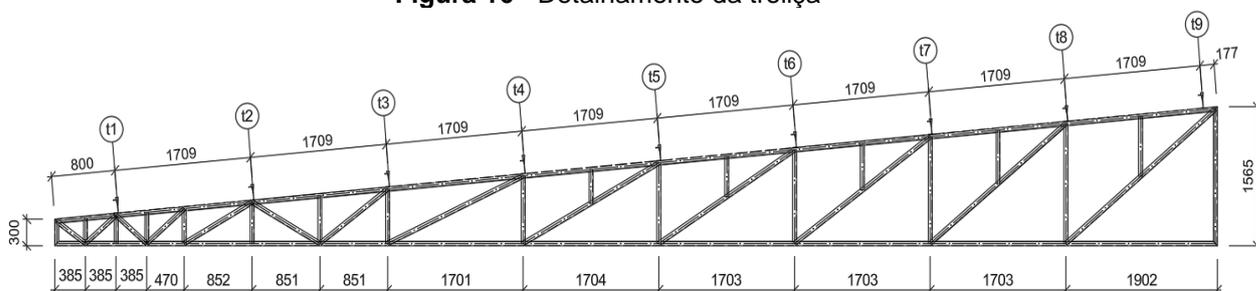
Fonte: Autor, 2025.

### 3.2 PÓRTICO TRANSVERSAL DO PROJETO REAL

O pórtico transversal da edificação é constituído por uma treliça metálica do tipo trapezoidal, que se destaca por sua altura superior em comparação às treliças do tipo triangular. Essa configuração oferece vantagens estruturais significativas, incluindo a redução dos esforços axiais nos banzos, o que contribui para uma melhor distribuição de tensões e maior eficiência na sustentação de cargas.

A Figura 16 ilustra o detalhamento de metade da tesoura, bem como o posicionamento das terças conforme o projeto, medidas em milímetros.

**Figura 16** - Detalhamento da treliça



Fonte: Autor, 2025.

Os perfis metálicos utilizados na estrutura estão especificados conforme os critérios descritos no Capítulo 2, Seção 2.8 do projeto. Estes perfis são do tipo

conformados a frio e fabricados a partir do aço ASTM A36, material amplamente reconhecido por sua confiabilidade em aplicações estruturais.

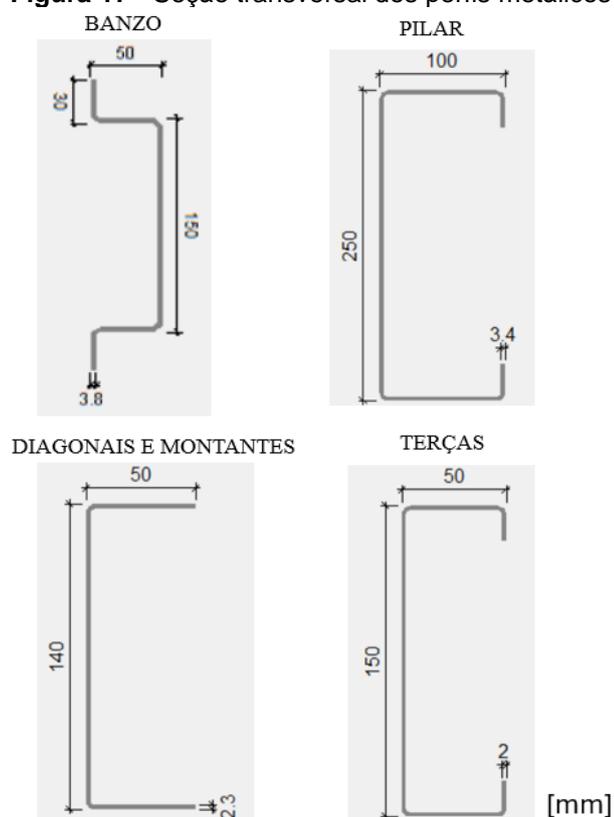
As propriedades mecânicas do aço utilizado incluem a resistência ao escoamento ( $f_y$ ) de 250 MPa, garantindo deformações elásticas controladas antes de atingir o limite plástico, e resistência à ruptura ( $f_u$ ) de 400 MPa, assegurando uma margem de segurança adequada contra falhas por ruptura da seção transversal.

A Figura 17 representa a seção transversal dos perfis utilizados para fabricação dos elementos estruturais do galpão metálico.

Abaixo estão detalhados os principais perfis empregados em cada elemento estrutural:

- banzos da treliça: Perfil cartola 150x50x30x3,80;
- diagonais e montantes da treliça: Perfil U 140x50x2,25;
- pilares: Perfil duplo U enrijecido 250x100x30x3,35;
- terças: Perfil U enrijecido 150x50x17x2,00.

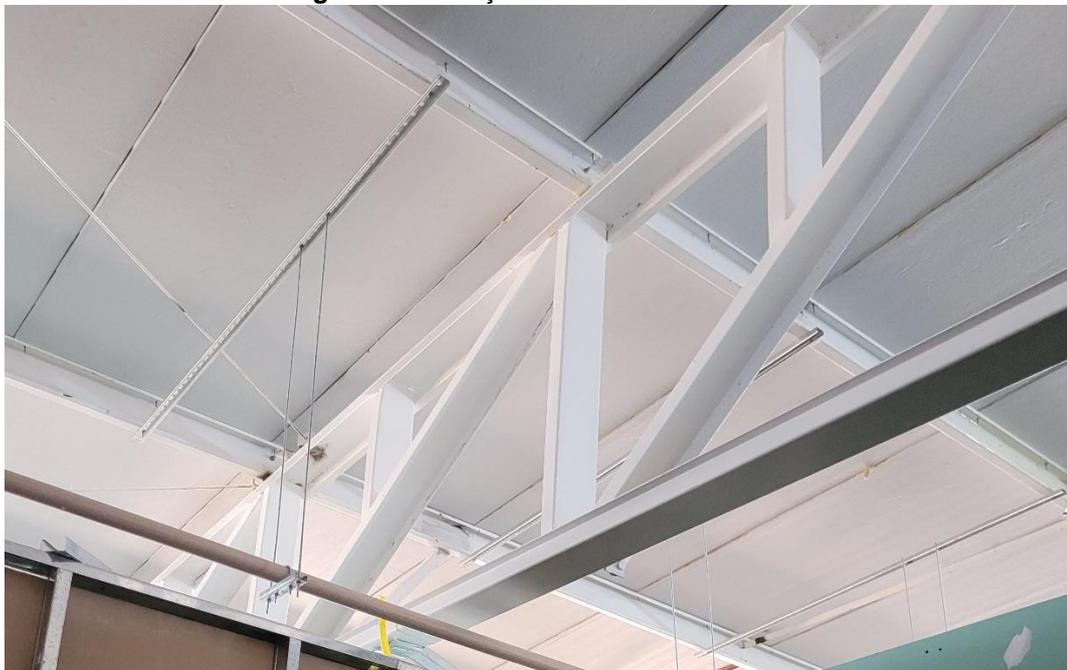
**Figura 17** - Seção transversal dos perfis metálicos



O sistema de contraventamento horizontal da estrutura é formado por barras lisa de aço de 10 milímetros de diâmetro.

A Figura 18 mostra com detalhes a estrutura executada na obra, com foco nos perfis utilizados para a fabricação das treliças do pórtico transversal.

**Figura 18** - Treliça real executada na obra



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 19 mostra a estrutura executada na obra, com as treliças montadas, terças e pilares, de acordo com o projeto.

**Figura 19** - Montagem da estrutura metálica do galpão



Fonte: Autor, 2023.

### 3.3 QUANTITATIVO DE AÇO DO PROJETO REAL

A Tabela 2 apresenta a lista de materiais referente a uma treliça de tipo um do projeto real. Esta tabela contempla a descrição dos perfis utilizados, o peso linear de cada elemento, o comprimento total, além do peso total estimado de cada componente, servindo de base para a avaliação do consumo de aço da estrutura.

**Tabela 2** - Quadro de materiais da treliça tipo um

Tipo de material	Elemento	Perfil (mm)	Comprimento (m)	Peso (Kg/m)	Peso total (Kg)
Aço conformado a frio	Banzo	C150x50x30x3,80	62,22	9,15	809,14
	Montante	U140x50x2,25	21,72	4,23	
	Diagonal	U140x50x2,25	34,98	4,23	

Fonte: Autor, 2025.

A Tabela 3 apresenta a quantidade total de aço empregada na fabricação de todos os elementos estruturais, incluindo os dois tipos de treliças que compõem o projeto original, permitindo uma estimativa global do consumo de material na execução da estrutura metálica do galpão.

**Tabela 3** - Quadro de materiais do projeto original

Tipo de material	Elemento	Perfil (mm)	Comprimento (m)	Peso (Kg/m)	Peso total (Kg)
Aço conformado a frio	Pilar	Ue250x100x30x3,35	130,00	10,53	12701,15
	Banzo	C150x50x30x3,80	591,09	9,15	
	Montante	U140x50x2,25	206,34	4,23	
	Diagonal	U140x50x2,25	332,31	4,23	
	Terça	Ue150x50x17x2,00	867,93	4,20	
Aço laminado	Contraventamento	Ø3/8	308,52	0,617	190,35

Fonte: Autor, 2025.

No total, foram utilizados 12.891,50 kg de aço para a execução da obra, que abrange uma área total de 1.399 m<sup>2</sup>. Com base nesses dados, o consumo específico

de aço foi calculado em 9,21 kg/m<sup>2</sup>, um valor que reflete a relação entre a massa total do material empregado e a área construída.

Esses valores são fundamentais para a análise da eficiência estrutural do projeto, permitindo comparações com outros modelos similares e possibilitando otimizações no dimensionamento da estrutura, caso necessário.

### 3.4 AÇÕES ATUANTES NO PROJETO

As ações permanentes correspondem a um conjunto de cargas com valores praticamente constantes ao longo da vida útil da edificação. Elas incluem:

- a) Peso próprio (PP): esta carga é calculada automaticamente pelo software de análise estrutural, considerando o peso de todos os elementos modelados, como as treliças, pilares, terças e contraventamentos;
- b) Carga permanente adicional (PERM): refere-se ao peso de elementos não modelados diretamente no software, como as telhas. De acordo com o fabricante, a isotelha trapezoidal PIR possui um peso próprio de 0,11 kN/m<sup>2</sup> (ISOESTE, 2024).

Para ações variáveis temos uma carga acidental de cobertura ou sobrecarga (SC), refere-se ao valor adotado para considerar eventuais sobreposições ou ações que possam causar danos à cobertura. De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, esse valor é definido como 0,25 kN/m<sup>2</sup>.

### 3.5 CARGA DE VENTO

Na avaliação das forças devidas ao vento se estabeleceu uma velocidade básica  $V_0=30\text{m/s}$ , o que abrange todo o Norte e Nordeste, parte da região Sudeste e Centro Oeste do Brasil.

Fator topográfico  $S_1 = 1$ , para terreno francamente acidentado, de acordo com o item 5.2 da NBR 6123 (ABNT, 1988).

Para o fator  $S_2$ , houve a consideração de categoria III, segundo o item 5.3.1, e de classe C (edificação com 29,19 metros e 50,235 metros de comprimento em seus lados), segundo o item 5.3.2 NBR 6123 (ABNT, 1988).

Foi considerada a altura de 4,81 metros para o cálculo do fator  $S_2$ . Desta forma, utilizando a Tabela 1 da NBR 6123 (ABNT, 1988), a equação (11) e a altura da edificação, tem-se:

$$S_2 = b \cdot Fr \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^P \quad (11)$$

Onde, conforme a Tabela 1 da NBR 6123 (ABNT, 1988):

$$b = 0,93;$$

$$Fr = 0,98;$$

$$z = 4,81;$$

$$P = 0,115.$$

Logo,

$$S_2(4,81m) = 0,93 \cdot 0,98 \cdot \left(\frac{4,81}{10}\right)^{0,115} \cong 0,81 \quad (12)$$

Portanto temos o valor de  $S_2$  calculado de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988), igual a 0,81.

Considerando o grupo 1, de acordo com a Tabela 3 da NBR 6123 (ABNT, 1988), no item 5.4, tem-se o fator  $S_3 = 1,10$ .

Desta forma, utilizando a equação (03), a velocidade característica do vento é:

$$Vk = 30 \cdot 1,00 \cdot 0,81 \cdot 1,10 = 26,73 \text{ m/s} \quad (13)$$

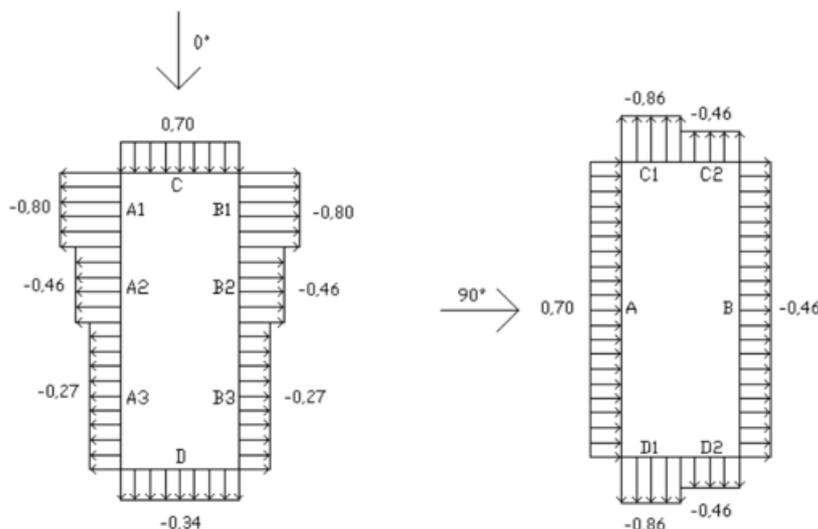
Por fim, a pressão dinâmica foi determinada utilizando a equação (02). Os resultados encontrados estão apresentados abaixo.

$$q = 0,613 \cdot 26,73^2 = 0,44 \text{ kN/m}^2 \quad (14)$$

Com a utilização do programa Visual ventos, foi possível realizar o cálculo dos coeficientes de formas externos das paredes e do telhado, bem como os coeficientes de formas internos.

Os valores de coeficiente de formas externos para as paredes estão apresentados na Figura 20.

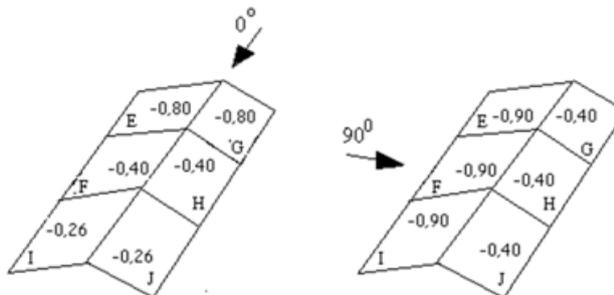
**Figura 20** - Coeficientes de formas externos para as paredes



Fonte: *Visual ventos*, 2025.

Os valores de coeficiente de formas externo para o telhado estão apresentados na Figura 21.

**Figura 21** - Coeficientes de formas externos para o telhado

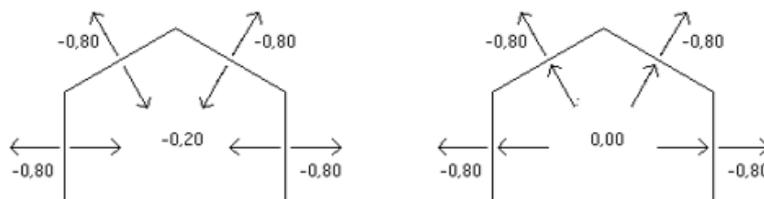


Fonte: *Visual ventos*, 2025.

Para o coeficiente de pressão interna considerou-se que o galpão possui paredes efetivamente estanques e com janelas fixas que tenham uma probabilidade desprezível de serem rompidas por acidente. Logo, de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988) o valor calculado através do software de cálculo de forças devido ao vento *Visual ventos*  $C_i = -0,2$  ou  $0,0$  (considerar o valor mais nocivo).

A Figura 22 mostra os valores dos coeficientes de formas e de pressão externos e internos para o vento com incidência longitudinal  $0^\circ$ .

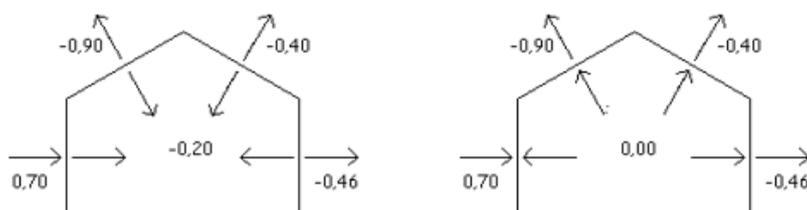
**Figura 22** - Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão do vento 0°



Fonte: *Visual ventos*, 2025.

A Figura 23 mostra os valores dos coeficientes de formas e de pressão externos e internos para o vento com incidência transversal 90°

**Figura 23** - Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão do vento 90°



Fonte: *Visual ventos*, 2025.

Com a definição dos coeficientes de formas e pressão externos e internos, utilizando a equação (01), será possível calcular a carga crítica atuante na área da cobertura para os casos de vento longitudinal 0° e transversal 90°.

Para o caso de incidência de vento longitudinal 0° teremos a carga de vento:

$$F(0^\circ) = 0,44(-0,80 - 0) = -0,35 \text{ kN/m}^2 \quad (15)$$

Teremos, portanto, uma carga de sucção de vento longitudinal 0°.

Para o caso de incidência de vento longitudinal 90° teremos a carga de vento:

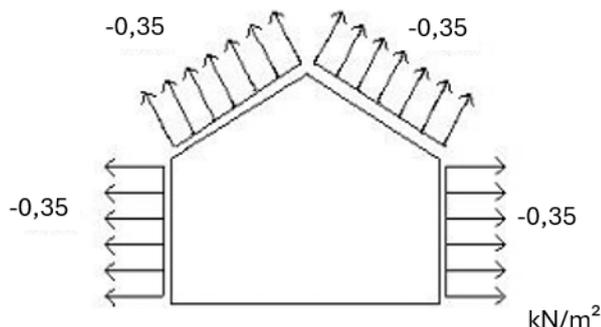
$$F(90^\circ) = 0,44(-0,90 - 0) = -0,40 \text{ kN/m}^2 \quad (16)$$

$$F(90^\circ) = 0,44(-0,40 - 0) = -0,176 \text{ kN/m}^2 \quad (17)$$

Também teremos uma carga de sucção no caso de vento transversal 90°.

A Figura 24 mostra os resultados dos valores de carga crítica para o vento longitudinal 0°, valores em kN/m<sup>2</sup>.

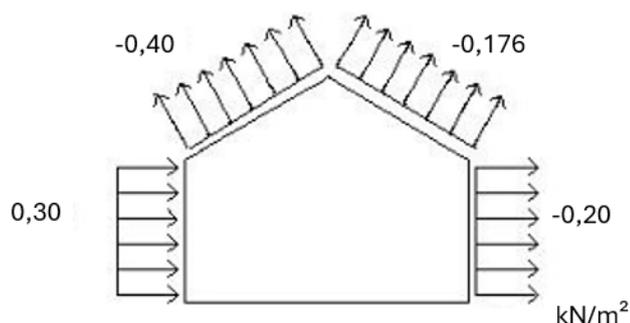
**Figura 24** - Cargas para o vento longitudinal  $0^\circ$



Fonte: Adaptado *Visual ventos*, 2025.

A Figura 25 mostra os resultados dos valores de carga crítica para o vento transversal  $90^\circ$ , valores em  $\text{kN/m}^2$ .

**Figura 25** - Cargas para o vento transversal  $90^\circ$



Fonte: Adaptado *Visual ventos*, 2025.

Utilizando os valores encontrados nas equações, chegou-se aos resultados das cargas de vento em função da área de incidência. Como o *Cype3D* trabalha em unidade de tonelada-força, utilizou-se a unidade de tonelada-força por metro quadrado.

### 3.6 PROGRAMAS UTILIZADOS

Para a realização deste trabalho, foram utilizados dois softwares computacionais para a criação e análise do modelo estrutural, além do programa *Visual ventos*, que realiza cálculo das forças devido ao vento em coberturas de duas águas conforme a NBR 6123 (ABNT, 1988).

O *Advance Steel 2025*, é um software desenvolvido pela empresa *AutoDesk*. Esse software, amplamente reconhecido no mercado, possui uma licença gratuita para estudantes, o que facilitou sua utilização durante o projeto. Ele foi empregado na elaboração e exportação das plantas, permitindo uma representação clara e detalhada da estrutura analisada. A escolha dessa ferramenta baseou-se em sua relevância no setor, usabilidade intuitiva e alta precisão na criação de desenhos técnicos de estruturas metálicas.

Atualmente, o mercado oferece diversos programas computacionais para análise estrutural, amplamente utilizados na avaliação do comportamento de variados problemas de engenharia. Grande parte desses programas é baseada no Método dos Elementos Finitos, enquanto outros, voltados principalmente para elementos de barras, empregam o Método dos Deslocamentos.

Neste trabalho, utilizou-se também o software *Cype3D* para realizar as análises estruturais e o dimensionamento dos elementos nos modelos de galpões estudados. O programa adota as normas brasileiras atualizadas, ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio; ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

A escolha do *Cype3D* foi motivada por diversos fatores: sua conformidade com as normas brasileiras vigentes, a facilidade de uso, sua ampla aceitação no mercado, a capacidade de verificar estruturas mistas e a possibilidade de realizar uma análise completa da estrutura e de cada elemento.

O *Cype3D* submete cada elemento estrutural do modelo a 13 verificações normatizadas, que incluem:

- a) relação comprimento-espessura máxima;
- b) limitação de esbeltez;
- c) resistência à tração;
- d) resistência à compressão;
- e) resistência à flexão nos eixos X;
- f) resistência à flexão nos eixos Y;
- g) resistência ao esforço cortante nos eixos X;
- h) resistência ao esforço cortante nos eixos Y;
- i) resistência à combinação de momento fletor no eixo X e esforço cortante no eixo Y;

- j) resistência à combinação de momento fletor no eixo Y e esforço cortante no eixo X;
- k) resistência à flexo-compressão;
- l) resistência à flexo-tração;
- m) resistência à torção.

Todos os elementos estruturais foram submetidos às respectivas verificações, devendo atender integralmente aos critérios estabelecidos pelas normas técnicas vigentes aplicáveis a cada tipo de material utilizado no projeto.

### 3.7 COMBINAÇÕES PADRÃO DO *CYPE3D*

As combinações das ações estruturais foram realizadas pelo software *Cype3D*, seguindo as diretrizes das seguintes normas NBR 14762 (ABNT, 2010) e NBR 8800 (ABNT, 2008).

No total, foram realizadas 56 combinações para cada tipo de material, sendo eles:

- a) perfil laminado: utilizado nas barras de contraventamento;
- b) perfis formados a frio: empregados nos banzos, montantes, diagonais, terças e pilares.

Devido à assimetria geométrica e estrutural do galpão, foi necessário considerar a incidência do vento em todas as suas faces para garantir uma avaliação completa das solicitações geradas. Nesse contexto, adotou-se uma abordagem técnica que contemplou a ação do vento sob diferentes direções e condições específicas.

Inicialmente, o vento atuando a 0° foi analisado incidindo a barlavento, tanto pela face frontal quanto pela face posterior do galpão. Essa abordagem permitiu a inclusão de quatro cenários distintos de incidência do vento, abrangendo todas as possíveis configurações críticas para a edificação. Tais cenários foram devidamente incorporados nas combinações de ações, assegurando que todas as condições de carregamento relevantes fossem contempladas na análise estrutural.

A análise foi conduzida utilizando o software *Cype3D*, ferramenta reconhecida por sua capacidade de realizar uma avaliação mais abrangente do que aquela exigida pelas normas técnicas de referência. O *Cype3D* adota combinações adicionais de carregamentos que ampliam a robustez da verificação estrutural, proporcionando uma

análise mais completa sem renunciar às combinações de Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS), conforme exposto no capítulo 2, item 2.12 deste trabalho.

A Figura 26 apresentada ilustra as combinações de ações consideradas na análise dos elementos estruturais constituídos por perfis conformados a frio, destacando a abrangência e a precisão técnica aplicadas no projeto.

**Figura 26** - Combinações das ações *Cype3d* para elementos de perfis formados a frio

Comb.	PP	PERM	SC	Vento 0	Vento 90	Vento 0-2	Vento 90-2
1	1.000	1.000					
2	1.250	1.000					
3	1.000	1.250					
4	1.250	1.250					
5	1.000	1.000	1.500				
6	1.250	1.000	1.500				
7	1.000	1.250	1.500				
8	1.250	1.250	1.500				
9	1.000	1.000		1.400			
10	1.250	1.000		1.400			
11	1.000	1.250		1.400			
12	1.250	1.250		1.400			
13	1.000	1.000	1.050	1.400			
14	1.250	1.000	1.050	1.400			
15	1.000	1.250	1.050	1.400			
16	1.250	1.250	1.050	1.400			
17	1.000	1.000	1.500	0.840			
18	1.250	1.000	1.500	0.840			
19	1.000	1.250	1.500	0.840			
20	1.250	1.250	1.500	0.840			
21	1.000	1.000			1.400		
22	1.250	1.000			1.400		
23	1.000	1.250			1.400		
24	1.250	1.250			1.400		
25	1.000	1.000	1.050		1.400		
26	1.250	1.000	1.050		1.400		
27	1.000	1.250	1.050		1.400		
28	1.250	1.250	1.050		1.400		
29	1.000	1.000	1.500		0.840		
30	1.250	1.000	1.500		0.840		
31	1.000	1.250	1.500		0.840		
32	1.250	1.250	1.500		0.840		
33	1.000	1.000				1.400	
34	1.250	1.000				1.400	
35	1.000	1.250				1.400	
36	1.250	1.250				1.400	
37	1.000	1.000	1.050			1.400	
38	1.250	1.000	1.050			1.400	
39	1.000	1.250	1.050			1.400	
40	1.250	1.250	1.050			1.400	
41	1.000	1.000	1.500			0.840	
42	1.250	1.000	1.500			0.840	
43	1.000	1.250	1.500			0.840	
44	1.250	1.250	1.500			0.840	
45	1.000	1.000					1.400
46	1.250	1.000					1.400
47	1.000	1.250					1.400
48	1.250	1.250					1.400
49	1.000	1.000	1.050				1.400
50	1.250	1.000	1.050				1.400
51	1.000	1.250	1.050				1.400
52	1.250	1.250	1.050				1.400
53	1.000	1.000	1.500				0.840
54	1.250	1.000	1.500				0.840
55	1.000	1.250	1.500				0.840
56	1.250	1.250	1.500				0.840

Fonte: *Cype3d*, 2025.

## 4 ESTUDO PARAMÉTRICO

Tendo em vista o objetivo de avaliar o desempenho de algumas soluções estruturais para galpões industriais leves, decidiu-se realizar um estudo paramétrico considerando 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.

### 4.1 CRITÉRIOS DE PARAMETRIZAÇÃO

Para o estudo paramétrico deste trabalho optou-se por avaliar, exclusivamente, a influência da seguinte variável: geometria da viga de cobertura;

Para as demais características de projeto adotam-se valores encontrados projeto do galpão construído:

- a) distância entre pórticos transversais: variável, de acordo com o projeto real;
- b) inclinação: 10%;
- c) altura da coluna: 3,25 m;
- d) comprimento total do galpão: 47,589 m;
- e) Vão livre de 26,88 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.

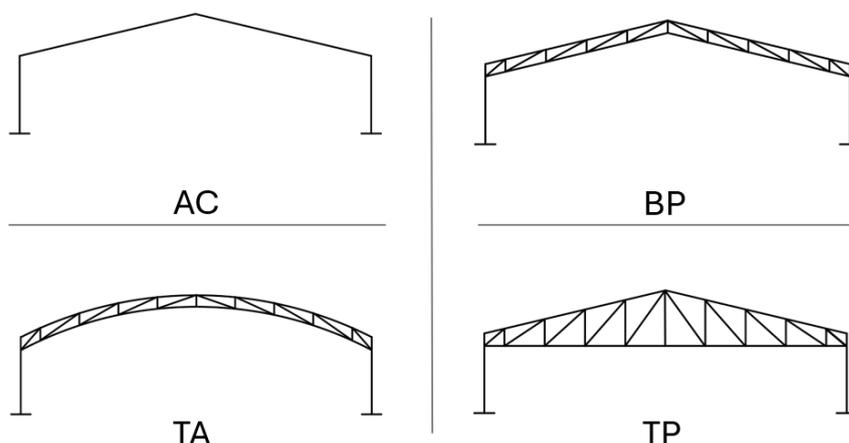
Uma vez que a distância entre pórticos e a magnitude dos carregamentos é a mesma em todos os modelos do estudo, considera-se que os elementos estruturais secundários como terças, travessas, contraventamentos, dentre outros, são os mesmos em todos os casos, não exercendo influência na taxa de consumo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

## 4.2 DEFINIÇÃO DOS MODELOS

Para desenvolvimento deste estudo, adotam-se quatro tipologias distintas para o pórtico transversal, com vão livre de 26,88 m, conforme se mostra na Figura 27. As tipologias consideradas são:

- a) AC - Pórtico de alma cheia;
- b) TA - Pórtico com treliça em arco;
- c) BP - Pórtico com treliça de banzos paralelos;
- d) TP - Pórtico com treliça trapezoidal.

**Figura 27** - Tipologia de pórticos transversais



Fonte: Autor, 2025.

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 isotelha.

De acordo com Chaves (2007), para o pórtico de alma cheia (AC), uma inclinação de 10% resulta em uma flecha no meio do vão equivalente a  $L/20$ , onde  $L$  representa o vão livre do pórtico transversal.

Mantendo essa inclinação de 10%, adota-se uma relação de  $L/10$  para a flecha da viga de cobertura nos modelos de treliça de banzos paralelos (BP) e treliça trapezoidal (TP). Essa escolha tem o objetivo de manter equivalentes as inércias das seções transversais no meio do vão para os diferentes tipos de pórticos, garantindo uma distribuição mais homogênea dos esforços estruturais.

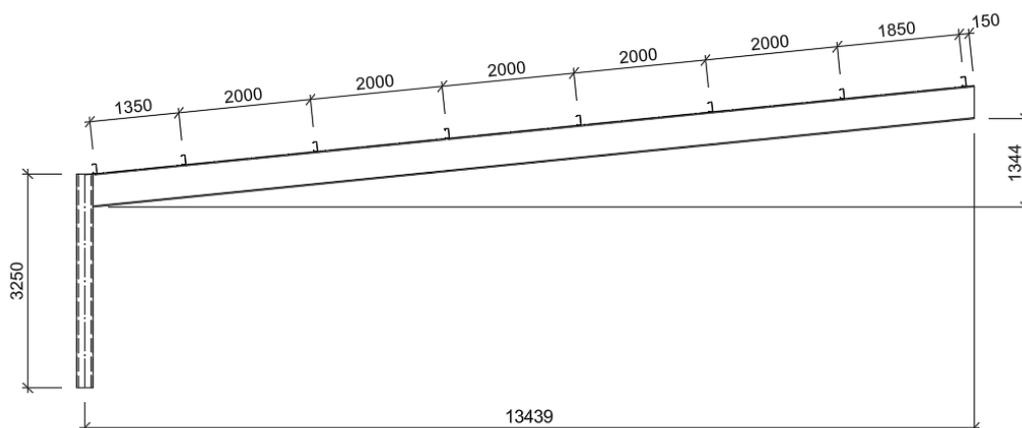
Para o modelo de treliça em arco (TA), a relação entre a flecha e o vão livre segue uma faixa entre 1/6 e 1/5, conforme recomendado por Chaves (2007). Dessa forma, para esse tipo de estrutura, adota-se uma relação de L/5 para a flecha no meio do vão, proporcionando um comportamento estrutural compatível com os demais modelos analisados.

Essa abordagem permite a padronização dos critérios de dimensionamento e comparação entre os diferentes sistemas estruturais, otimizando o desempenho e a estabilidade das soluções adotadas.

### 4.3 PÓRTICO DE ALMA CHEIA

Na Figura 28 apresenta-se o modelo de pórtico de alma cheia considerado neste estudo paramétrico, cujo vão livre de 26,88 metros, com distância entre terças de 2 metros.

**Figura 28** - Pórtico de alma cheia (medidas em milímetros)



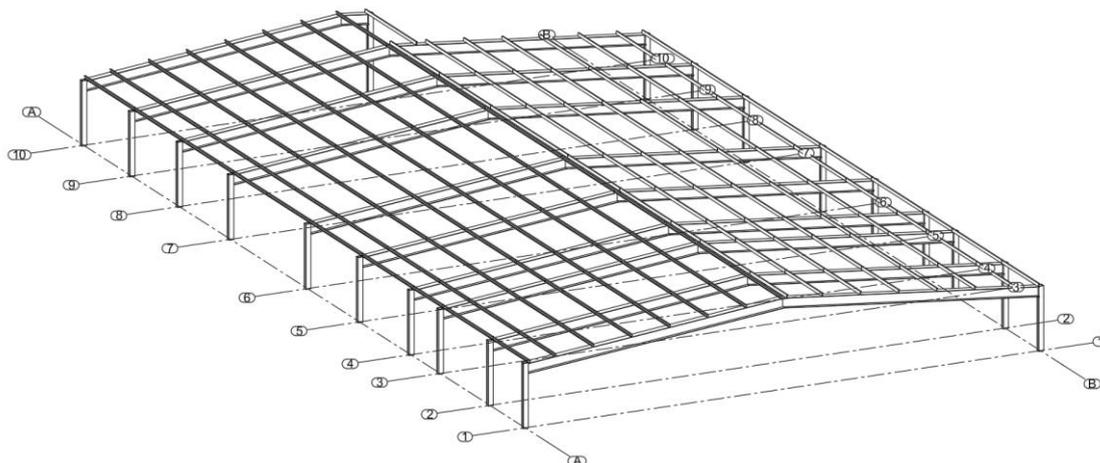
Fonte: Autor, 2025.

A Figura 29 apresenta um esquema geral de um galpão industrial composto por pórticos de alma cheia. Para essa tipologia estrutural, considera-se que a ligação entre a coluna e a viga de cobertura de alma cheia é rígida, garantindo a transmissão eficiente de momentos fletores e proporcionando maior estabilidade ao conjunto.

Além disso, assume-se que as colunas estão engastadas na base. Esse tipo de fixação confere maior rigidez à estrutura, reduzindo deslocamentos horizontais e contribuindo para o adequado desempenho da edificação frente às solicitações externas, como cargas permanentes, sobrecargas e ações do vento.

Essa configuração estrutural é amplamente utilizada em galpões industriais devido à sua eficiência na distribuição dos esforços, permitindo a construção de vãos livres maiores sem a necessidade de apoios intermediários.

**Figura 29** - Esquema geral de um galpão industrial constituído por pórticos de alma cheia

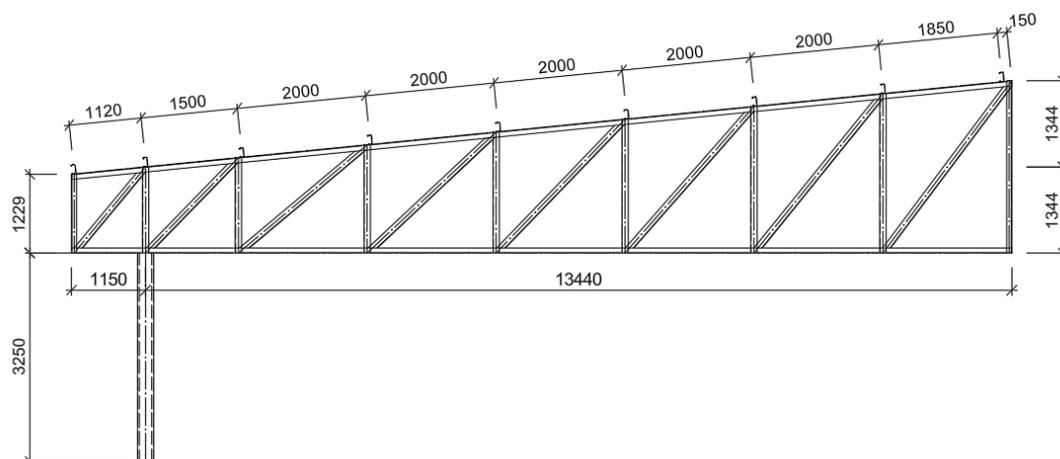


Fonte: Autor, 2025.

#### 4.4 PÓRTICO COM TRELIÇA TRAPEZOIDAL

Galpões com treliça trapezoidal resultam em uma viga treliçada mais alta que as triangulares e com esforços axiais menores nos banzos (BRITO, 2010). A Figura 30 apresenta o modelo proposto para o pórtico com treliça trapezoidal, no qual os critérios de vinculação definidos são a base do pilar engastada, garantindo maior rigidez e estabilidade à estrutura; a ligação flexível entre os banzos da treliça e a coluna, permitindo certa rotação e reduzindo a transmissão de momentos fletores; e as extremidades das diagonais e dos montantes rotuladas, assegurando que esses elementos trabalhem predominantemente à tração ou compressão. Essa configuração estrutural é adotada para otimizar o desempenho do pórtico, equilibrando rigidez e flexibilidade, além de facilitar o dimensionamento e a fabricação dos componentes.

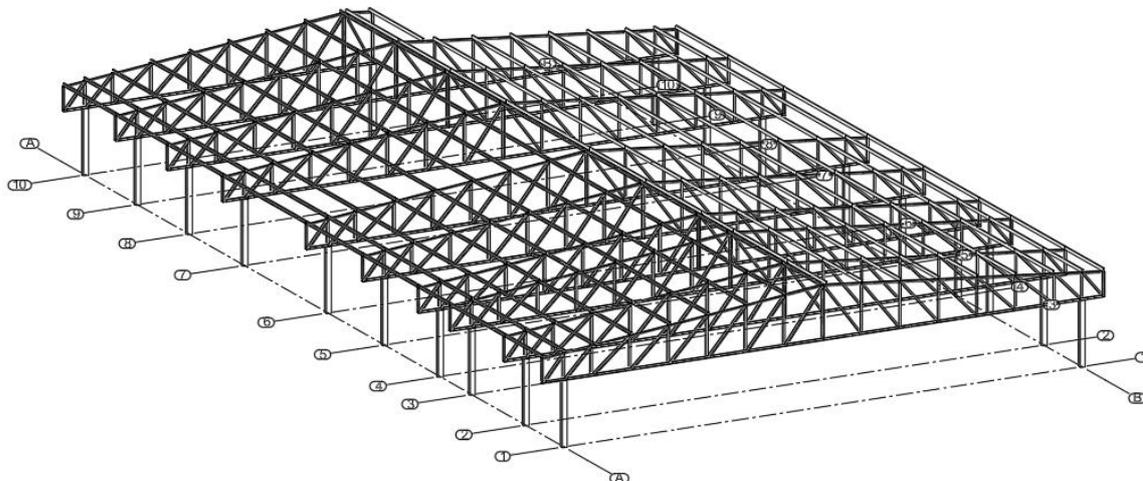
**Figura 30** - Pórtico com treliça trapezoidal (medidas em milímetros)



Fonte: Autor, 2025.

Na Figura 31 mostra-se um esquema geral do galpão industrial constituído por pórticos com treliça trapezoidal.

**Figura 31** - Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça trapezoidal



Fonte: Autor, 2025.

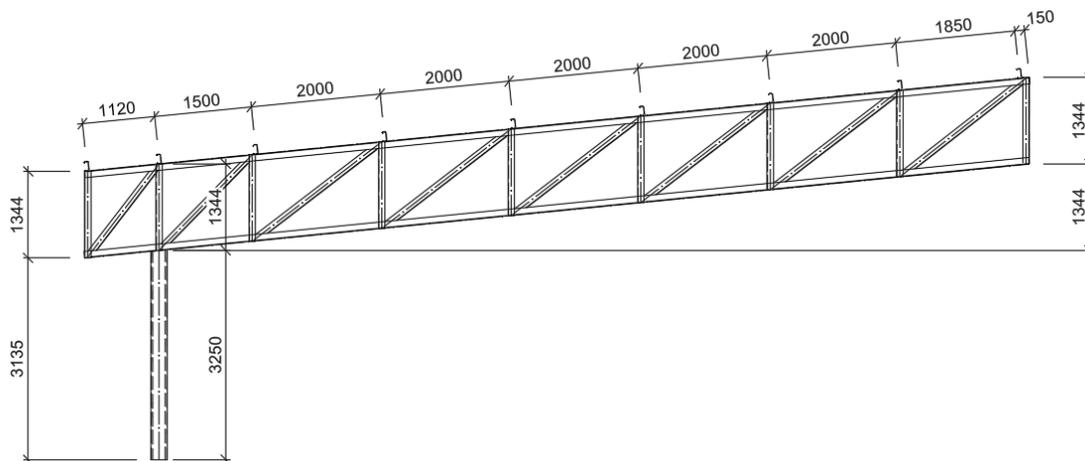
#### 4.5 PÓRTICO COM TRELIÇA DE BANZOS PARALELOS

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. As treliças de banzos paralelos são muito flexíveis e os apoios devem ser rígidos e fixos. A rigidez da estrutura pode ser melhorada com adição de tirantes ligando os apoios. Entretanto esta solução tem o inconveniente do tirante só trabalhar a tração (BRITO, 2010).

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 da treliça.

Um esquema típico de um pórtico com treliça de banzos paralelos é indicado na Figura 32.

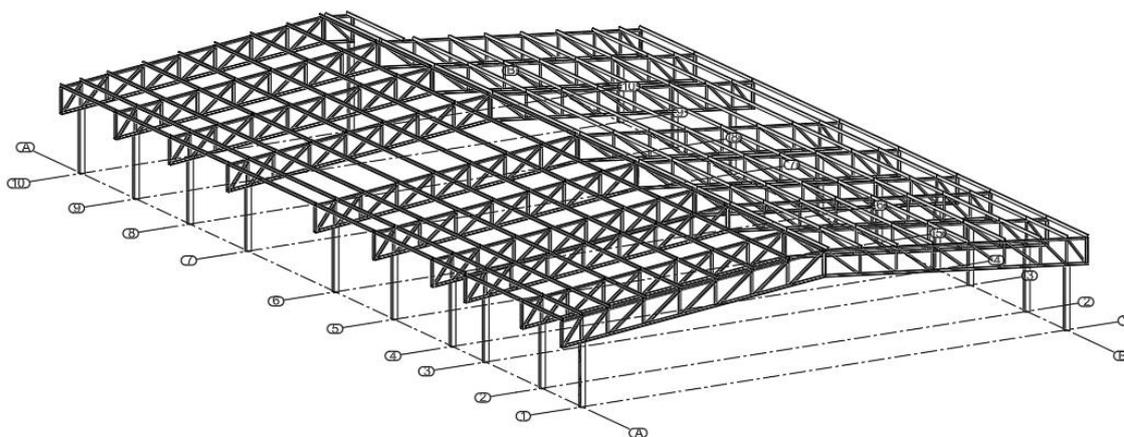
**Figura 32** - Pórtico com treliça com banzos paralelos (medidas em milímetros)



Fonte: Autor, 2025.

Na Figura 33 mostra-se um esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça trapezoidal.

**Figura 33** - Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliças em banzos paralelos

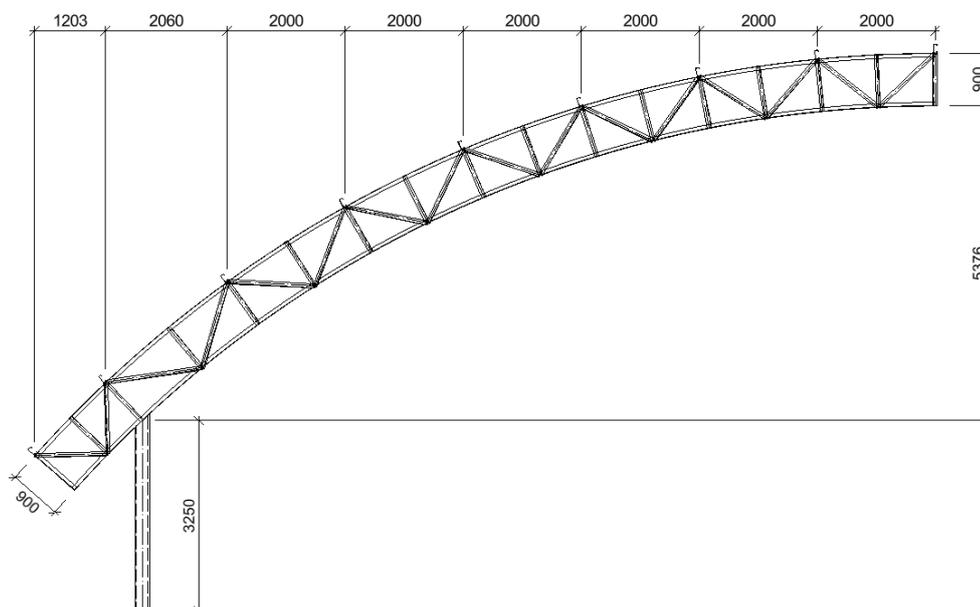


Fonte: Autor, 2025.

#### 4.6 PÓRTICO COM TRELIÇA EM ARCO

A Figura 34 apresenta um esquema de galpão industrial composto por um pórtico com treliça em arco, no qual se considera que as ligações entre os banzos da viga de cobertura e a coluna são flexíveis, enquanto as colunas estão engastadas na base, conferindo maior rigidez e estabilidade à estrutura.

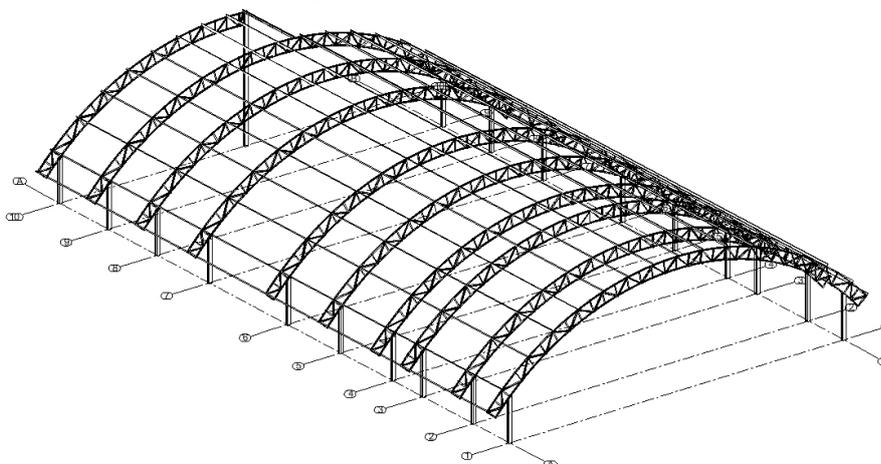
**Figura 34** - Pórtico com treliça em arco (medidas em milímetros)



Fonte: Autor, 2025.

As diagonais e os montantes da treliça são rotulados em suas extremidades. Em arcos metálicos, a relação entre a altura entre banzos e o vão livre entre colunas varia geralmente entre  $1/40$  e  $1/30$ . Neste trabalho, adota-se uma relação de  $L/30$  para a distância entre banzos conforme a Figura 35, essa medida busca atender aos critérios de estabilidade e desempenho estrutural recomendados

**Figura 35** - Esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliças em arco



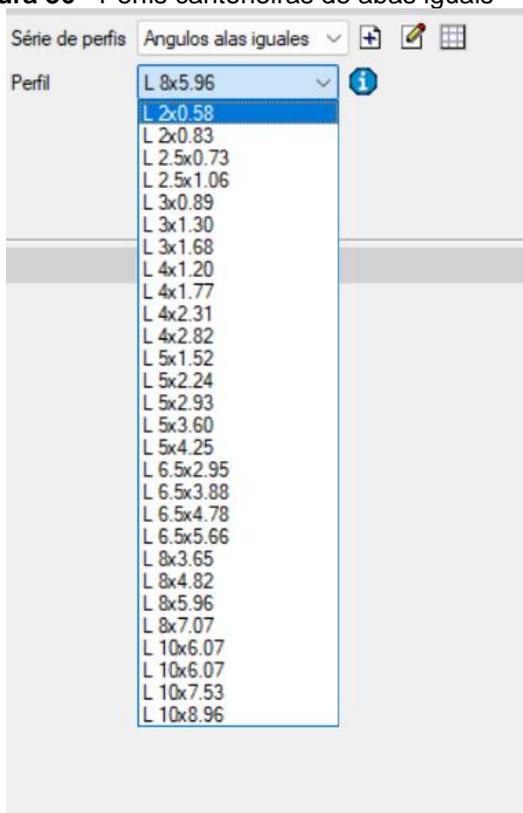
Fonte: Autor, 2025.

#### 4.7 COMPOSIÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS

Cada elemento da treliça está sujeito a um esforço normal, que pode ser de tração ou compressão. O dimensionamento dessas barras é realizado de acordo com os critérios estabelecidos para barras tracionadas ou barras comprimidas, conforme especificado na norma NBR 8800 (ABNT, 2008), garantindo assim a segurança e o desempenho adequado da estrutura.

Para o dimensionamento das treliças deste trabalho, foram adotados perfis cantoneiras de abas iguais. Nos modelos de galpões, optou-se por utilizar perfis cantoneiras nas diagonais e montantes, enquanto para as cordas ou banzos superiores e inferiores foi empregada a solução de dupla cantoneira, proporcionando maior resistência e estabilidade à estrutura.

A Figura 36 mostra a família de perfis cantoneiras utilizadas para o dimensionamento dos modelos de treliça do galpão.

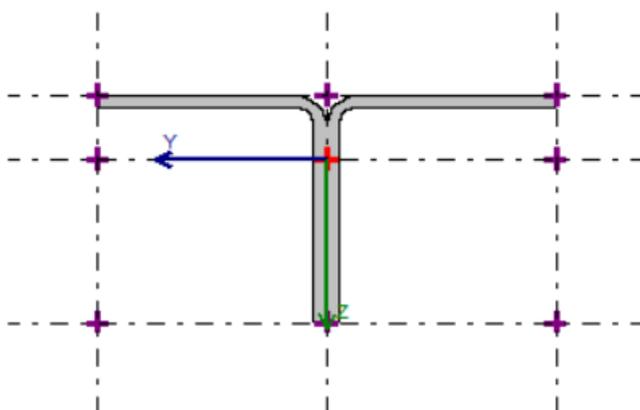
**Figura 36** - Perfis cantoneiras de abas iguais

Fonte: Cype3D, 2025.

Essa família de cantoneiras foi escolhida por apresentar uma ampla variação de espessuras para uma mesma dimensão externa, o que proporciona maior flexibilidade no dimensionamento. Dessa forma, quando um perfil atinge seu limite de resistência para determinada condição de carregamento, não é necessário adotar uma bitola significativamente maior, já que a próxima opção disponível apresenta um incremento mais adequado em suas características, evitando excessos desnecessários de material e otimizando o projeto estrutural.

A Figura 37 ilustra a seção transversal adotadas no programa de dimensionamento para os banzos superiores e inferiores adotados no dimensionamento dos modelos.

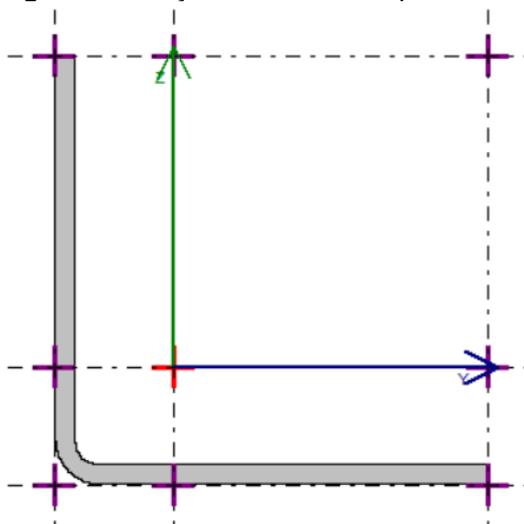
**Figura 37** - Seção dupla cantoneira



Fonte: *Cype3D*, 2025.

A Figura 38 ilustra a seção transversal adotadas no programa de dimensionamento para os montantes e diagonais adotados no dimensionamento dos modelos.

**Figura 38** - Seção cantoneira simples



Fonte: *Cype3D*, 2025.

Para as colunas e terças, optou-se pela utilização da família de perfis U enrijecidos. No caso das terças, foi adotado um perfil U enrijecido de seção transversal simples, enquanto para as colunas foi utilizada uma caixa soldada formada pela união de dois perfis U enrijecidos, proporcionando maior resistência e estabilidade às estruturas verticais do galpão. Essa escolha visa garantir eficiência estrutural e facilitar o processo de fabricação e montagem.

A Tabela 4 mostra o catálogo de perfis UDC (perfil tipo U dobrado de chapa) usado como base para dimensionamento das terças e colunas.

**Tabela 4 - Seção de perfil UDC**  
kg/6 m

Dimensão	Espessura							
	2,00	2,25	2,65	3,00	3,25	3,75	4,25	4,75
50 x 25 x 10	9,8	10,8	12,7	14,4	14,7	15,9	17,2	18,3
70 x 40 x 17	15,4	17,5	19,8	22,2				
75 x 25 x 15	13,1	14,5	16,7	18,9				
75 x 40 x 15	15,9	17,7	20,5	23,2	24,9	27,4	30,2	32,9
90 x 60 x 20	22,0	24,6	28,6	31,9				
100 x 40 x 15	18,3	20,3	23,7	26,8	28,9	32,7	35,2	38,5
100 x 50 x 17	20,5	22,9	26,7	30,2	32,7	36,0	40,0	43,9
127 x 25 x 15	18,0	20,0	23,2	26,3				
127 x 50 x 17	23,1	25,8	30,0	33,9	36,9	40,8	45,4	49,9
150 x 50 x 17	25,2	28,2	33,0	37,3	40,6	44,9	50,0	55,0
150 x 60 x 20	27,7	30,9	36,1	40,7	44,7	49,5	55,2	60,9
200 x 75 x 25	35,9	40,3	46,9	53,1	58,9	65,4	73,3	81,0
210 x 30 x 15	26,8	29,9	34,8	39,0	43,1	47,7	53,2	58,6
250 x 75 x 25	40,5	45,6	52,9	59,9	66,7	74,2	83,3	92,2
300 x 75 x 25	45,0	50,7	59,4	67,3	74,6	83,4	94,1	105,2

Fonte: ArcelorMittal, 2024.

Nos casos em que os perfis estruturais do tipo UDC não atendem aos critérios de verificação estabelecidos pelas normas técnicas vigentes, especialmente quanto à resistência mecânica e aos limites de deslocamento, opta-se pela substituição desses elementos por perfis soldados a partir de chapas de aço. Nessa situação, utilizam-se perfis do tipo CS (Coluna Soldada), os quais oferecem maior flexibilidade geométrica e capacidade resistente, permitindo melhor adaptação às exigências estruturais do projeto.

As barras lisas utilizadas para fabricação de contraventamento horizontal seguem o padrão de 10 milímetros de diâmetro, conforme o projeto original.

#### 4.8 CARREGAMENTOS ATUANTES

As ações solicitantes das estruturas são apresentadas a seguir, sendo agrupadas conforme sua variabilidade no tempo. As chamadas ações permanentes correspondem a um conjunto de esforços que mantêm valores praticamente constantes ao longo de toda a vida útil da edificação, como o peso próprio da estrutura e elementos fixos. Por outro lado, as ações variáveis englobam aquelas que sofrem alterações significativas com o passar do tempo, como cargas de uso, sobrecargas

acidentais e ações climáticas, exigindo uma análise criteriosa para garantir a segurança e estabilidade da construção.

As ações permanentes incluem o peso-próprio da estrutura de aço, cujo valor é considerado automaticamente pelo software utilizado na análise e dimensionamento da estrutura. Esse fator é essencial para a correta avaliação das cargas atuantes, uma vez que o peso-próprio representa uma parcela significativa das ações permanentes que permanecem constantes ao longo da vida útil da edificação. 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.

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

A carga acidental de cobertura, também denominada sobrecarga (SC), é um valor utilizado para representar possíveis sobreposições ou acúmulos temporários que possam comprometer a integridade da cobertura.

Conforme o item B-3.5.1 do Anexo B da NBR 8800 (ABNT, 2008), para coberturas comuns e na ausência de especificações mais rigorosas, deve-se considerar uma sobrecarga de  $0,25 \text{ kN/m}^2$ , assegurando que a estrutura esteja devidamente preparada para suportar eventuais cargas temporárias que possam ocorrer ao longo de sua utilização.

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.

Para velocidade básica do vento foi considerado o valor de  $V_0=30 \text{ m/s}$ , de acordo com o mapa de Isopletas apresentado na NBR 6123 (ABNT, 1988) e exemplificado na Figura 9.

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 tratar-se de uma edificação efetivamente estanque.

A pressão dinâmica admitida é calculada através das equações (2) e (3), conforme o item 2.11.3 deste trabalho e baseado na NBR 6123 (ABNT, 1988).

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.

#### 4.8.1 Estudo de vento típico para galpão de duas águas

As ações atuantes na estrutura devido ao vento foram calculadas com a ajuda do software *Visual ventos*, programa específico para cálculo de esforço devido ao vento de edificações com planta retangular e telhado a duas águas, segundo NBR 6123 (ABNT, 1988). Foram consideradas as seguintes características do galpão:

- a) galpão em duas águas;
- b) vão livre = 26,88 metros;
- c) altura da coluna = 3,25 metros;
- d) inclinação = 10%;
- e) comprimento do galpão = 50,23 metros.

Para os coeficientes de forma das paredes e telhado para um galpão duas águas, segue o que foi apresentado no item 6.5 deste trabalho.

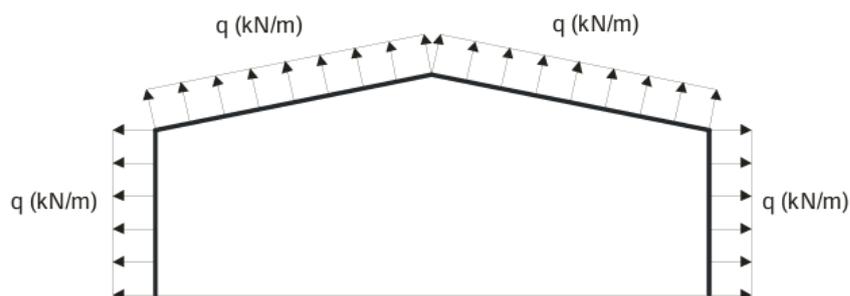
Em todos os modelos foi considerado o coeficiente de pressão interna,  $C_i$ , igual a -0,20 ou 0 (entre o valor mais nocivo), admitindo-se que o galpão é uma edificação efetivamente estanque e possui janelas fixas.

Para a realização do cálculo das forças do vento atuante em um galpão com cobertura metálica foram feitas as seguintes considerações para os fatores  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ :

- a)  $S_1$  – fator topográfico = 1,0;
- b)  $S_2$  – fator de rugosidade = 0,85;
- c)  $S_3$  – fator estatístico = 1,10.

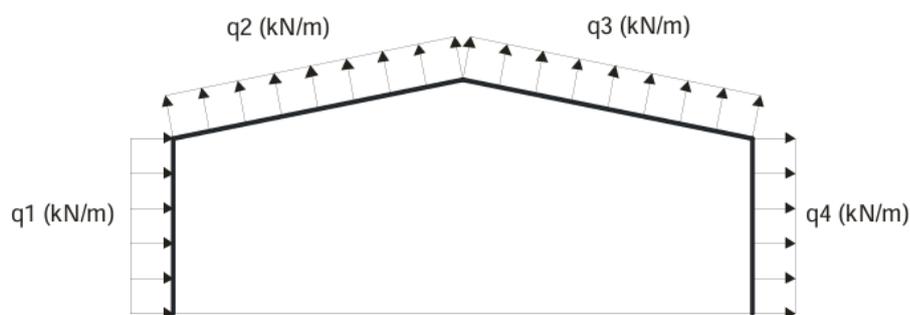
Considerando uma velocidade básica do vento  $V_0$  de 30 m/s, temos a pressão dinâmica do vento de  $q = 0,48$  kN/m<sup>2</sup>.

A Figura 39 ilustra a ação do vento longitudinal na edificação de duas águas.

**Figura 39** - Ação do vento  $0^\circ$  em um galpão de duas águas

Fonte: Autor, 2025.

A Figura 40 ilustra a ação do vento transversal na edificação de duas águas.

**Figura 40** - Ação do vento  $90^\circ$  em um galpão de duas águas

Fonte: Autor, 2025.

A Tabela 5 mostra as ações do vento nas tipologias AC – alma cheia, BP – bancos paralelos e TP – treliça trapezoidal.

**Tabela 5** - Ação do vento nas tipologias de treliças

TIPOLOGIA	VENTO $0^\circ$	VENTO $90^\circ$			
	q (kN/m <sup>2</sup> )	q1 (kN/m <sup>2</sup> )	q2 (kN/m <sup>2</sup> )	q3 (kN/m <sup>2</sup> )	q4 (kN/m <sup>2</sup> )
AC	-0,384	0,336	-0,451	-0,192	-0,206
BP	-0,408	0,357	-0,479	-0,204	-0,219
TP	-0,408	0,357	-0,479	-0,204	-0,219

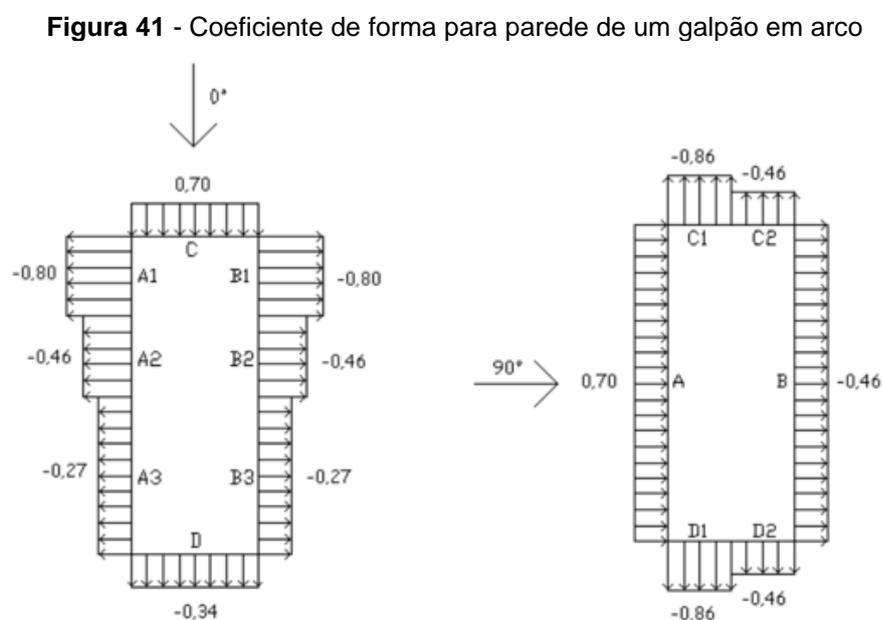
Fonte: Autor, 2025.

#### 4.8.2 Estudo de vento típico para galpão em arco

A pressão dinâmica admitida é calculada através das equações (2) e (3), conforme o item 2.11.3 deste trabalho e baseado na NBR 6123 (ABNT, 1988), levando em consideração os fatores para  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  definidos no tópico anterior.

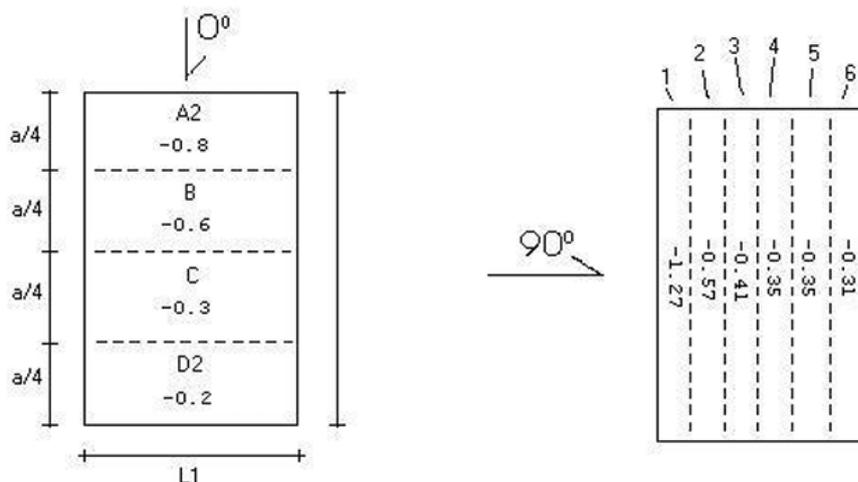
Considerando uma velocidade básica do vento  $V_0$  de 30 m/s, temos a pressão dinâmica do vento de  $q = 0,50 \text{ kN/m}^2$ .

A Figura 41 representa os coeficientes de forma externos para as paredes no caso de um galpão com cobertura em arco.



Fonte: *Visual ventos*, 2025.

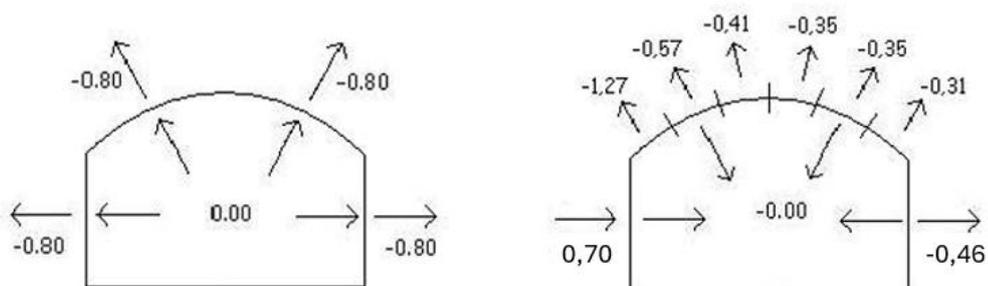
A Figura 42 mostra os coeficientes de forma externos para o telhado de um galpão em arco, conforme a NBR 6123 (ABNT, 1988).

**Figura 42** - Coeficiente de forma externo para telhado em arco

Fonte: Adaptado *Visual Ventos*, 2025.

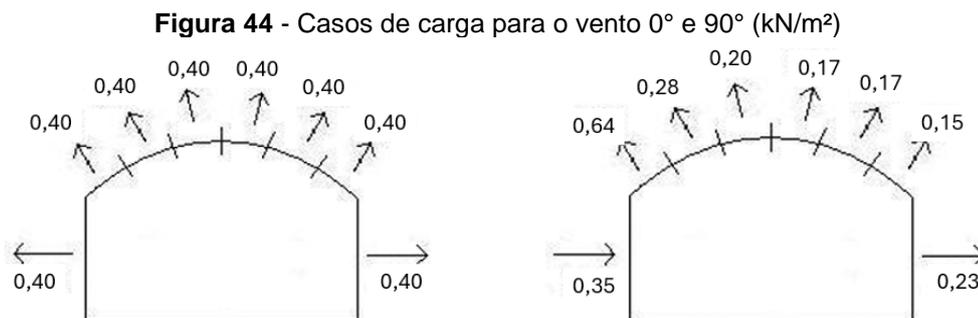
Neste modelo foi considerado o coeficiente de pressão interna,  $C_i$ , igual a  $-0,20$  ou  $0$  (entre o valor mais nocivo), admitindo-se que o galpão é uma edificação efetivamente estanque e possui janelas fixas.

A Figura 43 mostra a sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão das paredes e do telhado para o vento longitudinal e transversal atuante em um galpão com cobertura em arco.

**Figura 43** - Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão

Fonte: Adaptado *Visual Ventos*, 2025.

Os valores de carga da ação do vento para a cobertura em arco são mostrados na Figura 44, com a representação dos valores para a situação de vento atuando a  $0^\circ$  e para  $90^\circ$  respectivamente.



Fonte: Adaptado *Visual Ventos*, 2025.

#### 4.9 COMBINAÇÃO DE ESFORÇOS DO ESTUDO PARAMÉTRICO

Para o estudo paramétrico, foram consideradas as combinações padrão do software *Cype3D*, conforme descrito no capítulo 3, item 3.7 deste trabalho. Essas combinações incluem tanto os Estados Limites Últimos (ELU) quanto os Estados Limites de Serviço (ELS), em conformidade com as normas vigentes.

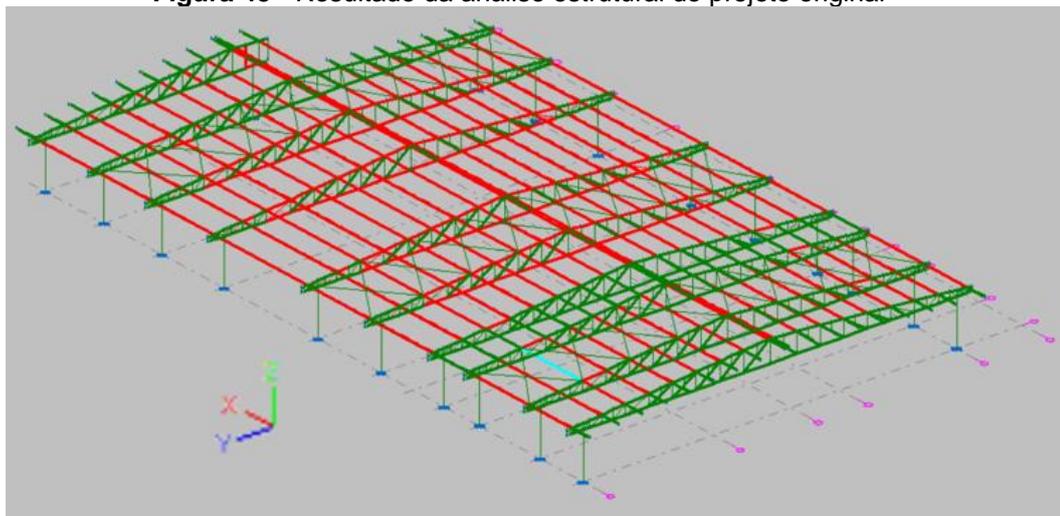
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são sistematizados e discutidos os resultados obtidos a partir da análise estrutural do projeto original, com foco na avaliação do desempenho estrutural por meio de parâmetros quantitativos. Dentre os principais indicadores analisados, destacam-se as taxas de consumo de aço e os deslocamentos horizontais e verticais registrados

A taxa de consumo de aço, definida como a razão entre o peso total da estrutura e a área coberta, é amplamente utilizada como um dos critérios iniciais para a comparação de diferentes tipologias do estudo paramétrico aplicadas a galpões industriais de uso geral. No presente trabalho, essa métrica foi adotada como parâmetro fundamental para a avaliação da eficiência estrutural das soluções analisadas, permitindo uma estimativa comparativa da racionalização de materiais entre os modelos propostos

### 5.1 ESTRUTURA ORIGINAL

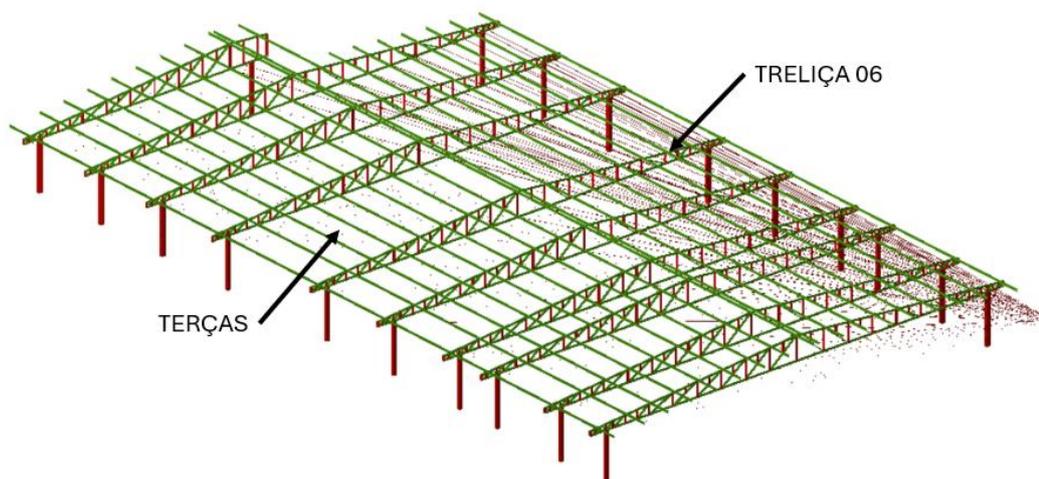
A estrutura original foi analisada por meio de cálculo estrutural utilizando o software *Cype3D*. Todas as barras que compõem a estrutura metálica foram submetidas às verificações padrão do programa. Para uma visualização clara dos resultados, a Figura 45 destaca as irregularidades estruturais identificadas no projeto. As barras representadas em verde indicam que atenderam satisfatoriamente a todas as verificações exigidas, enquanto as barras em vermelho sinalizam elementos que não cumpriram algum critério normativo ou de segurança estabelecido.

**Figura 45** - Resultado da análise estrutural do projeto original

Fonte: Cype3D, 2025.

Este capítulo apresenta a análise estrutural das barras que constituem a treliça mais solicitada do projeto. De acordo com a avaliação, a treliça sujeita às maiores solicitações está localizada no pórtico transversal correspondente ao eixo 6, caracterizando-se por possuir a maior área de influência.

Além disso, para o estudo específico das terças, será analisado o conjunto de terças localizado no maior vão entre treliças do projeto, uma vez que essas são as que suportam as maiores cargas. A Figura 46 apresentada ilustra tanto a treliça mais carregada quanto o maior vão entre os pórticos transversais na estrutura original, destacando os elementos críticos para a avaliação estrutural.

**Figura 46** - Treliça e terças mais carregadas do projeto

Fonte: Adaptado Cype3D, 2025.

### 5.1.1 Terças

Ao analisar as terças com base no perfil mais solicitado, foi identificada uma não conformidade durante a verificação estrutural. Entre as diversas verificações realizadas pelo software *Cype3D*, duas verificações apresentaram resultados insatisfatórios.

Dentre as verificações realizadas pelo software *Cype3D*, destaca-se o cálculo do índice de esbeltez para todas as peças metálicas. Para elementos submetidos à compressão, esse índice não pode exceder o valor máximo de 200, conforme exigido pelas NBR 14762 (ABNT, 2010).

O cálculo do índice de esbeltez segue o procedimento descrito no item 2.15 deste trabalho, utilizando a Equação (06). Segundo os dados fornecidos pelo software, o raio de giração da seção da terça no eixo Y é igual a 1,83.

Adotando o valor limite de 200 para o índice de esbeltez em peças comprimidas e considerando o coeficiente de flambagem por flexão para peças bi apoiadas nos extremos  $K_y = 1,0$ , o cálculo do comprimento máximo admissível da peça pode ser expresso pela seguinte relação:

$$200 = \frac{1,0 \cdot l}{1,83} \quad (18)$$

$$l = 3,66 \text{ metros} \quad (19)$$

Portanto, para que a terça atenda ao limite de esbeltez estabelecido pela norma, seu comprimento no eixo Y não deve exceder 3,66 metros.

Todas as terças com comprimento superior a 3,66 metros apresentaram esbeltez maior que o permitido pela NBR 14762 (ABNT, 2010). Em seu item 9.7.4 a norma estabelece que o índice de esbeltez das barras comprimidas não deve exceder o valor de 200.

Conforme os critérios estabelecidos pela norma NBR 14762 (ABNT, 2010), o limite máximo de aproveitamento da peça deve ser de 100%. No entanto, no caso analisado, o aproveitamento da peça mais solicitada, que possui o comprimento de 8,30 metros, atingiu 138%, ultrapassando assim o limite normativo permitido.

Para facilitar a visualização e compreensão, todas as verificações não satisfeitas foram apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6** – Verificações não satisfeitas para a terça mais solicitada

<b>Terça</b>		
<b>Verificação</b>	<b>Limite normalizado (NBR 14762:2010)</b>	<b>Obtido</b>
Esbeltez	200	454
Flexo-tração	100%	138%

Fonte: Autor, 2025.

A Figura 47 detalha a verificação completa da resistência à flexo-tração realizada na peça, bem como a combinação de ações empregada no cálculo da solicitação correspondente. Essa informação é essencial para compreender os esforços atuantes e as condições que levaram ao não atendimento dos critérios normativos.

**Figura 47** - Verificação à flexo-tração da terça mais solicitada

Resistência à flexo-tração (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

Os esforços desfavoráveis de cálculo são obtidos no nó N446, para a combinação PP+PERM+1.4-Vento90-2.

Os esforços devem satisfazer as seguintes expressões de interação:

$$\eta = \frac{N_{t,Sd} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \mathbf{1.382} \quad \mathbf{X}$$

Onde:

$N_{t,Sd}$ : Força normal de tração solicitante de cálculo.

$M_{x,Sd}$ ,  $M_{y,Sd}$ : Momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente.

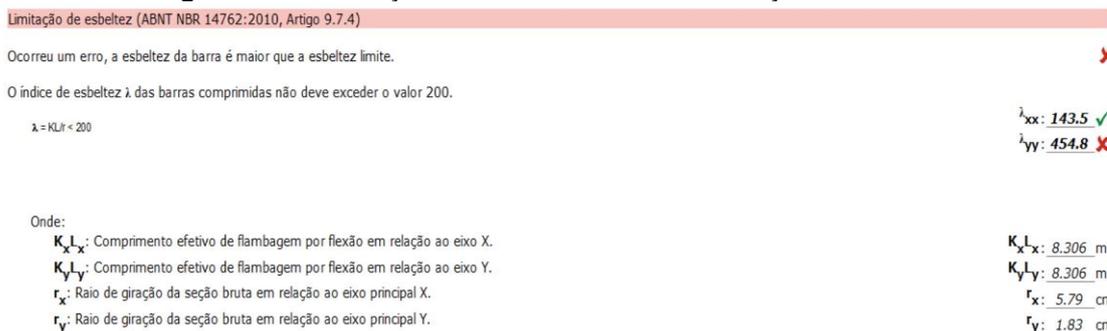
$N_{t,Rd}$ : Força normal de tração resistente de cálculo conforme 9.6.

$M_{x,Rd}$ ,  $M_{y,Rd}$ : Momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente, calculados conforme 9.8.2.

$$\begin{aligned} N_{t,Sd} &: 0.004 \text{ t} \\ M_{x,Sd} &: 0.521 \text{ t-m} \\ M_{y,Sd} &: 0.054 \text{ t-m} \\ N_{t,Rd} &: 12.544 \text{ t} \\ M_{x,Rd} &: 0.560 \text{ t-m} \\ M_{y,Rd} &: 0.119 \text{ t-m} \end{aligned}$$

Fonte: Cype3D, 2025.

A Figura 48 apresenta a verificação do índice de esbeltez para a terça mais solicitada na estrutura, comparando o valor obtido com o limite estabelecido pela norma NBR 14762 (ABNT, 2010).

**Figura 48 - Verificação do índice de esbeltez da terça mais solicitada**

Fonte: Cype3D, 2025.

Em perfis do tipo U enrijecido, comumente utilizados como terças, é frequente a ocorrência de flambagem lateral devido à sua menor rigidez à torção e menor momento de inércia no eixo horizontal. Essa característica torna esses elementos mais suscetíveis à instabilidade lateral sob compressão.

Para mitigar esse efeito e viabilizar o uso de perfis mais econômicos, é prática comum a instalação de hastes intermediárias entre os apoios, reduzindo efetivamente o comprimento de flambagem pela metade. Em situações em que os vãos são maiores, pode-se recorrer à instalação de até duas barras intermediárias, o que permite dividir o comprimento de flambagem total por três, aumentando significativamente a estabilidade estrutural.

Esses elementos, conhecidos como linhas de corrente, atuam exclusivamente à tração e têm como principal função restringir os deslocamentos laterais das terças, contribuindo para o controle da flambagem.

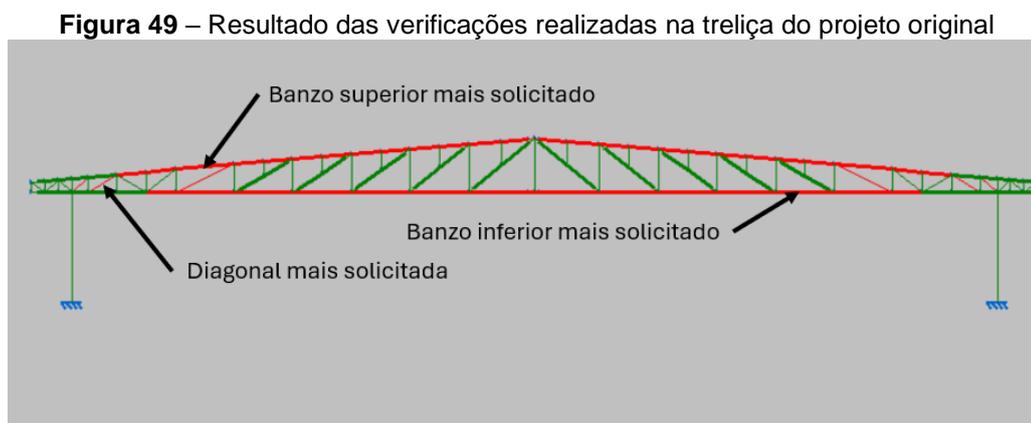
No projeto do galpão em questão, observou-se a ausência dessas linhas de corrente, o que justifica o fato de a maioria das terças apresentarem não conformidade na verificação do índice de esbeltez. Essa ausência compromete a estabilidade das terças, exigindo medidas corretivas, como a inclusão dessas hastes ou a revisão dos perfis utilizados.

### 5.1.2 Treliça

O pórtico transversal do projeto original é constituído por uma treliça trapezoidal, caracterizada por uma inclinação de cobertura de 8%. A relação entre o vão e a flecha da treliça é de aproximadamente L/17, enquanto o valor recomendado

para esse tipo de estrutura, seguindo a recomendação de Chaves (2007), seria  $L/10$ . Esse desvio em relação ao parâmetro ideal pode indicar um comportamento estrutural menos rígido do que o desejável, afetando o desempenho da estrutura sob carregamentos.

A Figura 49 destaca as irregularidades estruturais identificadas no projeto e indica as peças da treliça que sofrem as maiores solicitações, de acordo com sua descrição. As barras representadas em verde indicam elementos que atenderam satisfatoriamente a todas as verificações normativas e de segurança. Já as barras em vermelho representam componentes que não atenderam algum critério exigido, podendo estar sujeitas diversas não conformidades normativas como excesso de tensões, instabilidade ou insuficiência de resistência para as solicitações atuantes.



Fonte: Adaptado *Cype3D*, 2025.

Ao analisar o banzo superior mais solicitado, foram identificadas irregularidades em algumas das verificações realizadas pelo software *Cype3d*. Essas não conformidades podem estar relacionadas a critérios de resistência, estabilidade ou esbeltez, indicando que a peça não atende completamente às exigências normativas para o carregamento considerado.

A tabela 7 detalha as irregularidades encontradas, especificando os parâmetros que não foram atendidos, os valores obtidos nas verificações e os limites normativos correspondentes.

**Tabela 7** – Verificações não satisfeitas para o banzo superior mais solicitado

<b>Banzo superior</b>		
<b>Verificação</b>	<b>Limite normatizado (NBR 14762:2010)</b>	<b>Obtido</b>
Compressão	100%	152%
Flexo-compressão	100%	165%

Fonte: Autor, 2025.

A Figura 50 mostra a verificação feita pelo programa *Cype3d* em relação a resistência a compressão da peça mais solicitada, bem como a combinação que causa essa solicitação.

**Figura 50** - Verificação a compressão do banzo superior mais solicitado

Resistência à compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta: \underline{1.529} \quad \times$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N426, para a combinação de ações 1.25-PP+1.25-PER+1.5-SC.

 $N_{c,Sd}$ : Força normal de compressão solicitante de cálculo.

$$N_{c,Sd}: \underline{22.972} \text{ t}$$

A força normal de compressão resistente de cálculo  $N_{c,Rd}$  deve ser tomada como:

$$N_{c,Rd} = \gamma A_c f_{cd} / \gamma$$

$$N_{c,Rd}: \underline{15.019} \text{ t}$$

Fonte: *Cype3D*, 2025.

Para o banzo inferior mais solicitado, as verificações que apresentaram erro foram descritas na Tabela 8.

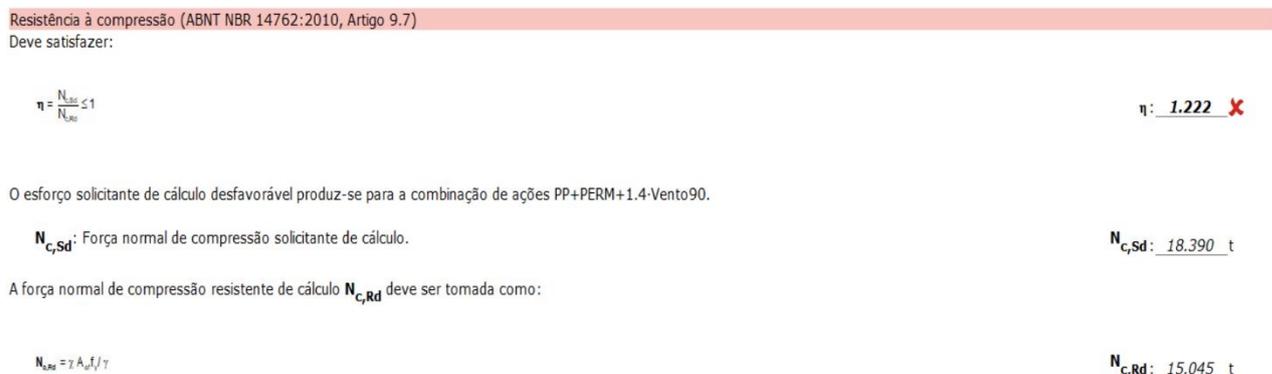
**Tabela 8** – Verificações não satisfeitas para o banzo inferior mais solicitado

<b>Banzo inferior</b>		
<b>Verificação</b>	<b>Limite normatizado (NBR 14762:2010)</b>	<b>Obtido</b>
Compressão	100%	122%
Tração	100%	111%
Flexo-compressão	100%	130%
Flexo-tração	100%	121%

Fonte: Autor, 2025.

A Figura 51 mostra a verificação realizada pelo programa para a resistência a compressão da peça mais solicitada do banzo inferior.

**Figura 51** - Verificação a compressão do banzo inferior mais solicitado



Fonte: Cype3D, 2025.

Uma observação importante em relação aos banzos da treliça é que o banzo superior foi mais solicitado devido aos esforços de compressão, o banzo inferior também foi mais afetado pelos esforços de compressão, porém causado por uma combinação diferente. Esse comportamento estrutural está diretamente relacionado às combinações de ações que incluem os efeitos do vento.

O fenômeno ocorre porque a sucção gerada pelo vento na cobertura tende a aliviar parte das cargas gravitacionais atuantes na estrutura, reduzindo o efeito das cargas permanentes e acidentais. No entanto, em algumas combinações essa sucção não é suficiente para superar totalmente essas cargas, resultando em uma distribuição de esforços onde o banzo superior permanece predominantemente comprimido e o banzo inferior, tracionado. Na situação em que o vento  $0^\circ$  age como carga principal ocorre o contrário, o banzo superior sofreu mais devido a tração e o banzo inferior, devido a compressão. Esse resultado se deve a combinação que engloba o vento atuando a  $0^\circ$ , ou seja, realizando sucção no telhado. Isso mostra que a força do vento superou as cargas permanentes e acidentais inseridas na estrutura.

Essa análise evidencia a importância de considerar corretamente as combinações de vento no dimensionamento, garantindo que os elementos estruturais atendam às verificações normativas tanto para estados-limite últimos (ELU) quanto para estados-limite de serviço (ELS).

A Figura 52 ilustra o deslocamento padrão da estrutura para a combinação de cargas sem a influência do vento, definida como  $1,25PP + 1,25PERM + 1,5SC$ . Essa

combinação considera os efeitos do peso próprio da estrutura (PP), cargas permanentes como o peso das telhas (PERM) e sobrecargas acidentais (SC), refletindo o comportamento estrutural sob condições de carregamento gravitacional predominante. Nesta condição, verifica-se que o banzo superior está sujeito a esforços de compressão, enquanto o banzo inferior sofre esforços de tração. Esse comportamento é esperado em estruturas treliçadas submetidas a carregamentos verticais sem a influência da ação do vento, onde a parte superior da treliça tende a se encurtar e a parte inferior a se alongar.

**Figura 52** - Deslocamento padrão para cargas verticais sem a influência do vento

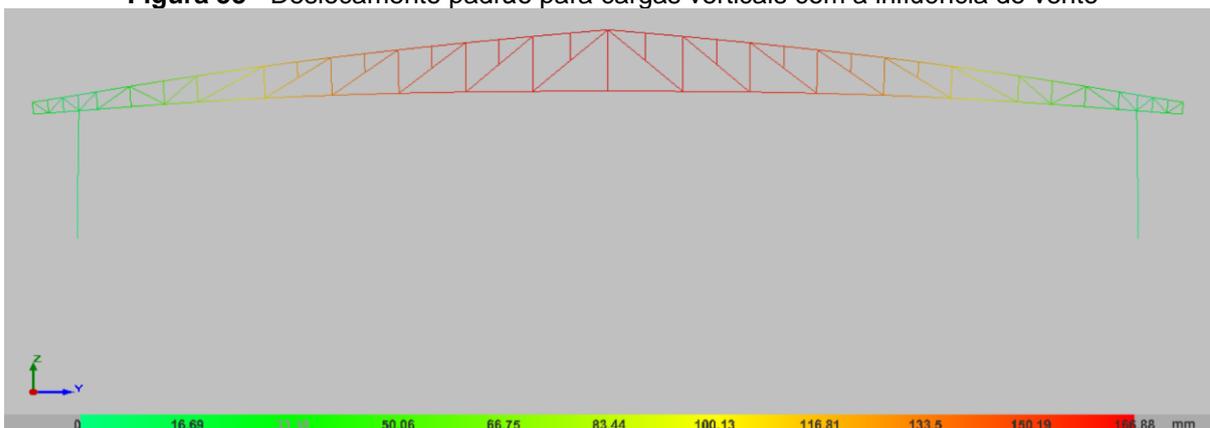


Fonte: *Cype3D*, 2025.

Na combinação de cargas em que a ação do vento supera as cargas acidentais, a estrutura apresenta um deslocamento vertical para cima, resultado do efeito de sucção exercido pelo vento sobre a cobertura. Esse fenômeno ocorre porque a pressão negativa gerada pelo vento reduz a carga gravitacional total atuante na estrutura, causando um comportamento estrutural distinto em relação às combinações dominadas por cargas permanentes e acidentais.

A Figura 53 ilustra esse deslocamento padrão para a combinação PP + PERM + 1,4 VENTO 0°, onde a carga de vento é a sobrecarga predominante na análise. Nessa condição, o banzo superior sofre tração, enquanto o banzo inferior experimenta compressão, invertendo parcialmente o comportamento estrutural observado nas combinações sem vento significativo.

**Figura 53** - Deslocamento padrão para cargas verticais com a influência do vento



Fonte: *Cype3D*, 2025.

A diagonal mais solicitada do projeto apresentou um aproveitamento de 138%, ultrapassando o limite máximo permitido pela norma. Esse valor indica que a peça está submetida a esforços superiores à sua capacidade resistente, comprometendo a segurança estrutural.

A não conformidade identificada está associada à resistência à compressão, que foi superada pela carga de cálculo considerada na verificação. Esse problema está relacionado a intensidade das combinações de carga aplicadas.

A Figura 54 apresenta a verificação realizada pelo software *Cype3D*, detalhando os esforços atuantes e a combinação de cargas crítica que resultou na falha da diagonal

**Figura 54** - Verificação a compressão da diagonal mais solicitada

Resistência à compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta: \underline{1.380} \quad \times$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N396, para a combinação de ações 1.25·PP+1.25·PERM+1.5·SC.

$N_{c,Sd}$ : Força normal de compressão solicitante de cálculo.

$$N_{c,Sd}: \underline{9.701} \text{ t}$$

A força normal de compressão resistente de cálculo  $N_{c,Rd}$  deve ser tomada como:

$$N_{c,Rd} = \chi A_n f / \gamma$$

$$N_{c,Rd}: \underline{7.031} \text{ t}$$

Fonte: *Cype3D*, 2025.

Todos os montantes da treliça atenderam satisfatoriamente às verificações estruturais, sem apresentar erros nos critérios de dimensionamento. Para exemplificar

essa análise, foi considerado o montante mais solicitado, que apresentou um aproveitamento de 44%. Esse valor indica que o esforço de compressão atuante na peça corresponde a menos da metade da sua capacidade resistente, demonstrando que a seção adotada possui uma margem de segurança considerável para as cargas aplicadas.

A Figura 55 apresenta a verificação estrutural detalhada do montante mais solicitado, incluindo os parâmetros utilizados na análise e os valores obtidos para esforço de cálculo e resistência à compressão. Esse resultado confirma a adequação do dimensionamento dos montantes dentro dos limites estabelecidos pelas normas técnicas.

**Figura 55** - Verificação da resistência à compressão do montante mais solicitado

Resistência à compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.7)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta = 0.444 \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N414, para a combinação de ações PP+PERM+1.4-Vento90-2.

$N_{c,Sd}$ : Força normal de compressão solicitante de cálculo.

$$N_{c,Sd} = 3.526 \text{ t}$$

A força normal de compressão resistente de cálculo  $N_{c,Rd}$  deve ser tomada como:

$$N_{c,Rd} = \gamma A_c f_c / \gamma$$

$$N_{c,Rd} = 7.935 \text{ t}$$

Fonte: Cype3D, 2025.

Com base na concepção de treliças do tipo trapezoidal, recomenda-se que a flecha no centro do vão esteja compreendida entre L/10 e L/15, sendo essa uma faixa ideal para garantir um compromisso entre desempenho estrutural e eficiência de material. Essa escolha visa manter inércias equivalentes nas seções transversais centrais para os diferentes tipos de pórticos, promovendo uma distribuição mais uniforme dos esforços internos ao longo da treliça.

Além disso, para o tipo de telha adotado no projeto, o fabricante recomenda uma inclinação de 10% na cobertura, não apenas por questões de escoamento de água, mas também porque essa inclinação colabora diretamente com a configuração geométrica da treliça, possibilitando uma flecha maior no centro do vão, o que, por sua vez, reduz os momentos fletores e os esforços axiais nas barras.

No entanto, ao analisar o projeto real da cobertura, observa-se que a relação adotada entre o vão e a flecha foi de L/17, associada a uma inclinação de cobertura

de 8%. Esses valores indicam uma configuração geométrica pouco eficiente, uma vez que resultam em um perfil de treliça mais horizontal, o que aumenta os esforços internos nas barras, especialmente nos banzos e diagonais, exigindo perfis mais robustos para resistir às ações atuantes.

Essa escolha de geometria compromete a eficiência estrutural do pórtico transversal, elevando o consumo de aço e dificultando o atendimento aos critérios normativos de verificação em ELU e ELS. Assim, destaca-se a importância de compatibilizar os aspectos geométricos da treliça com os requisitos do sistema de cobertura, de forma a otimizar o desempenho estrutural e garantir a segurança e a economia da solução adotada.

### 5.1.3 Pilares

Todos os pilares da estrutura atenderam satisfatoriamente às verificações realizadas pelo software, demonstrando conformidade com os critérios normativos. Os pilares mais solicitados foram aqueles que compõem o pórtico transversal de maior área de influência de carga, suportando os maiores esforços dentro do sistema estrutural.

A Figura 56 apresenta a verificação da resistência à flexo-compressão, que considera simultaneamente os esforços normais de compressão e os momentos fletores atuantes nos pilares.

**Figura 56** - Verificação da resistência à flexo-compressão do pilar mais solicitado

Resistência à flexo-compressão (ABNT NBR 14762:2010, Artigo 9.9)

Os esforços de cálculo desfavoráveis são obtidos no nó N15, para a combinação de hipóteses 1.25-PP+1.25-PER+1.5-SC.

$$\eta = \frac{N_{c,Sd} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{x,Rd}}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta = 0.726 \quad \checkmark$$

Onde:

$N_{c,Sd}$ : Força normal de compressão solicitante de cálculo.

$M_{x,Sd}$ ,  $M_{y,Sd}$ : Momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente.

$N_{c,Rd}$ : Força normal de compressão resistente de cálculo, conforme 9.7.

$M_{x,Rd}$ ,  $M_{y,Rd}$ : Momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos X e Y, respectivamente, calculados conforme 9.8.2.

$$N_{c,Sd}: 6.174 \text{ t}$$

$$M_{x,Sd}: 2.594 \text{ t-m}$$

$$M_{y,Sd}: 0.003 \text{ t-m}$$

$$N_{c,Rd}: 41.488 \text{ t}$$

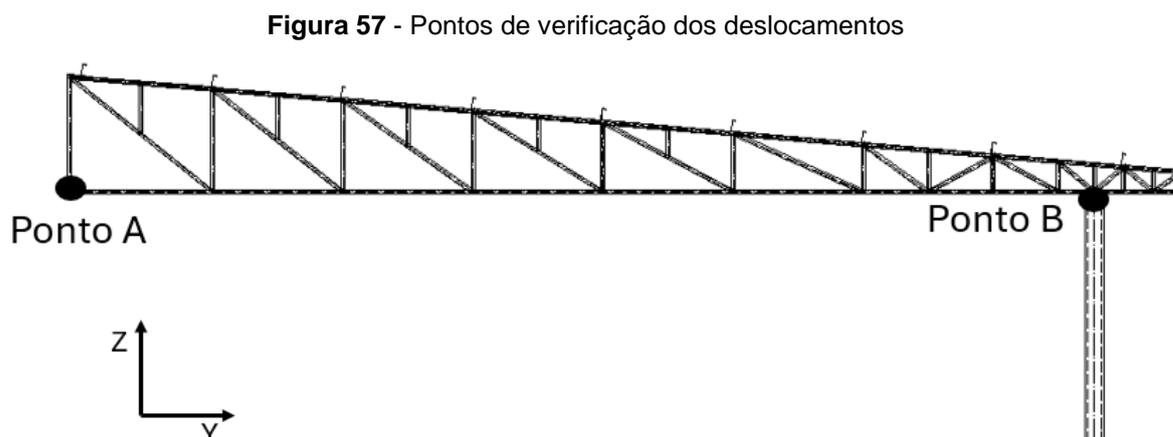
$$M_{x,Rd}: 4.498 \text{ t-m}$$

$$M_{y,Rd}: 3.517 \text{ t-m}$$

Fonte: Cype3D, 2025.

### 5.1.4 Deslocamentos

Os deslocamentos verticais e horizontais da estrutura foram analisados utilizando o software de cálculo estrutural, com verificações específicas nos pontos A e B, conforme indicado na Figura 57. O ponto B representa o topo do pilar, local onde a treliça está apoiada.



Fonte: Autor, 2025.

Os valores dos deslocamentos máximos são apresentados na Tabela 9, as orientações positivas e negativas dos eixos seguem o plano indicado na Figura 57.

**Tabela 9** - Deslocamentos máximos em milímetros da estrutura original

Deslocamentos (mm)	Deslocamento em X		Deslocamento em Y		Deslocamento em Z	
	Máx. (-)	Máx. (+)	Máx. (-)	Máx. (+)	Máx. (-)	Máx. (+)
Ponto A	0,558	0,324	1,666	2,511	141,45	59,92
Ponto B	0,021	0,011	5,16	10,248	0,214	0,125

Fonte: Autor, 2025.

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), o deslocamento máximo da treliça deve ser inferior a  $L/250$ . Considerando que o vão do galpão é de 26,88 metros, o deslocamento máximo permitido é de 107,52 mm. No entanto, conforme os dados da Tabela 9, o deslocamento em Z no ponto A foi de 141,45 mm (para baixo) ocasionado pela combinação que considera a ação da sobrecarga de 0,25 kN/m<sup>2</sup> como força principal atuando na estrutura e não considera as forças devido ao vento. O

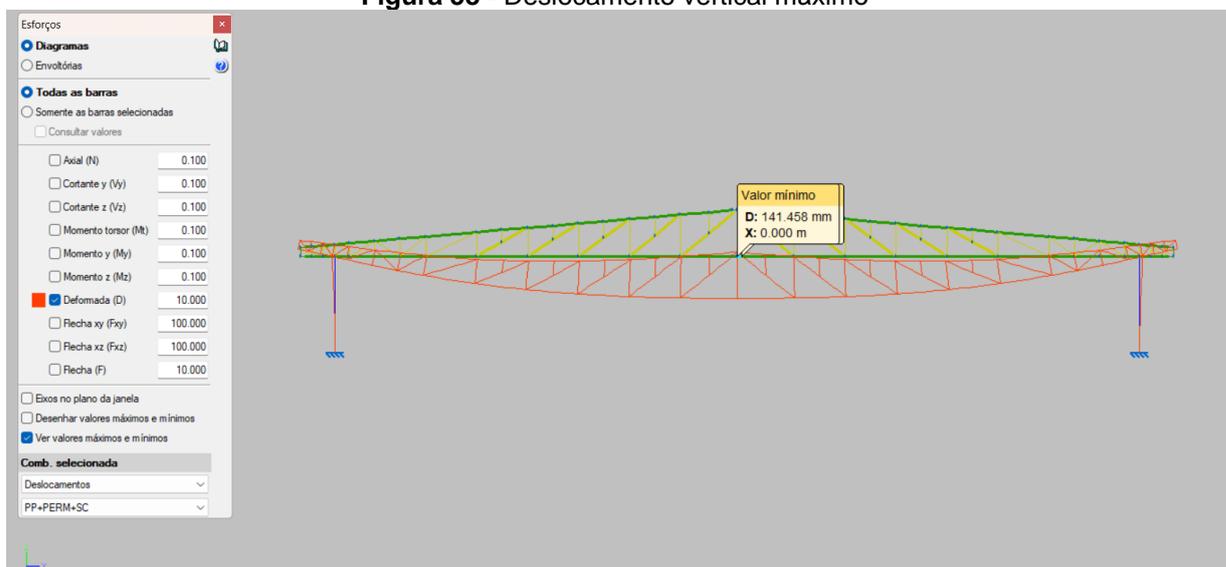
deslocamento em Z neste ponto excede o limite normativo e indica a necessidade de ajustes no dimensionamento ou na rigidez da estrutura.

Além disso, a norma estabelece que o deslocamento horizontal no topo dos pilares deve ser no máximo  $H/300$ . Com uma altura de pilar de 3,25 metros, o valor limite permitido para deslocamentos horizontais é de 10,83 mm. A análise dos deslocamentos nos eixos X e Y para o ponto B revelou que o deslocamento em Y positivo atingiu 10,248 mm, ficando abaixo do valor permitido.

Esses resultados apontam para a necessidade de revisão do sistema estrutural, podendo incluir aumento da rigidez da treliça, adoção de contraventamentos adicionais ou ajustes nas ligações para melhorar o desempenho da estrutura dentro dos limites normativos.

A Figura 58 apresentada ilustra o deslocamento máximo no centro do vão da treliça, correspondente ao deslocamento no eixo Z (vertical, de cima para baixo), resultante das combinações de forças gravitacionais sem a influência da carga de vento. Esse deslocamento ocorre devido à ação do peso próprio da estrutura (PP), cargas permanentes (PERM) e sobrecarga (SC) sobre a estrutura, sendo um fator crítico na avaliação do desempenho da treliça.

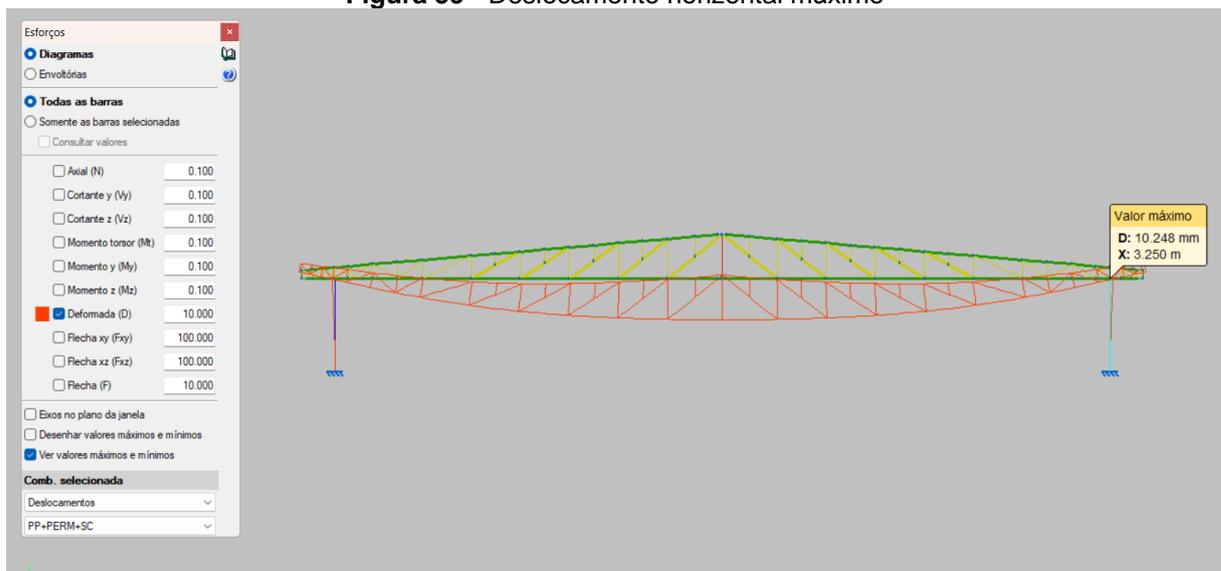
**Figura 58** - Deslocamento vertical máximo



Fonte: Cype3D, 2025.

A Figura 59 mostra o deslocamento horizontal máximo no eixo Y medido no topo do pilar.

**Figura 59** - Deslocamento horizontal máximo



Fonte: Cype3D, 2025.

## 5.2 RESULTADOS DO ESTUDO PARAMÉTRICO

São apresentados os resultados das taxas de consumo de aço e os deslocamentos máximos obtidos para todos os modelos considerados no estudo paramétrico. Além disso, é realizada uma análise comparativa entre as diferentes tipologias estruturais, permitindo avaliar a eficiência e o desempenho estrutural de cada configuração.

A taxa de consumo de aço é amplamente utilizada como um critério inicial de comparação entre tipologias de galpões de uso geral. No presente estudo, essa métrica foi adotada para analisar a relação entre peso estrutural e desempenho, permitindo a identificação das soluções mais econômicas e eficientes.

Além do consumo de material, também são apresentados os deslocamentos verticais e horizontais dos pórticos transversais, servindo como referência para a comparação do desempenho estrutural das diferentes tipologias. Essa análise é essencial para garantir que os deslocamentos estejam dentro dos limites normativos, assegurando a estabilidade e funcionalidade das estruturas avaliadas.

Após o processo de análise e dimensionamento dos modelos, detalhado no Capítulo 7, foi elaborada uma lista de materiais, contendo as informações básicas sobre os perfis utilizados em cada modelo. Com base nesses dados, foi determinada a taxa de consumo de aço para cada configuração estrutural do estudo, permitindo a comparação direta entre os diferentes sistemas adotados.

### 5.2.1 Quantitativo de material

Na Tabela 10 mostra-se a lista de material elaborada para o modelo de pórtico com viga de alma cheia (AC) com vão livre de 26,88 metros, obtida após análise e dimensionamento dos elementos estruturais. A análise e a verificação de seções desse mesmo modelo foram descritas no Capítulo 7.

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

- a) descrição do modelo;
- b) descrição do perfil e definição do tipo de elemento estrutural;
- c) comprimento total;
- d) peso total do pórtico transversal.

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

**Tabela 10** - Lista de material do pórtico de alma cheia

<b>Perfil</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comp. total</b>	<b>Peso</b>
		m	Kg
CVS400X82	Viga de cobertura	258,132	21276,54
CS300X102	Pilar	66,19	6729,11
Peso total (Kg)			28005,65
Área (m <sup>2</sup> )			1399
Taxa (Kg/m <sup>2</sup> )			20,01

Fonte: Autor, 2025.

A Tabela 11 apresenta o quantitativo total de aço utilizado na composição dos pórticos transversais formados por treliças do tipo banzos paralelos (BP). Ao final da tabela, indica-se a respectiva taxa de consumo de aço, utilizada como parâmetro de eficiência estrutural e econômica.

**Tabela 11** - Lista de material do pórtico com treliça de banzos paralelos

<b>Perfil</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comp. total</b>	<b>Peso</b>
		m	Kg
L10X8.96	Banzo	1198,30	10736,76
L10X8.96	Barras internas	543,45	4869,31
C200X75X25X3.00	Pilar	135,06	1195,28
Peso total (Kg)			16801,35
Área (m <sup>2</sup> )			1399
Taxa (Kg/m <sup>2</sup> )			12,00

Fonte: Autor, 2025.

A Tabela 12 mostra o quantitativo de aço para os pórticos transversais formados por treliças do tipo trapezoidal (TP), no fim da tabela indica-se a taxa de consumo de aço.

**Tabela 12** - Lista de material do pórtico com treliça trapezoidal

<b>Perfil</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comp. total</b>	<b>Peso</b>
		m	Kg
L8X5.96	Banzo	1218,04	7259,55
L10X7.53	Barras internas	667,86	5028,96
C200X75X25X2.66	Pilar	135,06	1054,81
Peso total (Kg)			13343,32
Área (m <sup>2</sup> )			1399
Taxa (Kg/m <sup>2</sup> )			9,53

Fonte: Autor, 2025.

A Tabela 13 mostra o quantitativo de aço para os pórticos transversais formados por treliças em arco (TA), no fim da tabela indica-se a taxa de consumo de aço.

Para o dimensionamento dos pilares da tipologia de pórtico transversal em questão, verificou-se que os perfis do tipo UDC (U com abas voltadas para dentro), conforme apresentados no Capítulo 7, item 7.7, não atenderam aos critérios normativos, tanto no que diz respeito à resistência mecânica dos perfis quanto à limitação de deslocamentos horizontais sob as combinações de ações previstas.

Diante dessas limitações, e visando garantir o atendimento aos Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Serviço (ELS), foi necessária a substituição desses perfis por elementos com maior rigidez e capacidade resistente. Assim, optou-se por utilizar perfis soldados de chapa, especificamente do tipo Coluna Soldada (CS)

**Tabela 13** - Lista de material do pórtico com treliça em arco

<b>Perfil</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comp. total</b>	<b>Peso</b>
		m	Kg
L5X2.93	Banzo	1327,74	3890,27
L5X4.25	Barras internas	692,23	2941,97
CS300X109	Pilar	71,20	7763,45
Peso total (Kg)			14595,69
Área (m <sup>2</sup> )			1399
Taxa (Kg/m <sup>2</sup> )			10,43

Fonte: Autor, 2025.

A Tabela 14 apresenta os perfis comuns a todas as tipologias estruturais consideradas no estudo paramétrico, independentemente da configuração adotada para os pórticos transversais.

Entre os elementos padronizados em todos os modelos, destacam-se as terças, elementos responsáveis por transmitir as cargas da cobertura (peso próprio, sobrecarga de uso e ações do vento) para a estrutura principal; contraventamentos são elementos fundamentais para a estabilidade global da estrutura, resistindo às forças horizontais e evitando deslocamentos excessivos; linhas de corrente utilizadas para prevenir a flambagem lateral das terças, especialmente em vãos maiores, funcionando exclusivamente à tração.

A padronização desses componentes garante uniformidade nos critérios de comparação, permitindo que a análise do desempenho estrutural entre as diferentes tipologias de galpão foque nas variações dos elementos principais (como pilares, vigas e treliças), enquanto mantém constante a influência dos elementos secundários.

**Tabela 14** - Lista de materiais comuns entre as tipologias

<b>Tipologia</b>	<b>Terça</b>	<b>Linha de corrente</b>	<b>Contraventamento</b>	<b>Peso total</b>
	C200X75X25X3.25	L60X4	Ø3/8	(Kg)
AC	7051,21	812,56	295,28	8159,05
BP	7920,10	883,03	335,92	9139,05
TP	7920,10	883,03	335,92	9139,05
TA	7460,64	1052,12	342,79	8855,55

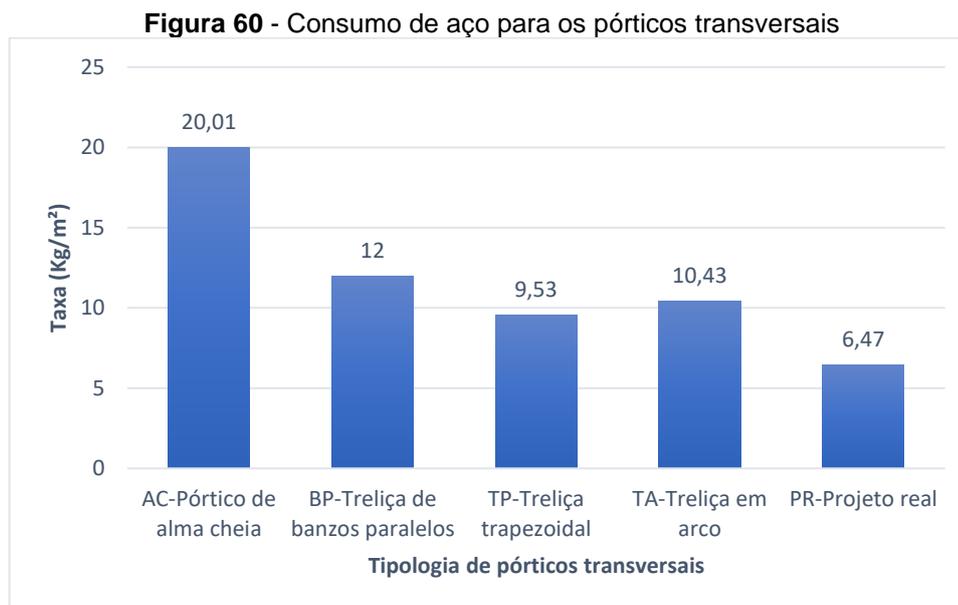
Fonte: Autor, 2025.

### 5.2.2 Variação da taxa de consumo de aço

Apresenta-se a seguir uma sobreposição dos resultados das taxas de consumo de aço referentes aos pórticos transversais, para as diferentes tipologias estruturais analisadas no estudo paramétrico incluindo a taxa de consumo de aço para os pórticos transversais utilizados no projeto real. Essa comparação foi realizada com base nas variações paramétricas discutidas no Capítulo 7, permitindo uma avaliação direta do desempenho estrutural em função do consumo de material.

A representação gráfica desses dados tem como objetivo evidenciar a eficiência estrutural relativa de cada tipologia, considerando-se o vão livre, a configuração geométrica dos elementos principais (como vigas, pilares e treliças) e a quantidade total de aço utilizada por metro quadrado de galpão.

Por meio dessa análise comparativa, através da Figura 60 é possível identificar as tipologias mais econômicas em termos de consumo de aço, sem comprometer a segurança ou o desempenho estrutural. Além disso, a sobreposição dos resultados contribui para a seleção de soluções mais racionais e otimizadas no desenvolvimento de projetos de galpões industriais ou logísticos, levando em conta tanto os aspectos técnicos quanto os econômicos.

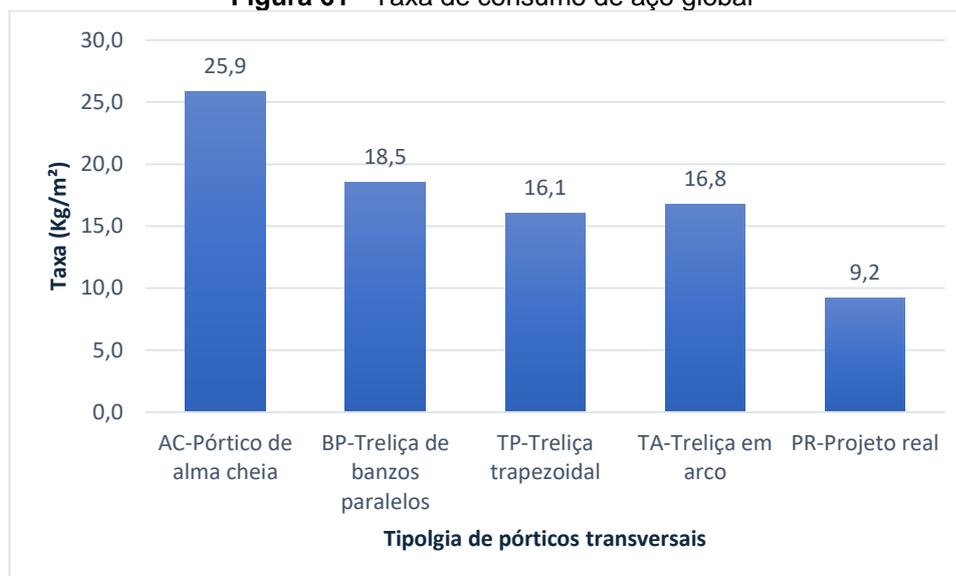


Fonte: Autor, 2025.

A Figura 61 representa os resultados da taxa de consumo de aço global para todas as tipologias estruturais avaliadas no estudo paramétrico, incluindo também o valor correspondente ao projeto real executado.

Diferentemente das análises anteriores que focaram nos pórticos transversais isoladamente, esta avaliação considera todos os elementos estruturais do galpão. Essa abordagem proporciona uma visão mais abrangente e representativa do consumo total de aço, refletindo o comportamento estrutural completo e o impacto das escolhas de tipologia ao longo de todo o sistema.

A comparação direta entre os modelos paramétricos e o projeto real permite identificar oportunidades de otimização, destacando quais tipologias apresentam maior racionalidade estrutural em termos de consumo de material, mantendo o atendimento aos critérios normativos e de desempenho.

**Figura 61** - Taxa de consumo de aço global

Fonte: Autor, 2025.

A maior taxa de consumo de aço global, conforme indicado no Figura 61, foi observada na tipologia de pórtico com viga de alma cheia, evidenciando um maior volume de material empregado na composição estrutural do galpão quando comparado às demais soluções analisadas.

Por outro lado, o menor consumo de aço, considerando apenas os pórticos transversais isoladamente, foi obtido pela tipologia trapezoidal. Já na análise global — que contempla todos os elementos estruturais do galpão — a tipologia com treliça trapezoidal também se destacou com a menor taxa de consumo de aço, demonstrando-se a opção mais eficiente em termos de racionalidade estrutural e econômica.

O modelo de treliça utilizado no projeto real foi incluído no gráfico apenas com fins representativos e comparativos, não sendo considerado na análise definitiva de taxa de consumo de aço. Isso se deve ao fato de que, conforme evidenciado ao longo deste trabalho, os elementos do pórtico transversal do projeto real não atendem aos requisitos normativos estabelecidos para os Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Serviço (ELS).

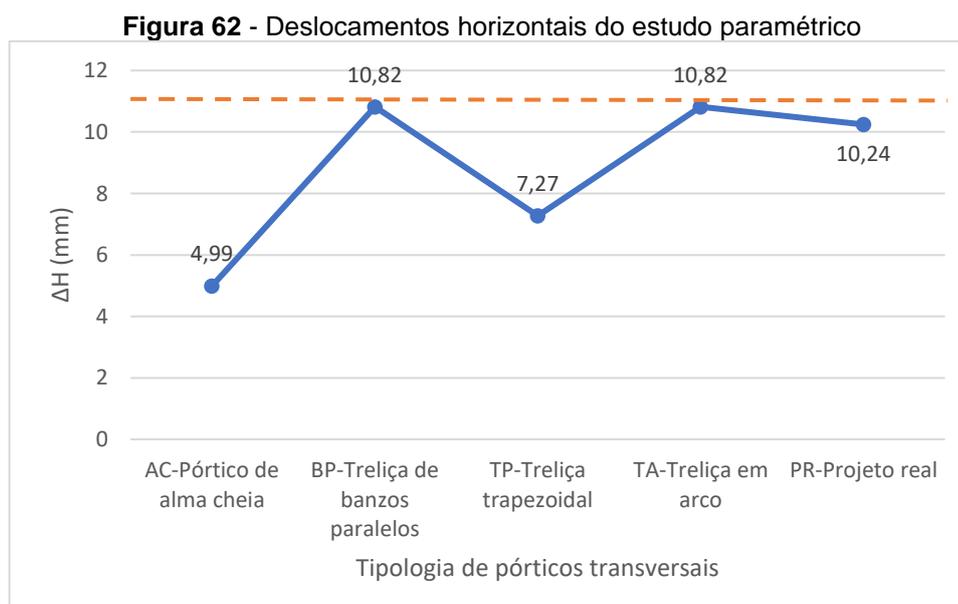
Além disso, as terças metálicas utilizadas no projeto real também não satisfizeram os critérios de verificação de resistência, apresentando falhas tanto em flexo-compressão quanto em relação à flambagem lateral. Essa deficiência estrutural está diretamente associada ao índice de esbelteza dos perfis utilizados, o qual ultrapassou o limite máximo permitido pela NBR 14762 (ABNT, 2010).

Tal situação poderia ter sido evitada com a adoção de linhas de corrente, elementos que atuam exclusivamente à tração e têm como principal função o travamento lateral das terças, promovendo a redução do comprimento de flambagem efetivo. A implementação dessas barras intermediárias teria contribuído significativamente para a estabilidade e o desempenho global da cobertura, evitando a perda de capacidade resistente por instabilidade lateral.

### 5.2.3 Comparativo dos deslocamentos horizontais das diversas tipologias

O valor limite para o deslocamento horizontal, estabelecido no presente trabalho, com base nas recomendações da NBR8800: 2008 (ABNT, 2008), Anexo C, que limita o deslocamento horizontal máximo em  $H/300$ , sendo  $H$  a altura da coluna, temos  $\Delta H_{\text{máx}} = 10,83$  mm. Estes valores além de limitar os deslocamentos máximos serão possíveis comparar os diferentes sistemas estruturais estudados no presente trabalho.

Apresentam-se na Figura 62 os deslocamentos horizontais ( $\Delta H$ ). De forma semelhante às taxas de consumo de aço, os deslocamentos do pórtico transversal também podem ser utilizados como uma referência para comparação do desempenho das tipologias.



Fonte: Autor, 2025.

Em galpões de uso geral, os deslocamentos horizontais ocorrem predominantemente devido à ação do vento atuando na direção transversal da edificação. Essa solicitação gera esforços horizontais nos pórticos transversais, os quais devem ser devidamente resistidos pelos elementos estruturais para garantir a estabilidade global da estrutura e o atendimento aos critérios normativos de Estado Limite de Serviço (ELS).

Os principais responsáveis por conter esses deslocamentos horizontais são as colunas dos pórticos transversais, que atuam como elementos verticais de contraventamento, resistindo aos esforços laterais por meio de flexo-compressão. Embora a viga de cobertura também participe desse mecanismo de contenção, sua contribuição é menos significativa devido à menor rigidez lateral associada à sua posição e configuração estrutural.

A partir da análise comparativa entre as diferentes tipologias estudadas, pode-se concluir que a tipologia com viga de alma cheia demonstrou melhor desempenho quanto aos deslocamentos horizontais, seguido pela tipologia de treliça trapezoidal, apresentando valores inferiores aos observados nas demais soluções. Isso se deve, em grande parte, à sua distribuição geométrica mais eficiente, que proporciona uma maior rigidez lateral nos planos dos pórticos, reduzindo assim as deformações horizontais resultantes da ação do vento.

Portanto, para situações em que os deslocamentos laterais são um critério de projeto relevante — como em regiões com elevada pressão de vento ou quando há limitação de deslocamento por exigências de fechamento ou uso interno — a treliça trapezoidal, devido sua baixa taxa de consumo de aço, se apresenta como uma alternativa mais eficiente e estável, contribuindo positivamente para o desempenho global do galpão.

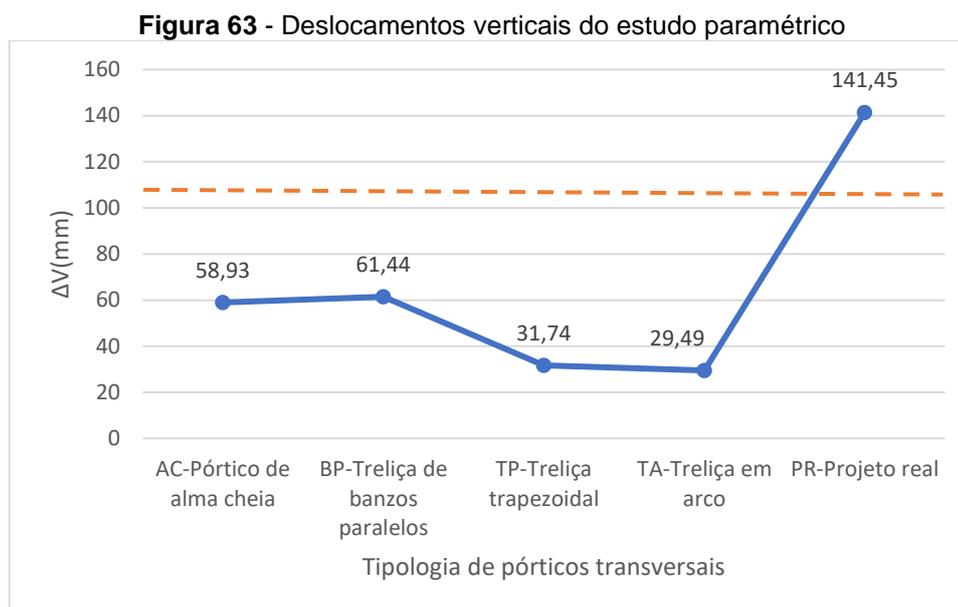
Nas vigas treliçadas em banzos paralelos e treliça em arco, a falta de um elemento para conter o deslocamento horizontal do topo das colunas provoca deslocamentos superiores àqueles produzidos nas vigas treliçadas trapezoidais.

#### 5.2.4 Comparativo dos deslocamentos verticais das diversas tipologias

A norma NBR8800: 2008 (ABNT, 2008), Anexo C, recomenda adotar o valor máximo para o deslocamento vertical igual a  $L/250$ , sendo  $L$  o vão teórico entre apoios.

O valor limite estabelecido, no presente trabalho, para as diferentes tipologias foi de  $\Delta V_{\text{máx}} = 107,52 \text{ mm}$ .

Apresenta-se na Figura 63 os deslocamentos verticais ( $\Delta V$ ). Como mencionado os deslocamentos do pórtico transversal também podem ser utilizados como uma referência para comparação do desempenho das tipologias. Por esta razão, avaliam-se também os deslocamentos verticais.



Fonte: Autor, 2025.

Os deslocamentos verticais em estruturas de galpões são, em geral, resultantes da ação combinada do peso próprio da estrutura, das sobrecargas permanentes e acidentais, e das ações do vento, principalmente quando este atua com componente de sucção sobre a cobertura. Esses deslocamentos devem ser rigorosamente avaliados, uma vez que afetam diretamente o desempenho funcional da estrutura, como o escoamento de águas pluviais, a integridade de fechamentos e acabamentos, e o conforto dos usuários.

Assim como ocorre com os deslocamentos horizontais, os limites admissíveis para os deslocamentos verticais estão definidos na norma NBR 8800:2008 (ABNT, 2008), dentro do contexto dos Estados Limites de Utilização (ELU e ELS). Todos os modelos estruturais avaliados no presente estudo foram analisados de acordo com esses critérios, garantindo a conformidade normativa.

Dentre as tipologias analisadas, o pórtico com treliça em arco apresentou o menor deslocamento vertical, demonstrando-se o mais eficiente em termos de rigidez

vertical. Esse comportamento está diretamente relacionado à sua geometria curva, que favorece a redistribuição dos esforços e reduz a flexão nas barras da cobertura. Em seguida, o pórtico com treliça trapezoidal também apresentou desempenho satisfatório, com deslocamentos verticais inferiores aos limites permitidos e superior apenas à tipologia em arco.

Esses resultados indicam que, do ponto de vista de controle de deslocamentos verticais, as tipologias em treliça, especialmente as de geometria em arco, mostraram-se mais eficientes quando comparadas a tipologias com vigas de alma cheia, além de proporcionarem maior uniformidade na distribuição dos esforços estruturais.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal a análise estrutural de um galpão com estrutura metálica, bem como a realização de um estudo paramétrico comparativo entre diferentes tipologias estruturais aplicáveis a pórticos transversais. Inicialmente, foi realizada uma avaliação detalhada do projeto estrutural original, com a verificação dos elementos segundo os critérios normativos estabelecidos pela NBR 8800 (ABNT, 2008) e NBR 14762 (ABNT, 2010). A partir dessa análise, identificaram-se diversas não conformidades estruturais no projeto original, principalmente relacionadas à resistência dos perfis, verificação de flambagem, deslocamentos fora dos limites normativos e ausência de elementos auxiliares, como as linhas de corrente, fundamentais para o desempenho das terças.

A metodologia empregada neste estudo consistiu na modelagem e análise estrutural do projeto original por meio do software Cype3D, com base nas verificações dos Estados Limites Últimos (ELU) e de Serviço (ELS), conforme estabelecido pelas normas NBR 8800 (ABNT, 2008) e NBR 14762 (ABNT, 2010). A avaliação estrutural evidenciou diversas inconformidades significativas, incluindo barras submetidas a esforços superiores à sua capacidade resistente (aproveitamento acima de 100%), perfis comprimidos com índice de esbeltez excedendo os limites normativos, além da ausência de elementos estabilizadores como as linhas de corrente, essenciais para o controle da flambagem lateral de terças. Verificaram-se ainda deslocamentos verticais que ultrapassam os valores máximos admissíveis, comprometendo o atendimento ao ELS. Ademais, a configuração geométrica adotada para a treliça, com relação entre vão e flecha igual a  $L/17$  e inclinação de cobertura de apenas 8%, demonstrou-se inadequada, elevando os esforços internos e resultando em um comportamento global menos eficiente da estrutura. Vale ressaltar que durante a execução da obra, as inadequações normativas identificadas no projeto original da cobertura metálica, especialmente os deslocamentos verticais excessivos devido aos grandes vãos livres, foram discutidas pela equipe técnica. Como solução, adotou-se a inserção de pilares intermediários, reduzindo o vão das treliças. Essa medida resultou na melhora do comportamento estrutural, com menor esforço nas barras e deslocamentos controlados, assegurando o atendimento aos critérios dos Estados Limites Últimos (ELU) e de Serviço (ELS).

Posteriormente, desenvolveu-se um estudo paramétrico envolvendo diferentes configurações de pórticos transversais, como treliças trapezoidais, pórticos de alma cheia e treliças em arco, com a finalidade de comparar o desempenho estrutural das tipologias por meio de parâmetros técnicos, tais como a taxa de consumo de aço e os deslocamentos verticais e horizontais. Os modelos foram analisados com o auxílio do software *Cype3D*, que permitiu simulações detalhadas das ações e combinações de carregamentos conforme as prescrições dos Estados Limites Últimos (ELU) e de Serviço (ELS).

Os resultados obtidos evidenciaram que, embora o modelo de pórtico de alma cheia apresente maior robustez estrutural, sua taxa de consumo de aço é significativamente superior em comparação com as demais tipologias, comprometendo a eficiência econômica. Por outro lado, a treliça trapezoidal apresentou os menores índices de deslocamentos e a menor taxa de consumo global de aço, demonstrando-se como uma alternativa estrutural mais eficiente e tecnicamente viável. A tipologia de treliça em arco, apesar de apresentar um desempenho intermediário, mostrou-se sensível às proporções geométricas, especialmente no que se refere ao deslocamento horizontal.

Com base nos resultados obtidos, a escolha da tipologia estrutural exerce impacto direto tanto na eficiência material quanto no desempenho global do sistema, sendo fundamental considerar, ainda na etapa de concepção do projeto, aspectos como esbeltez dos elementos, rigidez global, economia de materiais e facilidade de execução. Assim, o trabalho contribui para a tomada de decisões mais assertivas na fase de projeto estrutural de galpões, promovendo soluções seguras, normativamente adequadas e economicamente otimizadas.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir deste trabalho, alguns temas podem ser sugeridos para posteriores pesquisas, como:

- a) analisar e comparar os diferentes tipos de conexões metálicas em estruturas de galpões, avaliando sua influência no comportamento global e nos custos da obra;
- b) analisar o comportamento dinâmico de estruturas metálicas submetidas a ações de vento e cargas móveis, considerando diferentes configurações geométricas;
- c) estudar a influência da variação da inclinação da cobertura sobre o desempenho estrutural de diferentes tipologias de treliças.
- d) estudar o uso da terça vagão nas diferentes tipologias de treliça, avaliando a sua influência no comportamento estrutural global e no consumo de aço.
- e) realizar o estudo de vinculação da base das colunas em sistemas estruturais de galpões, analisando sua influência no desempenho estrutural e na taxa de consumo de aço.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 6120:2019 – Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.
- ARCELOMITTAL. **Catálogo perfil UDC**. Disponível em:< <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/industria/perfil-udc>>. Acesso em 10 de março de 2025.
- BAREIRO, Walter Gabriel. **Estudo e Modelagem de Estruturas Treliçadas utilizadas em Galpões Industriais Considerando Imperfeições Iniciais e Efeitos de Segunda Ordem**. 2015. Tese de Doutorado. PUC-Rio.
- BELLEI, Ildony H. **Edifícios Industriais em Aço - Projeto e Cálculo**. 6<sup>o</sup>.ed. PINI, São Paulo, 2010.
- BELLEI, Ildony H. **Edifícios de Múltiplos Andares em Aço**. 2<sup>o</sup>.ed. PINI São Paulo, 2008.
- BRITO, Mauro César. **Estruturas de Cobertura**. Departamento de Artes e Arquitetura, Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia, 2010.
- CHAMBERLAIN PRAVIA, Zacarias M. **Projeto e Cálculo de Estruturas de Aço – Edifício Industrial Detalhado**. Elsevier. Rio de Janeiro, 2013.
- CHAVES, M. R. **Avaliação do Desempenho de Soluções Estruturas para Galpões Leves**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP. Ouro Preto, 2007
- INSTITUTO AÇO BRASIL – CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. Zacarias M. Chamberlain Pravia (revs.), Gilnei Artur Drehmer e Enio Mesacasa Júnior. **Galpões para usos gerais**. Rio de Janeiro, 2010.
- NOGUEIRA, G.S. **Avaliação de Soluções Estruturais para Galpões compostos por Perfis de Aço Formados a Frio**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP. Ouro Preto, 2009.
- OLIVEIRA, L. **Projeto de pavilhões e estruturas industriais: Desenvolvimento de uma aplicação informática**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, FEUP. Porto, Portugal, 2011.
- PFEIL, W., PFEIL M. **Estruturas de Aço – Dimensionamento Prático**. 8<sup>o</sup> ed. Rio de Janeiro, 2009.
- PINHEIRO, A. C. da F. B. **Estrutura metálica: cálculo, detalhamento, exercícios e projeto**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
- KINGSPAN ISOESTE. (2020). **Catálogos de produtos**. Disponível em:< <https://kingspan-isoeste.com.br/solucoes/paineis-e-paredes/>>. Acesso em 10 de março de 2025.