



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PIAUÍ
CAMPUS POETA TORQUATO NETO
CENTRO DE TECNOLOGIA E URBANISMO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

VICENTE DE PAULA FERREIRA DANTAS JÚNIOR

ESTUDO DE ALTERNATIVAS ESTRUTURAIS EM AÇO FORMADO A FRIO PARA
GALPÕES INDUSTRIAIS DE USO GERAL

TERESINA

2024

VICENTE DE PAULA FERREIRA DANTAS JÚNIOR

ESTUDO DE ALTERNATIVAS ESTRUTURAIS EM AÇO FORMADO A FRIO PARA
GALPÕES INDUSTRIAIS DE USO GERAL

Projeto de Monografia apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Piauí como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Carlos Frederico Cardoso Fernandes.

TERESINA

2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, queria agradecer a Deus, por ter me mantido firme, com sabedoria e discernimento para enfrentar todos os desafios ao longo da formação.

Aos meus pais, Vicente e Alexsandra, que me faltam palavras para descrever todo o carinho, paciência e principalmente o esforço para que eu chegasse até aqui. Sempre me guiando nos momentos difíceis, me ensinando a ser uma pessoa melhor em todos os sentidos. São a minha base, minha fonte de inspiração. Se eu cheguei até aqui, foi graças a vocês!

Ao meu irmão Danilo Isaac, que sempre me apoiou e acreditou em mim, um dos pilares da minha base, sem você eu seria incompleto.

As minhas tias e tios, pela enorme contribuição para que eu chegasse até aqui, eternamente grato por tudo, minhas segundas mães e meus segundos pais.

Aos meus primos, obrigado por sempre estarem ao meu lado, pelas conversas, pelas inúmeras ajudas, pelo carinho e amor de sempre, serem por muitas vezes meu ombro amigo, meus irmãos e irmãs de outras mães.

Aos amigos que fiz em Pau dos Ferros – RN, onde iniciei minha jornada acadêmica, que nossa amizade apesar da distância nunca se perca ao longo do tempo.

Aos meus amigos de longa data da minha cidade natal Picos-PI, por sempre estarem juntos comigo nos momentos bons e difíceis ao longo da vida.

Aos amigos que fiz na UESPI, pelas conversas durante o tempo livre, pelo apoio e ajuda nos momentos difíceis. Que nossa parceria se preserve nessa nova jornada, agora como profissionais da Engenharia Civil.

A minha namorada Maria Clara, que me esteve comigo me ajudando e me apoiando, principalmente nessa reta final de curso, obrigado por todo carinho e amor.

Ao meu orientador, Prof. Me. Carlos Frederico Cardoso Fernandes, por todo o apoio e dedicação no cumprimento da sua função como educador. Sempre disposto e presente. Obrigado por todo conhecimento dividido durante todas as etapas de desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca, Prof. Me. Joãosué Arêa Leão e o Prof. Me. Alisson Rodrigues de Oliveira Dias, por sua colaboração. Além disso, gratidão ao corpo docente da Universidade Estadual do Piauí por seu papel fundamental na minha formação acadêmica e profissional.

RESUMO

No Brasil, as estruturas metálicas de um único pavimento emergem como as mais prevalentes, uma vez que abrangem uma ampla variedade de vãos e atendem a diversos setores como: fábricas, depósitos, lojas, academias, ginásios poliesportivos, garagens, granjas e hangares. Dentre essas estruturas, destaca-se significativamente a construção com perfis de aço formados a frio, que oferecem vantagens em termos de eficiência e economia, sendo utilizados em mezaninos, coberturas, habitações populares, e fabricações de painéis de *light steel framing*. A preferência por uma tipologia não implica necessariamente em maior economia no projeto, pois diversos fatores como pé direito, estética e atividades desempenham papéis importantes na escolha. Logo, o presente trabalho visa comparar e avaliar o desempenho de modelos estruturais distintos de galpões de uso geral de aço, com enfoque em perfis formados a frio, atendendo às recomendações da ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio. A metodologia do presente trabalho apresentou fases distintas, como: seleção das tipologias de pórticos transversais a serem estudadas (banzo paralelo, trapezoidal e triangular), variação dos parâmetros, análise estrutural e dimensionamento - feito através do *software Scia Engineer*. Através das análises, pode-se observar que, para o caso estudado, os pórticos apresentaram comportamentos similares. O consumo de aço é proporcional ao tamanho do vão, ou seja, à medida que o vão aumenta, a taxa de consumo de aço aumenta. Além disso, foi possível observar que a treliça trapezoidal apresentou deslocamentos verticais inferiores, se comparadas a triangular e de banzos paralelos. Conclui-se, portanto, que do ponto de vista estrutural, entre as tipologias e vãos estudados, os pórticos com treliça triangular são os mais eficientes, devido as suas baixas taxas de consumo de aço.

Palavras-chave: Galpões industriais; Estruturas Metálicas; Perfil formado à frio; Eficiência; Dimensionamento.

ABSTRACT

Engineering is a science premised on aiding society through technical and scientific applications grounded in its fields of study. In Brazil, single-story metal structures emerge as the most prevalent, as they encompass a wide variety of spans and cater to various sectors such as factories, warehouses, shops, academies, sports arenas, garages, farms, and hangars. Among these structures, construction with cold-formed steel profiles significantly stands out, offering advantages in terms of efficiency and economy, being utilized in mezzanines, roofs, affordable housing, and the manufacturing of light steel framing panels. Preference for a typology does not necessarily imply greater economy in the project, as various factors such as ceiling height, aesthetics, and activities play important roles in the selection. Therefore, the present study aims to compare and evaluate the performance of different structural models of general-purpose steel sheds, focusing on cold-formed profiles, in accordance with the recommendations of ABNT NBR 14762:2010 - Design of Steel Structures Composed of Cold-Formed Profiles. The methodology of the present study involved distinct phases, such as the selection of transverse frame typologies to be studied, parameter variation, structural analysis, and dimensioning - carried out through the Scia Engineer software. Through the analyses, it was observed that, for the case studied, the frames exhibited similar behaviors. Steel consumption is proportional to the size of the span; that is, as the span increases, the rate of steel consumption increases. Additionally, it was possible to observe that the trapezoidal truss presented lower vertical displacements compared to triangular and parallel-chord trusses. It is concluded, therefore, that from a structural standpoint, among the typologies and spans studied, frames with triangular trusses are the most efficient, owing to their low rates of steel consumption.

Keywords: Industrial Warehouses; Metal Structures; Cold-Formed Profile; Efficiency; Sizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de galpão treliçado e galpão composto por perfil de alma cheia.	17
Figura 2 - Pórtico de alma cheia.....	18
Figura 3 - Tipos de treliças para cobertura.	19
Figura 4 - Seção efetiva do perfil.	25
Figura 5 - Quadra poliesportiva em Lavras-MG destruída pela ação do vento.....	27
Figura 6 - Esquema de um galpão industrial formado por pórticos de com treliça de banzos paralelos.....	36
Figura 7 - Variação dos pórticos com treliça em banzos paralelos (BP).	37
Figura 8 - Esquema de um galpão industrial formado por pórticos de com treliça trapezoidal.	39
Figura 9 - Variação dos pórticos com treliça trapezoidal (TP).	40
Figura 10 - Esquema de um galpão industrial formado por pórticos de com treliça triangular.	41
Figura 11 - Variação dos pórticos com treliça triangular (TT).	42
Figura 12 - Delimitação da área abrangida pelo estudo paramétrico nas Isopletras de de velocidade básica $V_0(m/s)$	45
Figura 13 - Coeficientes de forma externos para as paredes.	46
Figura 14 - Coeficientes de forma externos para telhado em duas águas.....	47
Figura 15 - Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão para vento longitudinal (W_0°).	47
Figura 16 - Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão para vento transversal (W_90°).	47
Figura 17 - Caso de carga para vento longitudinal (W_0°) (kN/m^2).	48
Figura 18 - Caso de carga para vento transversal (W_90°) (kN/m^2),	48
Figura 19 - Ações provenientes do peso próprio de cobertura (G) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 15 metros.....	49
Figura 20 - Ações provenientes do peso próprio de cobertura (G) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 15 metros.....	50
Figura 21 - Ações provenientes do vento longitudinal (W_0°) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 15 metros.....	50
Figura 22 - Ações provenientes do vento longitudinal (W_90°) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 15 metros.....	51

Figura 23 - Vinculação das barras.	51
Figura 24 - Diagramas de Esforços Axiais.	52
Figura 25 - Diagrama de Momentos Fletores.	52
Figura 26 - Contraventamento para os vãos de 10, 15 e 20 metros.	53
Figura 27 - Descrição das caracteriscas do perfil de dupla cantoneira para as montantes/diagonais da treliça trapezoidal com vão de 15 metros.	54
Figura 28 - Dimensionamento a compressão do perfil de dupla cantoneira para as montantes/diagonais da treliça trapezoidal com vão de 15 metros.	55
Figura 29 - Cálculo da largura efetiva do perfil de dupla cantoneira para montantes/diagonais da treliça trapezoidal com vão de 15 metros.	56
Figura 30 - Tabela de verificações sobre o perfil de dupla cantoneira para a treliça trapezoidal com vão de 15 metros.	57
Figura 31 - Taxa de consumo aço para vão livre de 10 metros.	60
Figura 32 - Taxa de consumo aço para vão livre de 15 metros.	60
Figura 33 - Taxa de consumo aço para vão livre de 20 metros.	60
Figura 34 - Taxa de consumo de aço para as tipologias das estruturas consideradas, em função do das tipologias.	61
Figura 35 - Taxa de consumo de aço para pórtico com treliça de banzos paralelos (BP).	62
Figura 36 - Taxa de consumo de aço para pórtico com treliça trapezoidal (TP).	62
Figura 37 - Taxa de consumo de aço para pórtico com treliça triangular (TT).	62
Figura 38 - Taxa de consumo aço para as tipologias de pórtico transversal consideradas, em função do vão livre.	63
Figura 39 - Comparativo do deslocamento horizontal para pórtico com treliça de banzos paralelos (BP).	64
Figura 40 - Comparativo do deslocamento horizontal para pórtico com treliça trapezoidal (TP).	64
Figura 41 - Comparativo do deslocamento horizontal para pórtico com treliça triangular (TT).	65
Figura 42 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para todas as tipologias.	65
Figura 43 - Comparativo do deslocamento vertical para pórtico com treliça de banzos paralelos (BP).	67
Figura 44 - Comparativo do deslocamento vertical para pórtico com treliça trapezoidal (TP).	67

Figura 45 - Comparativo do deslocamento horizontal para pórtico com treliça triangular (TT).	68
Figura 46 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para todas as tipologias.....	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Influência das relações geométricas das seções tipo U enrijecido no modo critico.	24
Quadro 2 - Tipologias de pórticos considerados no estudo.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço-carbono.....	21
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço de baixa liga.....	22
Tabela 3 - Valores máximos da relação largura-espessura para elementos comprimidos.	32
Tabela 4 - Lista de material e deslocamento vertical para treliça em banzos paralelos (BP)...	58
Tabela 5 - Lista de material e deslocamento vertical para treliça trapezoidal (TP).....	58
Tabela 6 - Lista de material e deslocamento vertical para treliça triangular (TT).....	59
Tabela 7 - Deslocamento vertical máximo para as diversas tipologias.	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	<i>15</i>
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>15</i>
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	GALPÃO INDUSTRIAL DE USO GERAL	16
2.2	SISTEMAS ESTRUTURAIS DE GALPÕES DE USO GERAL	17
2.2.1	<i>Pórticos de Alma Cheia</i>	<i>18</i>
2.2.2	<i>Pórticos Treliçados</i>	<i>19</i>
2.3	ESTRUTURAS DE ESTABILIZAÇÃO LONGITUDINAL	19
2.4	TIPOS DE AÇOS ESTRUTURAIS	20
2.4.1	<i>Aços Carbono</i>	<i>21</i>
2.4.2	<i>Aços de Baixa Liga</i>	<i>21</i>
2.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO E DIMENSIONAMENTO DE PERFIS FORMADO A FRIO.....	22
2.5.1	<i>O uso de perfis formado a frio</i>	<i>22</i>
2.5.2	<i>Considerações sobre os métodos de dimensionamento de perfis formado a frio.....</i>	<i>23</i>
2.5.2.1	<i>Comportamento Estrutural de Perfis de Seção Aberta</i>	<i>23</i>
2.5.2.2	<i>Método das Larguras Efetivas (MLE).....</i>	<i>24</i>
2.6	AÇÃO DO VENTO NAS ESTRUTURAS METÁLICAS.....	27
2.7	PROJETO ESTRUTURAL E NORMAS.....	28
2.8	DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE AÇO	29
2.8.1	<i>Elementos Tractionados.....</i>	<i>29</i>
2.8.2	<i>Elementos Comprimidos</i>	<i>31</i>
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	VARIAÇÃO DE PARÂMETROS	33
3.2	DEFINIÇÃO DOS MODELOS.....	35
3.2.1	<i>Pórticos com Treliça de Banzos Paralelos.....</i>	<i>35</i>
3.2.2	<i>Pórticos com Treliça Trapezoidal</i>	<i>38</i>
3.2.3	<i>Pórticos com Treliça Triangular</i>	<i>40</i>
3.3	BASES PARA ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO.....	43
3.4	AÇÕES	43
3.4.1	<i>Sobrecarga de Cobertura (Q)</i>	<i>44</i>
3.4.2	<i>Vento</i>	<i>44</i>
3.4.2.1	<i>Estudo de Vento Típicos para Galpão em Duas Águas</i>	<i>46</i>
3.5	COMBINAÇÃO DE AÇÕES	48
3.6	ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DOS MODELOS ESTRUTURAIS.....	49

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	LISTA DE MATERIAIS E DESLOCAMENTO VERTICAL	58
4.2	COMPARATIVO DE TAXA DE CONSUMO DE AÇO	59
4.2.1	<i>Variação da Taxa de Consumo de Aço para o Mesmo Vão Livre</i>	<i>59</i>
4.2.2	<i>Variação da Taxa de Consumo de Aço para uma Mesma Tipologia</i>	<i>61</i>
4.3	COMPARATIVO DOS DESLOCAMENTOS DOS MODELOS PROPOSTOS	63
4.3.1	<i>Deslocamentos Horizontais</i>	<i>63</i>
4.3.2	<i>Deslocamentos Verticais</i>	<i>66</i>
5	CONCLUSÕES	70
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	72

1 INTRODUÇÃO

A Engenharia é uma ciência que tem como premissa auxiliar a sociedade por meio de aplicações técnicas e científicas baseadas em seus campos de estudo. A Engenharia Civil é responsável por aplicar o conhecimento obtido através de experiências passadas e estudos, garantido que as necessidades da sociedade sejam satisfeitas, sempre que possível, de maneira eficiente. Em geral, os aspectos que se destacam dessa evolução são:

- segurança – baseada em teorias da resistência dos materiais e teorias probabilísticas que são expostas por normas técnicas a serem seguidas;
- agilidade do processo – com a utilização de diferentes materiais e métodos construtivos;
- custo das obras - valor econômico necessário para as opções atuais;
- viabilidade - equilíbrio que define qual solução será aplicada a depender de cada alternativa.

A busca por esse aperfeiçoamento se dá em grande parte por meio de pesquisas que são desenvolvidas, testadas e introduzidas em um mercado que pode afetar toda a cadeia produtiva ou de uma forma mais específica planejando e encontrando as melhores condições para projetos específicos dentro dos recursos e limitações enfrentadas.

No contexto da construção metálica no Brasil, destaca-se a significativa contribuição dos galpões de uso geral, para uma considerável parcela dos empreendimentos na área. Dentro desse segmento relevante, as estruturas de um único pavimento emergem como as mais prevalentes, demandando soluções que sejam tanto economicamente viáveis quanto versáteis, capazes de abranger uma ampla variedade de vãos e atender a diversas aplicações. Essas aplicações abrangem setores diversos, como fábricas, depósitos, lojas, academias, ginásios poliesportivos, garagens, granjas, hangares, entre outros (NOGUEIRA, 2009).

De acordo com CHAVES (2007), existem diversas alternativas de sistemas estruturais que podem ser adotadas na concepção de galpões de uso geral de um único pavimento. Entre essas alternativas, destacam-se os sistemas constituídos por pórticos planos transversais, os quais são estabilizados longitudinalmente por meio de contraventamentos. Esses sistemas representam a escolha mais comum devido à sua propensão a resultar em estruturas descomplicadas, isentas de interferências, caracterizadas por uma rápida velocidade construtiva e eficiência econômica. Essas características fundamentais contribuem para a disseminação generalizada do emprego desses sistemas em galpões de um único pavimento.

Os perfis de aço formados a frio desempenham um papel significativo na indústria da construção civil, oferecendo vantagens em termos de eficiência e economia. Eles são amplamente empregados em diversas aplicações, como galpões de pequeno e médio porte, mezaninos, coberturas, edifícios de pequeno porte e habitações populares. E também, esses perfis são essenciais no contexto do método construtivo conhecido como *light steel framing*, no qual painéis são fabricados a partir de perfis de aço formados a frio (SILVA; PIERIN; PIGNATTA, 2014).

Nesse contexto, o objetivo geral deste estudo é realizar uma avaliação de desempenho de diferentes modelos estruturais comumente utilizados em galpões de uso geral. Os objetivos específicos incluem a identificação de modelos típicos para galpões industriais de um único pavimento, o dimensionamento e análise dos modelos propostos, a determinação da taxa de consumo de aço para cada modelo estrutural, a comparação entre a taxa de consumo de aço e a resposta estrutural dos modelos analisados, bem como a avaliação da eficiência das soluções estruturais analisadas.

1.1 Justificativa

A utilização de perfis conformados a frio é um assunto que vem ganhando notoriedade na construção civil, a partir de soluções práticas e seguras desde que bem aplicadas.

Dessa forma, com o crescente mercado e o interesse na construção com estruturas metálicas, a seleção criteriosa dos modelos estruturais torna-se muito importante para desenvolver soluções padronizadas. Visto assim, uma análise e simulação desses modelos estruturais, através de *softwares*, por exemplo, vêm a ser de enorme valor para a decisão sobre o modelo estrutural a ser adotado.

O aço é utilizado amplamente na construção civil, podendo ser aplicado como material principal ou compor partes específicas da obra, como galpões, coberturas e detalhes arquitetônicos. No caso dos galpões, há diversas formas de concepção dos elementos estruturais que as compõem (banzos, treliças e montantes) e, assim, diferentes tipologias podem ser empregadas. Diante disso, os perfis formados a frio podem ser aplicados de forma eficiente em galpões? Existem restrições quanto às aplicações de perfis formados à frio? Qual a melhor tipologia desse aço a ser utilizada?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal comparar e avaliar o desempenho de modelos estruturais distintos de galpões de uso geral de aço, com enfoque em perfis de aço formado a frio, atendendo as recomendações da ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio.

1.2.2 Objetivos Específicos

- realizar a concepção estrutural da estrutura metálica;
- identificar modelos típicos para galpões industriais de um só pavimento;
- analisar a estrutura e executar o dimensionamento de forma analítica e com o auxílio de *softwares*;
- determinar a taxa de consumo de aço para cada modelo estrutural;
- comparar a taxa de consumo de aço com a resposta estrutural dos modelos analisadas;
- avaliar qual a eficiência das soluções estruturais que foram analisadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Galpão Industrial de Uso Geral

De acordo com o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA, 2010), mesmo havendo diferenças nos custos específicos do aço em comparação com outros materiais, estruturas de aço fabricadas e projetadas corretamente apresentam vantagens que podem compensar o custo total do projeto, validando, assim, a escolha do aço. Um exemplo de aplicação desse tipo de construção é a confecção de galpões industriais de uso geral, que proporcionam benefícios como rapidez, agilidade e economia.

Paiva (2020) define os galpões como estruturas destinadas a cobrir áreas específicas para proteção de produtos ou instalações, quase sempre construídas no nível do solo. Essas construções possuem uma grande variedade de aplicações e podem ser construídas utilizando diferentes modelos construtivos, como concreto pré-moldado comum, concreto pré-moldado protendido, estruturas de aço com perfis laminados, estruturas de aço com perfis formados a frio e sistemas estruturais mistos.

Desse modo, Paiva (2020) também afirma que, para os modelos de estruturas metálicas, o dimensionamento dessas estruturas tem que seguir a NBR 8800 (ABNT, 2008) para aquelas feitas com perfis laminados, soldados ou mistos, enquanto as edificações utilizando perfis de aço formados a frio podem ser dimensionadas conforme as instruções da NBR 14762 (ABNT, 2010).

A elaboração do projeto de um galpão em estrutura metálica compreende a determinação do sistema estrutural, a avaliação das cargas aplicadas, a análise estrutural e o dimensionamento dos elementos componentes. Existem diferentes sistemas estruturais que podem ser aplicados com eficácia no projeto de galpões de uso geral, especialmente considerando sua concepção e as diversas finalidades para as quais o projeto é destinado (NOGUEIRA, 2009).

A aplicação do aço em estruturas de edifícios industriais oferece uma ampla variedade de opções, permitindo adaptações específicas para cada projeto. Os pórticos planos, que compõem essas estruturas, apresentam diversas formas de variação, com pilares e vigas podendo ser construídos com perfis de alma cheia ou através do uso de treliças (NETO, 2007). A Figura 1 ilustra a configuração dos galpões utilizando tanto perfis de alma cheia quanto sistemas de treliças.

Figura 1 – Exemplo de galpão treliçado e galpão composto por perfil de alma cheia.



Fonte: Centro Brasileiro de Construção em Aço (2010).

Para Chaves (2007), na fabricação de galpões em estrutura de aço, são empregados perfis laminados, perfis soldados e perfis formados a frio. Essas estruturas industriais podem ser fabricadas e montadas diretamente no local da obra ou produzidas em seções em um pátio de uma empresa especializada e, em seguida, transportadas para o local onde serão montadas.

Segundo Nogueira (2009), uma característica marcante dos galpões industriais em aço é a possibilidade de industrializar o processo de fabricação, desde que haja padronização dos elementos estruturais. Isso garante eficiência, segurança e economia. No entanto, a padronização é crucial, especialmente em galpões de médio porte com sistemas de pórticos treliçados em aço, onde a produção de milhares de elementos estruturais é necessária. Sem a padronização, a vantagem da industrialização se perde, tornando indispensável a busca pela maior uniformidade possível, sempre com foco na otimização econômica.

2.2 Sistemas Estruturais de Galpões de Uso Geral

Dada a ampla gama de concepções possíveis e os diversos propósitos a que se destinam, existe uma variedade de sistemas estruturais disponíveis para serem aplicados no projeto de galpões de uso geral. Independentemente do tipo de galpão em questão, é possível realizar algumas considerações em relação aos sistemas estruturais que integram essas edificações, conforme abordado por Nogueira (2009).

Em função das diversas configurações que podem ocorrer entre as vigas de cobertura e os pilares, é possível notar que a transmissão de momentos fletores pode ser amplificada ou reduzida, dependendo do grau de continuidade existente entre esses elementos estruturais. Essa

variação pode ser substancialmente avaliada por meio de análises computacionais, como destacado por Hanisha e Kishore (2020).

De acordo com Park et al. (2016), um ponto também significativo relacionado aos pórticos transversais está associado ao modo que ocorre a conexão entre os pilares e as fundações. Pois, os tipos de vínculos das fundações com os pilares influenciam diretamente os esforços transmitidos para as fundações e o deslocamento horizontal da estrutura.

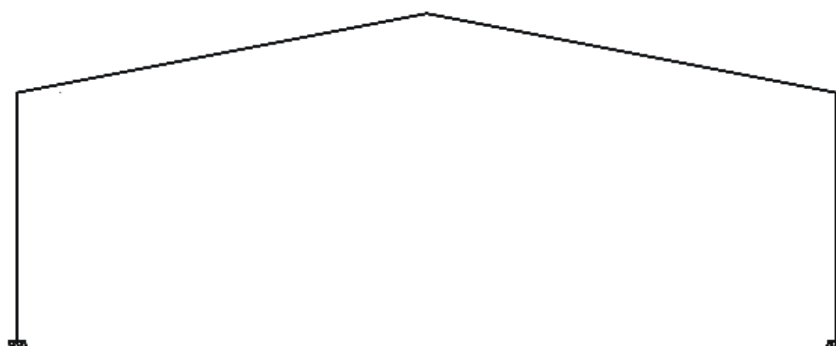
2.2.1 Pórticos de Alma Cheia

O sistema de pórtico transversal de alma cheia em galpões é altamente eficiente na fabricação, devido à sua simplicidade com poucos elementos e conexões, resultando em tempos de fabricação mais curtos em comparação com sistemas treliçados. Além disso, sua montagem também é eficaz, contribuindo para canteiros de obras organizados e tempos de montagem reduzidos, conforme indicado por CHAVES (2007).

As principais vantagens são: “limpeza” da solução estrutural, pequeno número de peças de travamento, baixo custo de limpeza e pintura, facilidade de fabricação e transporte e maior rigidez no processo de montagem quando comparado às soluções treliçadas. Normalmente, os pórticos de alma cheia são economicamente competitivos para vãos livres da ordem de 20 metros (NOGUEIRA, 2009).

A Figura 2 ilustra um esquema padrão de um pórtico de alma cheia composto por colunas e vigas de cobertura com alma cheia.

Figura 2 - Pórtico de alma cheia



Fonte: Chaves (2007).

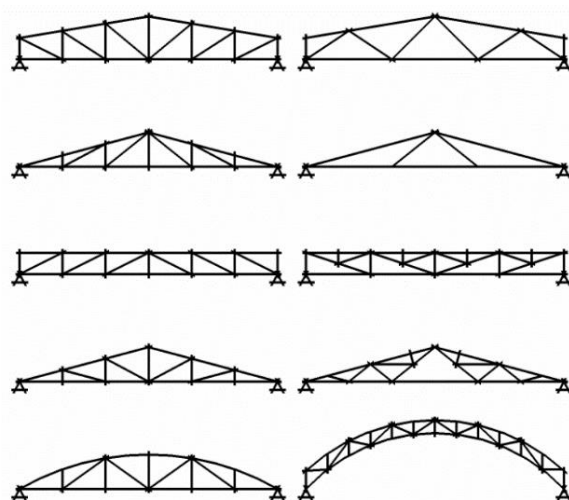
2.2.2 Pórticos Treliçados

Um pórtico transversal treliçado é constituído por colunas e vigas de cobertura treliçadas. As principais vantagens das vigas de cobertura treliçadas incluem sua eficiência estrutural, a diversidade de opções para a composição das treliças e a simplicidade dos equipamentos necessários para a fabricação, conforme destacado por CHAVES (2007).

A disposição dos elementos estruturais em uma treliça pode ser determinada com base em parâmetros econômicos, estruturais e/ou estéticos. No entanto, a seleção da configuração da treliça está intrinsecamente relacionada à análise estrutural realizada pelo engenheiro projetista. Isso ocorre porque, em cada situação, há uma solução estrutural que oferece o melhor desempenho, como ressaltado por PAIVA (2020).

Na Figura 3, são mostrados alguns dos tipos mais populares de vigas treliçadas de cobertura:

Figura 3 - Tipos de treliças para cobertura.



Fonte: NOGUEIRA (2009).

2.3 Estruturas de Estabilização Longitudinal

Segundo Nogueira (2009), a estabilidade espacial de uma estrutura de galpão de uso geral, que se refere à capacidade de manter sua integridade fora do plano da estrutura principal, conhecido como pórtico transversal, é assegurada pela incorporação de elementos de

estabilização na direção longitudinal. A fim de alcançar essa estabilização, é de suma importância a instalação de contraventamentos horizontais (localizados no plano da cobertura) e contraventamentos verticais (posicionados nas laterais do edifício).

As forças do vento nas fachadas laterais e outras forças horizontais são transferidas às fundações pelos pórticos transversais, enquanto as forças longitudinais são encaminhadas às fundações por contraventamentos horizontais e verticais. As terças na área dos contraventamentos formam uma treliça horizontal na cobertura, também suportando as telhas (CHAVES, 2007).

O contraventamento horizontal no plano da cobertura tem um papel fundamental na estabilização da estrutura, tornando os pontos de apoio das terças nos pórticos transversais imóveis, o que reduz significativamente o comprimento de flambagem do banzo superior da viga de cobertura (NOGUEIRA, 2009).

Dessa forma, Chaves (2007) afirma que para reduzir o comprimento de flambagem dos elementos do banzo inferior da viga de cobertura, pode-se utilizar um sistema de contraventamento adicional no plano do banzo inferior ou, alternativamente, dispor mãos-francesas a partir das terças.

Tanto para Chaves (2007), quanto para Nogueira (2009), o contraventamento em "X" é geralmente o mais comum e econômico. No entanto, existem várias maneiras de configurar um contraventamento para atender às demandas específicas de diferentes projetos, como, por exemplo, considerando as aberturas nas fachadas laterais.

2.4 Tipos de Aços Estruturais

De acordo com Pfeil e Pfeil (2014), na classificação apresentada, os aços são categorizados em dois grupos distintos: os aços-carbono e os aços de baixa liga. Ambos esses grupos têm a capacidade de serem submetidos a tratamento térmico com o propósito de alterar suas propriedades mecânicas.

Segundo a NBR 14762 (ABNT, 2010), a utilização de aços que não possuam uma classificação estrutural é permitida, desde que esses aços apresentem propriedades mecânicas adequadas para suportar o processo de conformação a frio. No entanto, é importante observar que no projeto não devem ser utilizados valores superiores a 180 MPa para a resistência ao escoamento (f_y) e 300 MPa para a resistência à ruptura (f_u) desses aços.

2.4.1 Aços Carbono

Conforme Pannoni (2005), o aço-carbono pode ser definido como uma composição metálica que engloba, em sua maioria, um teor de carbono variando tipicamente entre 0,008% e 2,11%, além de incluir elementos residuais que se originam durante os procedimentos de produção.

Os aços-carbono apresentam maior resistência em relação ao ferro puro, devido à presença de carbono e manganês. No entanto, essa adição de carbono também resulta em uma redução da ductilidade do material, tornando-o menos maleável e gerando desafios durante os processos de soldagem (PFEIL; PFEIL, 2014).

Usualmente em estruturas de aço, são utilizados aços com baixo teor de carbono garantindo que não exista problemas representativos na soldagem. Segundo os padrões da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da *American Society Testing and Materials* (ASTM), e das normas europeias EN, os aços mais utilizados estruturalmente são apresentados na Tabela 1 a seguir, onde o aço ASTM A36 substitui o A7, que foi aço mais utilizado nos Estados Unidos até o ano de 1960 e, os aços ASTM A307 e A325 são utilizados na composição de parafusos comuns e de alta resistência, nesta ordem (PFEIL; PFEIL, 2014).

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço-carbono.

Especificação	Teor de carbono %	Limite de escoamento f_y (MPa)	Resistência á ruptura f_u (MPa)
ABNT MR250	Baixo	250	400
ASTM A7		240	370-500
ASTM A36	0,25-0,29	250 (36 ksi)	400-500
ASTM A307	Baixo		415
ASTM A325	Médio	635 (min)	825 (min)
EN S235	Baixo	235	360

Fonte: Pfeil, Pfeil (2014).

2.4.2 Aços de Baixa Liga

Os aços de baixa liga foram concebidos pela "*United States Steel Corporation*", uma empresa dos Estados Unidos, no começo da década de 1930, com o objetivo de possibilitar a produção de vagões ferroviários mais leves. Isso era uma necessidade da indústria ferroviária norte-americana, que anteriormente fabricava esses vagões a partir de componentes de aço-carbono (OCAMPO C., 2005).

Os aços de baixa liga apresentam em sua composição quantidades relativamente reduzidas de elementos de liga, tais como cobre (Cu), cromo (Cr), fósforo (P), níquel (Ni), cuja soma total não ultrapassa 5% em peso (OCAMPO C.; MARGARIT-MATTOS; FABRIS, 2008).

De acordo com Pfeil e Pfeil (2014), esses elementos desempenham um papel fundamental na promoção e no aprimoramento de diversas propriedades mecânicas do aço. No Brasil, é comum a utilização de aços de baixa liga de alta e média resistência mecânica, caracterizados por teores elevados de carbono. O que torna esses aços especialmente vantajosos é a capacidade de serem soldados sem a necessidade de precauções especiais, graças às modificações na microestrutura que resultam na formação de grãos finos.

Na Tabela 2 a seguir são apresentadas as propriedades mecânicas de Aços de baixa liga:

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço de baixa liga.

Especificação	Principais elementos da liga	Limite de escoamento f_y (MPa)	Resistência á ruptura f_u (MPa)
ASTM 572 Gr. 50	C<0,23% Mn<1,35%	345	450
ASTM A588	C<0,17% Mn<1,2% Cu<0,50%	345	485
ASTM A992	C<0,23% MN<1,5%	345	450

Fonte: Pfeil; Pfeil (2014).

2.5 Considerações Sobre o Uso e Dimensionamento de Perfis Formado a Frio

2.5.1 O uso de perfis formado a frio

Segundo o *American Institute of Iron and Steel* - AISI (2016), os perfis de aço formados a frio são feitos de uma ou mais chapas, com espessura geralmente entre 0,4 mm e cerca de 6,4 mm, no entanto, se fabricam perfis a partir de chapas e barras com até 25 mm de espessura. No Brasil, as normas ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço a partir de perfis formados a frio e ABNT NBR 6355:2012 – Perfis estruturais de aço formado a frio – definem o perfil estrutural de aço formado a frio como “um perfil obtido por flexão, em prensa dobradeira, tiras cortadas de chapas ou bobinas, ou em série de ferramentas rotativas com

conformação contínua, de bobinas laminadas a frio ou a quente, cobertas ou não, ambas as operações devem ser realizadas com o aço em temperatura ambiente”.

A norma NBR 6355 (ABNT, 2012) também prevê todos os critérios para designação, processo, verificação e aprovação ou rejeição de perfis para séries comerciais, incluindo as características dimensionais e tolerância de deformações obtidas na fabricação. De acordo com a norma NBR 14762 (ABNT, 2010), é aconselhável que as chapas usadas na produção dos perfis sejam feitas de aço com capacidade estrutural adequada e que atendam às propriedades mecânicas necessárias para resistir ao trabalho a frio.

No Brasil, a primeira minuta da norma para perfis conformados a frio foi publicada em 1967 - NB 143/67 - Cálculo de estruturas metálicas de perfis leves - baseada na norma norte-americana AISI/62 (JAVARONI, 2015).

Os perfis de aço formados a frio oferecem vantagens significativas devido à sua capacidade de se adaptarem facilmente a formas e tamanhos específicos. Esses perfis possibilitam a criação de geometrias personalizadas para atender a requisitos específicos, permitindo a otimização das dimensões de acordo com as necessidades, resultando em economia de material (DEMSKI E MIRANDA, 2020).

Além disso, a produção desses perfis a frio é mais econômica em comparação com a fabricação de perfis laminados. Para estruturas sujeitas a cargas médias e com vãos moderados, o uso de perfis formados a frio pode reduzir o peso total da estrutura. A aplicação da resistência pós-flambagem em perfis formados a frio, quando combinada com formas e tamanhos otimizados, pode resultar em estruturas mais leves e eficientes (DEMSKI E MIRANDA, 2020).

O dimensionamento das peças estruturais de acordo com a norma NBR 14762 (ABNT, 2010) pode ser realizado por meio de três métodos distintos: o Método da Largura Efetiva (MLE), o Método da Seção Efetiva (MSE) e o Método da Resistência Direta (MRD).

2.5.2 Considerações sobre os métodos de dimensionamento de perfis formado a frio

2.5.2.1 Comportamento Estrutural de Perfis de Seção Aberta

Segundo as considerações feitas por Nogueira (2009), em relação aos perfis formados a frio de seção transversal aberta, é necessário atentar para três estados limites principais: instabilidade local, instabilidade distorcional e instabilidade global.

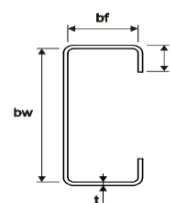
De acordo com Silva, Pierin e Pignatta (2014), as principais escolas de engenharia no Brasil conceituam a flambagem como a manifestação de um ponto de bifurcação no gráfico de força versus deslocamento de um elemento comprimido, seja ele uma barra ou uma chapa. No entanto, em elementos estruturais reais, na presença de imperfeições, esse ponto de bifurcação não ocorre. Portanto, de acordo com essa definição, a flambagem não acontece. Em termos mais simples, a flambagem é distinta da flexão composta. Em virtude de as imperfeições em estruturas de aço geralmente serem de pequena magnitude, os modos de deformação das barras de aço frequentemente assemelham-se aos modos de flambagem.

Também conforme destacado por Silva, Pierin e Pignatta (2014), quando os carregamentos não são aplicados no centro de torção da seção transversal das vigas, a torção se manifesta. É importante observar que as teorias de barras de Euler e de Timoshenko, geralmente ensinadas em cursos de Resistência dos Materiais, não abrangem adequadamente esse comportamento de barras com seção aberta.

Para obter uma compreensão inicial do potencial ocorrência do modo distorcional, Batista (2000) fornece algumas relações geométricas relacionadas à seção transversal que desempenham um papel significativo no comportamento crítico da instabilidade, como mostrado no Quadro 1 a seguir:

Quadro 1 - Influência das relações geométricas das seções tipo U enrijecido no modo crítico.

Quanto menor	Relação geométrica	Quanto maior
Modo Local	b_f / b_w	Modo Distorcional
Modo Distorcional	D / b_w	Modo Local
Modo Distorcional	b_w / t	Modo Local
Notas: b_f : largura nominal da mesa b_w : largura nominal da alma D : largura nominal do enrijecedor de borda t : espessura		



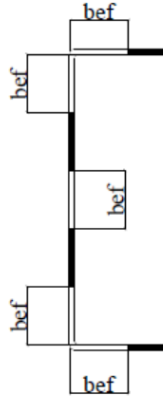
Fonte: Batista (2000).

2.5.2.2 Método das Larguras Efetivas (MLE)

De acordo com a norma NBR 14762 (ABNT, 2010), um perfil é composto por uma série de elementos, incluindo a mesa, a alma e o enrijecedor, e, portanto, cada um desses elementos é avaliado individualmente em relação à flambagem local. Como parte desse processo, é

determinada a área efetiva do perfil, conforme ilustrado na Figura 4, que é a soma das áreas de cada um dos elementos que foram analisados separadamente. Em resumo, isso permite calcular as propriedades geométricas efetivas do perfil.

Figura 4 - Seção efetiva do perfil.



Fonte: Paiva (2020).

A NBR 14762 (ABNT, 2010) aborda elementos estruturais que englobam vigas, colunas e vigas-colunas. A abordagem relacionada à flambagem global se baseia nessa classificação específica. Além disso, é importante notar que a variação das tensões é considerada linear em todos esses elementos, e os esforços analisados abrangem os tipos generalizados, incluindo força axial, flexão e esforço cortante.

A fórmula geral do MLE segundo a NBR 14762 (2010) é:

$$bef = \frac{b(1 - \frac{0,22}{\lambda p})}{\lambda p} \leq b \quad (\text{eq. 1})$$

Em que o índice de esbelteza reduzido λp é:

$$\lambda p = \frac{\frac{b}{t}}{0,95 \sqrt{\frac{KE}{\sigma}}} \quad (\text{eq. 2})$$

Com $\lambda p \leq 0,673$ tem $b_{bef} = b$

Em que:

t – espessura do elemento;

b – largura do elemento;

- E – módulo de elasticidade do aço = 20.000,00 kN/cm²;
- σ – tensão de compressão dada por: $\sigma = \rho \cdot f_y$ com ρ correspondente ao fator de redução relacionado a compressão centrada e o $\sigma = \rho_{FLT} \cdot f_y$, com ρ_{FLT} correspondente ao fator de redução relacionado a flexão simples;
- k – coeficiente de flambagem local (tabelado).

5.5.2.3 Método da Resistência direta (MRD)

O Método da Resistência Direta (MRD) tem se destacado na análise de barras sujeitas a compressão e flexão, mostrando sua eficácia. Através deste método, é possível fazer previsões dos modos de flambagem local e distorcional, fazendo uso das tensões de flambagem local elástica e das características geométricas da seção transversal bruta da barra, conforme explicado por Javaroni (2015). Este procedimento está incluso como anexo na norma NBR 14762 (2010) e oferece uma alternativa ao método tradicional da largura efetiva, o qual considera as propriedades geométricas efetivas da seção transversal.

De acordo com Nogueira (2009), o método se fundamenta na obtenção da carga de colapso do elemento por meio de uma curva de resistência que é ajustada com base em experimentos. Essa curva leva em consideração a carga de flambagem elástica do elemento, considerando a seção transversal integral do perfil, em vez de analisar suas partes de forma isolada.

Como também destacado por Nogueira (2009), o Método da Resistência Direta (MRD) difere do método das larguras efetivas em vários aspectos cruciais. O MRD se destaca por considerar a interação entre as diferentes chapas que compõem o perfil, um aspecto que não é abordado no método das larguras efetivas, o qual avalia cada chapa de forma isolada. Além disso, o MRD baseia sua análise nas propriedades geométricas da seção bruta, eliminando a necessidade de recalculá-las. Uma vantagem substancial do MRD é sua capacidade explícita de abordar o modo distorcional.

De acordo com Lindner (2001, apud PRAVIA, 2005), a análise conjunta dos elementos que constituem o perfil somente seria viável quando se trata de elementos submetidos individualmente à compressão e à flexão. No entanto, para situações que envolvem solicitações combinadas, é possível aplicar as expressões de interação tradicionalmente empregadas nas normas.

2.6 Ação do Vento nas Estruturas Metálicas

Para Makowski (2004), na contemporaneidade, em virtude do progresso na tecnologia dos materiais e das inovações nos projetos estruturais, as coberturas apresentam uma tendência à redução de peso, aumento da flexibilidade e à expansão de vãos cada vez mais amplos. Essas transformações têm como resultado a ampliação da sensibilidade dessas estruturas às influências do vento, tornando, por conseguinte, essencial um aprofundamento do conhecimento relativo às cargas de vento em tal tipologia de construção.

Como observado por Demski e Miranda (2020), a ação do vento é um dos fatores mais importantes a serem considerados em estruturas metálicas, pois sua negligência pode levar ao colapso da estrutura. A Norma Brasileira NBR 6123 (ABNT, 2023) estabelece as diretrizes para o cálculo de edifícios, levando em conta as forças causadas pelo vento. Essas considerações são essenciais para garantir a segurança e estabilidade da estrutura.

Segundo Nogueira (2009), a predominância de acidentes ocorre em construções leves, sobretudo em estruturas com grandes vãos livres, como hangares, pavilhões de exposição, e coberturas de estádios, entre outros exemplos similares. O incidente ilustrado na Figura 5 é um exemplar que resultou da influência do vento. Além dos danos materiais associados, tais ocorrências também representam riscos para a segurança humana, comprometendo a integridade das pessoas envolvidas.

Figura 5 - Quadra poliesportiva em Lavras-MG destruída pela ação do vento.



Fonte: www.jornaldelavras.com.br (2011).

Os incidentes tendem a ocorrer em edificações com execução deficiente, destacando-se exemplos como telhas leves inadequadamente fixadas, construção de paredes de baixa qualidade, falta de contraventamentos em estruturas, utilização de concreto de qualidade inferior, dimensionamento inadequado e ancoragem deficientes em tesouras de telhado, entre outros problemas similares. Contudo, ao estritamente aderir às normas pertinentes que regulam a resistência às cargas de vento e o dimensionamento estrutural, a probabilidade de ocorrência de acidentes relacionados à ação do vento é substancialmente reduzida, conforme Blessmann (1986).

Segundo Nogueira (2009), a velocidade do vento desempenha um papel significativo na indução de diversos efeitos prejudiciais às edificações. É de particular relevância para a engenharia estrutural o estudo dos ventos de maior intensidade. Além disso, fatores como a rugosidade do terreno e a presença de obstáculos naturais e artificiais constituem elementos de consideração essenciais para sua determinação.

2.7 Projeto Estrutural e Normas

Durante a elaboração do projeto estrutural, é essencial assegurar a segurança da estrutura, evitando qualquer possibilidade de colapso. Além disso, o projeto também deve garantir um bom desempenho, prevenindo grandes deslocamentos, vibrações indesejáveis e danos localizados.

O propósito das normas de projetos consiste em assegurar a integridade das estruturas erigidas dentro da esfera de sua aplicação. A responsabilidade do engenheiro calculista, nesse contexto, recai sobre a concepção de uma estrutura que satisfaça os requisitos mínimos estabelecidos pelas normas em relação à segurança, ao mesmo tempo em que seja viável em termos de eficiência temporal e econômica. É imperativo que as normas contemplem a consideração da praticidade e da economia, embora sua principal missão permaneça a garantia da segurança, como apontado por Castro (1997).

Conforme mencionado por Pfeil e Pfeil (2014), um projeto estrutural pode ser dividido em três etapas distintas. Inicialmente, tem-se o anteprojeto ou projeto básico, no qual são definidos os materiais a serem utilizados, o tipo de sistema estrutural e o sistema construtivo. Em seguida, ocorre o dimensionamento, que envolve o cálculo minucioso dos sistemas e elementos previamente definidos, garantindo a segurança e o desempenho adequados da

estrutura. Por fim, o projeto estrutural é concluído na fase de detalhamento, na qual são elaborados os desenhos técnicos, acompanhados das especificações necessárias dos componentes.

As normas, como já mencionadas anteriormente no presente trabalho, que regem o dimensionamento de estruturas de aço incluem a ABNT NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Essa norma estabelece procedimentos de cálculos e verificações específicos para perfis formados a frio. Além disso, a norma ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios é complementada pela NBR 14762:2010 e trata do uso de perfis laminados, soldados e mistos em estruturas de aço. Ambas as normas são essenciais para garantir a segurança e a conformidade dos projetos de estruturas de aço.

2.8 Dimensionamento dos Elementos de Aço

A resposta ao carregamento de elementos estruturais é suscetível a variações de comportamento. Cada categoria de elementos estruturais demanda uma análise detalhada das tensões presentes, das condições de dimensionamento e, finalmente, requer a seleção da seção mais apropriada para a aplicação em questão. O processo de dimensionamento adere rigorosamente às diretrizes estabelecidas pela NBR 14762:2010.

No *software Scia Engineer*, são executados todos os cálculos para verificar a resistência de um perfil dobrado, incluindo tração, compressão, força cortante, flexão, flexocompressão, flexotorção e esforços combinados, utilizando o método da largura efetiva

2.8.1 Elementos Tractionados

De acordo com o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA, 2014), mesmo havendo diferenças nos custos específicos do aço em comparação com outros materiais, estruturas de aço fabricadas e projetadas corretamente apresentam vantagens que podem compensar o custo total do projeto, validando, assim, a escolha do aço. Um exemplo de aplicação desse tipo de construção é a confecção de galpões industriais de uso geral, que proporcionam benefícios como rapidez, agilidade e economia.

Ainda com base no CBCA (2014) no processo de dimensionamento para tração de perfis formados a frio, são conduzidas duas verificações distintas. A primeira delas refere-se à análise do escoamento da seção bruta, cujo propósito é avaliar se a força resistente, considerando a resistência ao escoamento, supera os esforços solicitantes. A segunda verificação, por sua vez, concentra-se na capacidade última da seção efetiva. Esta etapa é realizada na área das conexões estruturais, onde pode ocorrer uma redução na seção transversal devido à presença de furos destinados à instalação de parafusos ou outros elementos de fixação. Ademais, é imperativo examinar a capacidade última da seção efetiva em regiões que não se relacionam com as conexões, ou seja, em áreas onde há diminuição na seção, mas que não estejam diretamente associadas à junção de elementos estruturais.

Pelo item 9.6.2 da norma NBR 14762 (ABNT, 2010), a força normal de tração resistente de cálculo, representada como $N_{t,Rd}$, deve ser selecionada como o valor mínimo entre as duas equações a seguir, garantindo sempre que seja maior ou igual à força normal de tração solicitante de cálculo, denotada como N_{td} .

$$N_{t,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma} \quad (\gamma = 1,10) \quad (\text{eq. 3})$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_{n0} f_u}{\gamma} \quad (\gamma = 1,35) \quad (\text{eq. 4})$$

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t A_n f_u}{\gamma} \quad (\gamma = 1,65) \quad (\text{eq. 5})$$

Em que:

$N_{t,Rd}$ - força axial de tração;

A - área bruta da seção transversal da barra;

A_n - área líquida efetiva da seção transversal da barra;

F_y - resistência ao escoamento do aço;

F_u - resistência à ruptura do aço;

C_t - coeficiente de redução da área líquida.

2.8.2 Elementos Comprimidos

Peças sujeitas à compressão axial são comumente identificadas em diversos contextos, incluindo componentes de treliça, sistemas de treliçamento e pilares integrantes de estruturas de edifícios com sistemas de contraventamento dotados de ligações rotuladas.

Conforme destacado por Carvalho et al. (2004), as barras submetidas a cargas de compressão estão sujeitas a potenciais modos de colapso, incluindo o escoamento, a flambagem local, a flambagem global e a flambagem por distorção. É importante ressaltar que o aumento da esbeltez de uma barra resulta na redução de sua capacidade de resistir às solicitações aplicadas. Portanto, a tensão máxima que pode atuar em um elemento de chapa submetido à compressão é a chamada "tensão crítica de flambagem", e não mais a tensão de escoamento do aço, tornando-se, assim, um parâmetro crítico a ser considerado na análise estrutural.

Conforme especificado na NBR 14762 (ABNT, 2010), a força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, deve ser determinada como o valor mínimo calculado entre:

- 1 – Força axial resistente de cálculo devido à instabilidade da barra por flexão, por torção ou por flexotorção.
- 2 - Força axial resistente de cálculo devido à instabilidade por distorção da seção transversal.

No processo de seleção dos perfis a serem empregados no projeto, é essencial manter a devida atenção aos limites geométricos estabelecidos pela norma, com destaque para as relações máximas entre largura e espessura, conforme estipulado no item 9.1.2 da NBR 14762 (ABNT, 2010). Apresentam-se na Tabela 3 alguns dos limites impostos pela norma quanto aos valores máximos da relação largura-espessura:

Tabela 3 - Valores máximos da relação largura-espessura para elementos comprimidos.

Caso a ser analisado	Valor máximo da relação largura-espessura ^a
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma ou mesa e a outra a enrijecedor de borda simples	$(b/t)_{\max} = 60$ ^b
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma e a outra a mesa ou outro tipo de enrijecedor de borda com $I_s \geq I_a$ conforme 9.2.3	$(b/t)_{\max} = 90$
Alma de perfis U não enrijecidos sujeita à compressão uniforme	$(b/t)_{\max} = 90$
Elemento comprimido com ambas as bordas vinculadas a elementos AA	$(b/t)_{\max} = 500$ ^c
Elemento comprimido AL ou AA com enrijecedor de borda tendo $I_s < I_a$ conforme 9.2.3	$(b/t)_{\max} = 60$ ^b
Alma de vigas sem enrijecedores transversais	$(b/t)_{\max} = 200$
Alma de vigas com enrijecedores transversais apenas nos apoios e satisfazendo as exigências de 9.5.1	$(b/t)_{\max} = 260$
Alma de vigas com enrijecedores transversais nos apoios e intermediários, satisfazendo as exigências de 9.5.1	$(b/t)_{\max} = 300$
^a b é a largura do elemento; t é a espessura. ^b Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\max} = 30$. ^c Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\max} = 250$.	

Fonte: NBR 14762 (2010).

A força normal de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, é determinada de acordo com o procedimento descrito no item 9.7.2 da norma NBR 14762 (ABNT, 2010), devendo ser igual ou superior à força normal de compressão solicitante de cálculo, N_{cd} . A equação para o cálculo da força normal de compressão resistente de cálculo é mostrada a seguir:

$$N_{c,Rd} = \frac{(x A_{ef} f_y)}{\gamma} \quad (\gamma = 1,20) \quad (\text{eq. 5})$$

Em que:

$N_{c,Rd}$ - força axial de compressão;

A_{ef} - área efetiva da seção transversal da barra;

F_y - resistência ao escoamento do aço;

X - fator de redução da força axial de compressão resistente.

3 METODOLOGIA

O principal propósito deste trabalho reside na avaliação do desempenho de alternativas estruturais para galpões industriais de um único pavimento, caracterizados por sua leveza e pela composição de perfis de aço formados a frio. A pesquisa visa a investigação dos sistemas estruturais mais frequentemente encontrados em tais construções, visando possibilitar uma comparação entre o consumo de aço e as reações verticais e horizontais resultantes.

Dentro do contexto dos galpões industriais leves, há uma ampla variedade de atributos que podem ser ajustados para a avaliação das soluções estruturais. Contudo, devido à exigência de executar todas as etapas de um projeto estrutural (avaliação de cargas, análise e dimensionamento) para calcular a taxa de consumo de aço de cada modelo, é necessário pôr um limite no número de cenários analisados.

Portanto, a metodologia da pesquisa terá como base os trabalhos de Chaves (2007) e Nogueira (2009), pois a partir de suas pesquisas se pode estruturar a concepção do projeto, como os parâmetros a serem analisados, as tipologias dos pórticos, ações, análises e dimensionamento, porém, fazendo uso do *software Scia Engineer*.

3.1 Variação de Parâmetros

A seleção de parâmetros para a condução deste estudo sobre galpões industriais de um único pavimento envolve a análise de várias características que desempenham um papel direto no comportamento estrutural, tais como:

- tipologia da estrutura;
- vão livre da estrutura;
- inclinação da cobertura;
- tipo de vinculação;
- variação na magnitude das cargas;
- relação entre a altura no meio do vão (flecha) e o vão livre da estrutura;
- distância entre os pórticos planos;
- altura da coluna.

Cada um desses parâmetros exerce uma influência variável no consumo de aço e na resposta estrutural. Portanto, uma avaliação mais abrangente exigiria a análise de um maior número de modelos estruturais para determinar o impacto de cada uma de suas particularidades.

Neste trabalho específico, optou-se por focar na avaliação apenas da influência das seguintes características: tipologia da estrutura; vão livre da estrutura.

Pois, segundo os autores Chaves e Nogueira, são as que mais impactam diretamente na taxa de consumo de aço. Para as demais características de projeto, foram adotados valores típicos encontrados em galpões industriais de um único pavimento, como:

- distância entre os pilares - 5 metros
- um comprimento total do galpão - 50 metros
- inclinação - 10%
- altura dos pilares - 6 metros

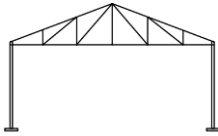
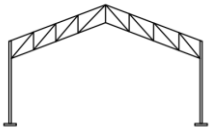

Como também mencionado pelos autores Chaves e Nogueira, dado que a distância entre os pórticos e a magnitude das cargas permanecem invariáveis em todos os modelos do estudo, pode-se inferir que os elementos estruturais secundários, como terças, travessas, contraventamentos, e outros, são idênticos em todos os cenários, não desempenhando um papel significativo na determinação da taxa de consumo de aço para as diversas tipologias.

As tipologias estruturais adotadas, para o estudo do desempenho das soluções estruturais para galpões de uso geral, foram três:

- BP – Pórtico com treliça de banzos paralelos;
- TP – Pórtico com treliça trapezoidal;
- TT – Pórtico com treliça triangular.

Tendo isso em vista, foram escolhidos os tamanhos de galpões de médio porte, sendo adotado vãos livres de 10, 15 e 20 metros, como mostrado na Quadro 2 à seguir:

Quadro 2 - Tipologias de pórticos considerados no estudo.

Tipologia	Vão Livre (m)	Simbologia
TT 	10	TT-10
	15	TT-15
	20	TT-20
BP 	10	BP-10
	15	BP-15
	20	BP-20
TP 	10	TP-10
	15	TP-15
	20	TP-20

Fonte: Autor (2024).

Mantendo a inclinação de 10%, estabelece-se uma relação de $L/10$ para a flecha da viga de cobertura nos modelos com treliça de banzos paralelos (BP) e treliça trapezoidal (TP). Essa medida visa a manter as inércias equivalentes das seções transversais semelhantes no ponto médio do vão entre os diferentes tipos de pórticos.

3.2 Definição dos Modelos

Com base nos critérios de configuração dos pórticos transversais mencionados anteriormente, neste ponto, estabelece as particularidades geométricas de cada modelo.

3.2.1 Pórticos com Treliça de Banzos Paralelos

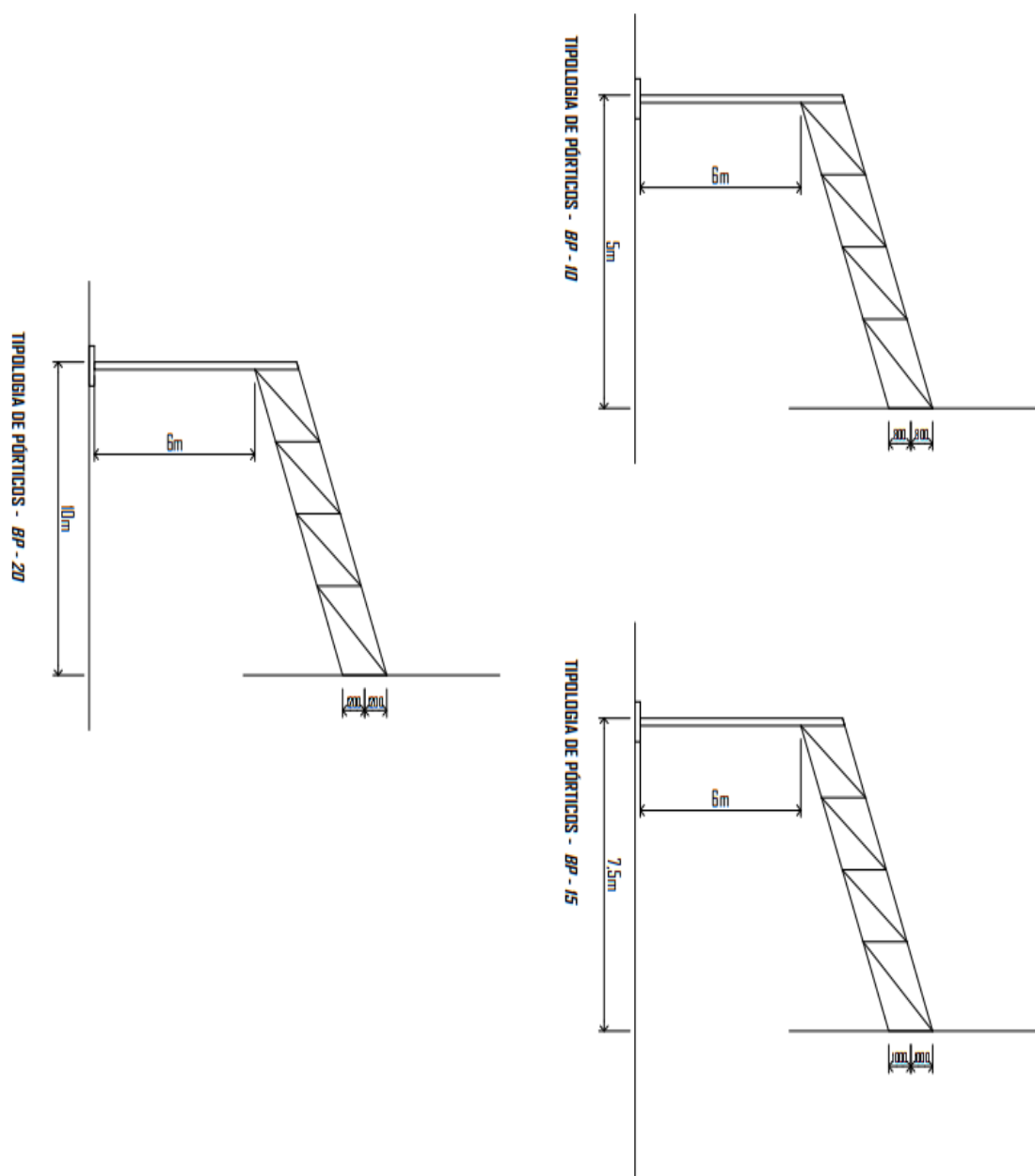
Na Figura 6, é apresentado um esquema típico de um pórtico com treliça de banzos paralelos. As colunas são engastadas na sua base, e a conexão dos banzos da treliça com a coluna é rotulada. Os elementos das diagonais e montantes são rotulados nas suas extremidades.

Fonte: Autor (2024).

Nesses modelos, assume-se que a distância entre os banzos é igual à metade da altura no ponto central do vão, o que equivale a metade da flecha da treliça.

Na Figura 7, são ilustrados os três modelos de pórticos com treliça de banzos paralelos, com os vãos já definidos no estudo (10, 15 e 20 metros).

Figura 7 - Variação dos pórticos com treliça em banzos paralelos (BP).



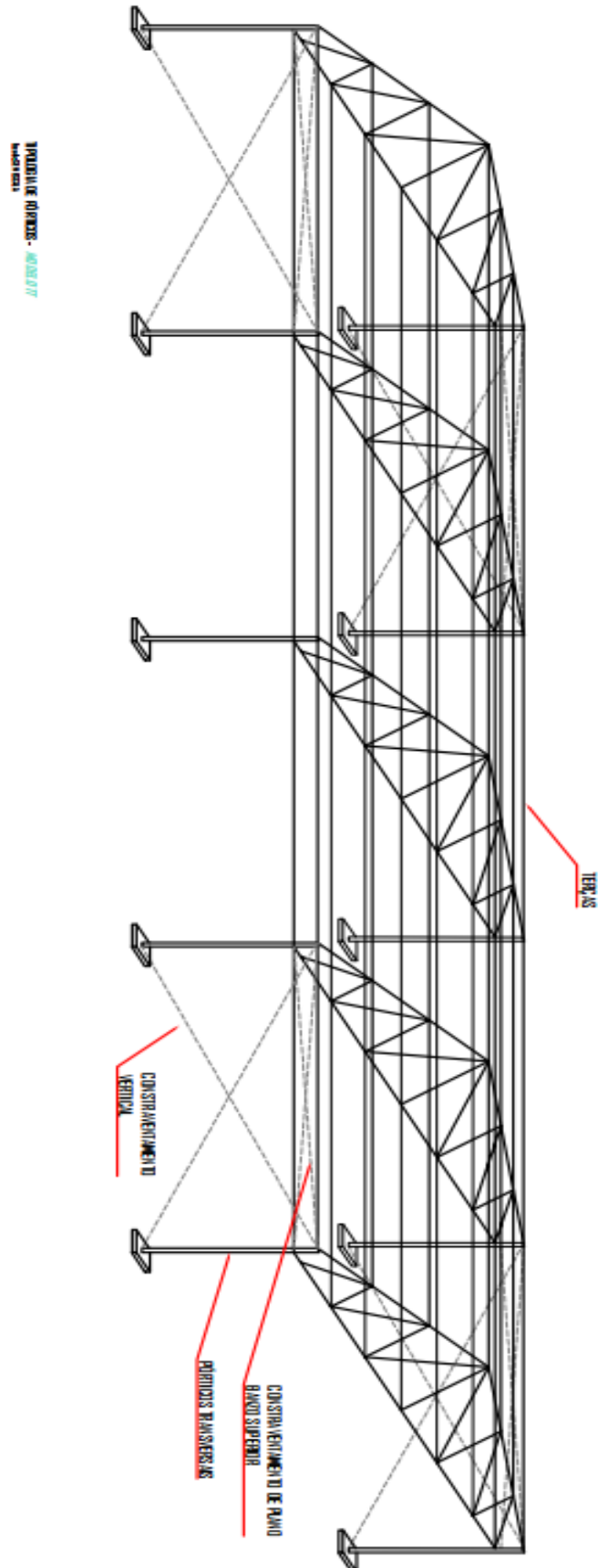
Fonte: Autor (2024).

3.2.2 Pórticos com Treliça Trapezoidal

Na Figura 8, é apresentado um esquema geral de um galpão industrial composto por pórticos com treliça trapezoidal.

O sistema estrutural adotado para esses modelos segue os mesmos princípios de vinculação usados nos modelos de pórticos com treliça de banzos paralelos. Isso implica colunas com apoio engastado na base, conexão rotulada entre os banzos da treliça e a coluna, e as extremidades das diagonais e montantes são rotuladas.

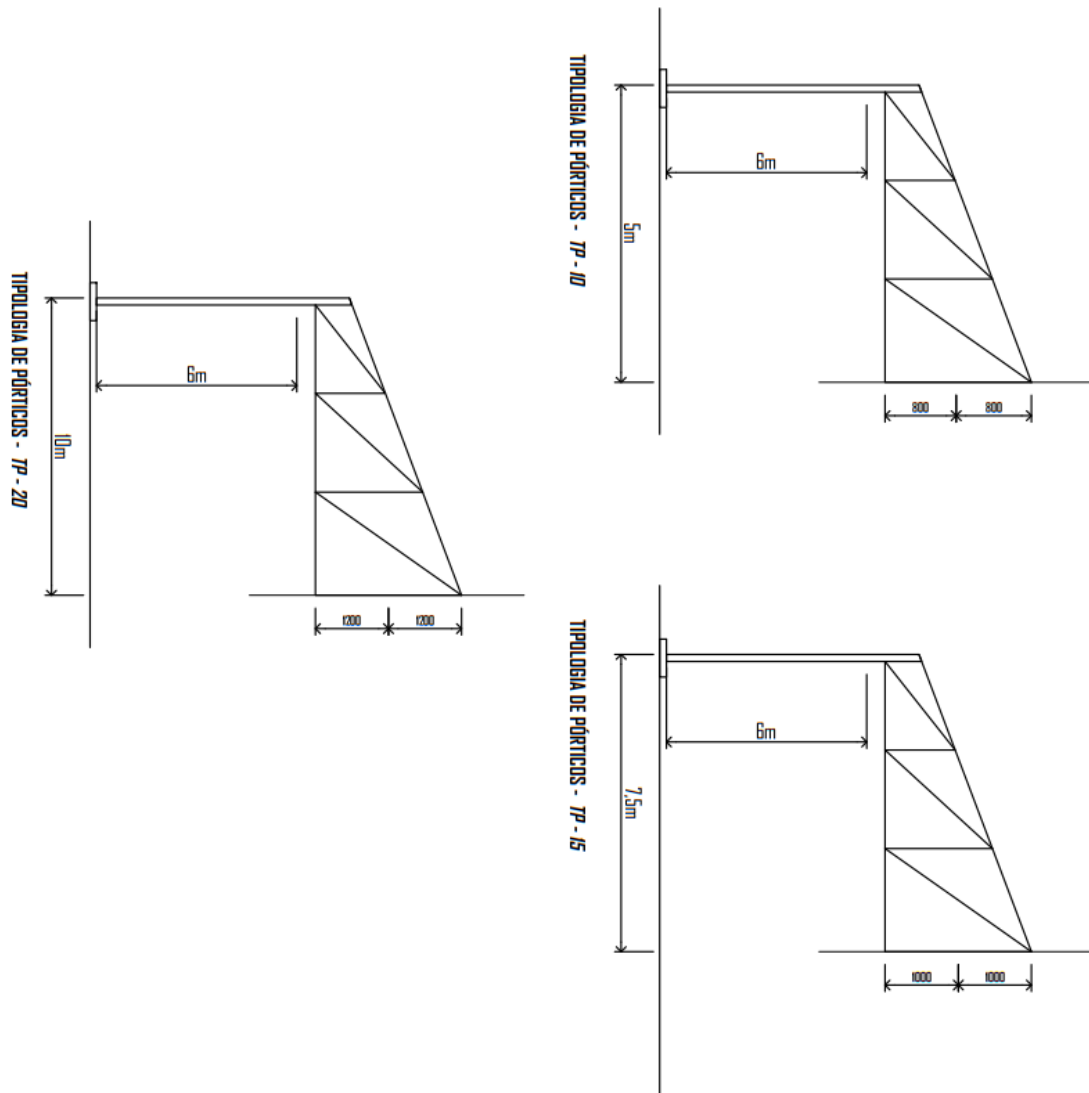
Figura 8 - Esquema de um galpão industrial formado por pórticos de com treliça trapezoidal.



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 9, são ilustrados os três modelos de pórticos com treliça trapezoidal, com os vãos já definidos no estudo (10, 15 e 20 metros).

Figura 9 - Variação dos pórticos com treliça trapezoidal (TP).

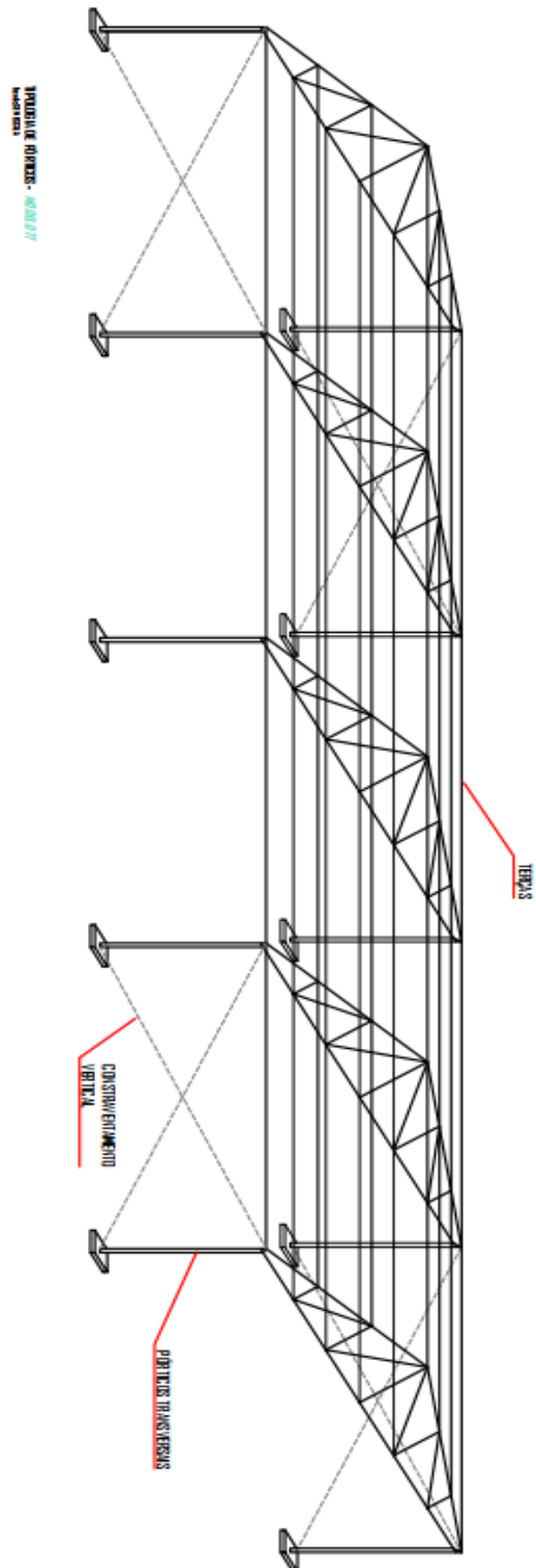


Fonte: Autor (2024).

3.2.3 Pórticos com Treliça Triangular

No último conjunto de modelos abordados neste estudo paramétrico, tem-se o pórtico com treliça triangular. Na Figura 10, é apresentado um esquema geral de um galpão industrial formado por pórticos com treliça triangular.

Figura 10 - Esquema de um galpão industrial formado por pórticos de com treliça triangular.

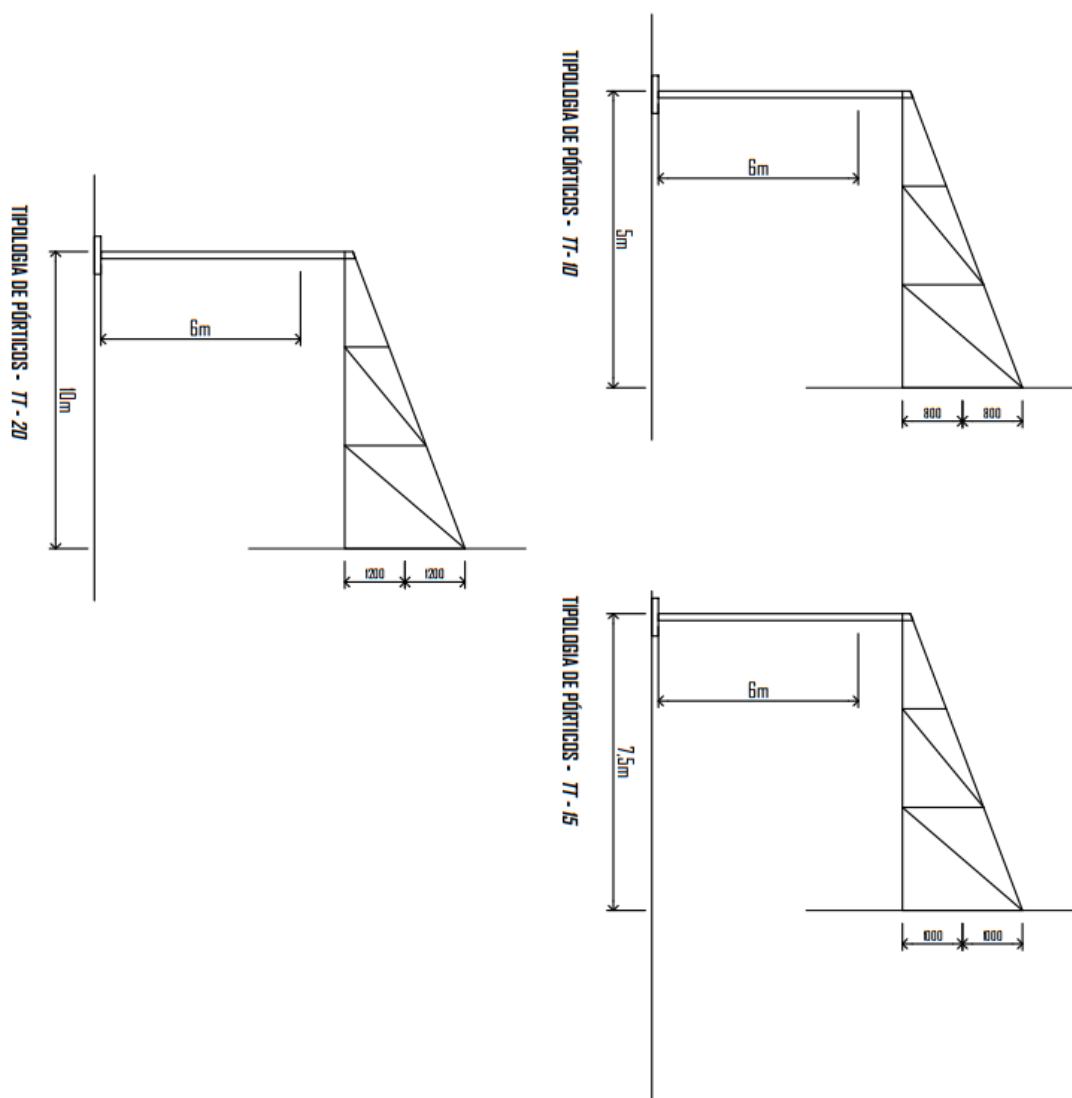


Fonte: Autor (2024).

No sistema estrutural do pórtico com treliça triangular, a conexão entre a viga de cobertura e a coluna é flexível, as barras que compõem a treliça têm suas extremidades rotuladas, e as colunas possuem apoio fixo na base.

Na figura 11, são ilustrados os três modelos de pórticos com treliça triangular, com os vãos já definidos no estudo (10, 15 e 20 metros).

Figura 11 - Variação dos pórticos com treliça triangular (TT).



Fonte: Autor (2024).

3.3 Bases para Análise e Dimensionamento

Seguindo os trabalhos de Chaves (2007) e Nogueira (2009), o presente estudo paramétrico se concentra na avaliação dos pórticos transversais das diferentes tipologias propostas, com enfoque nos modelos de cobertura propostos e levando em consideração que os elementos estruturais secundários, como terças, travessas, contraventamentos, entre outros, são idênticos em todas as tipologias, optou-se por utilizar modelos de pórticos planos para analisar o comportamento estrutural. Devido à natureza da disposição estrutural típica de galpões industriais leves, caracterizada pela repetição regular de pórticos planos e estabilização longitudinal, a análise de pórticos planos é uma abordagem comumente empregada no projeto desses edifícios.

A avaliação das ações exercidas sobre os pórticos transversais foi realizada de acordo com as normas NBR 8800 (ABNT, 2024), NBR 14762 (ABNT, 2010) e NBR 6123 (ABNT, 2023). Para calcular as forças devidas ao vento nos galpões analisados, foram usados os programas Ciclone elaborado pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP e o programa Visual Ventos elaborado pela Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo – UPF.

Para análise estrutural dos modelos propostos, foi utilizado o aplicativo *Scia Engineer*, da empresa *Nemetschek Scia*.

3.4 Ações

Com base na NBR 8800 (ABNT, 2008), as ações atuantes nos modelos foram estabelecidas.

a) Ações permanentes (G)

No contexto de galpões industriais leves, as cargas permanentes correspondem ao peso próprio dos componentes da estrutura e dos materiais que a compõem. No *software Scia Engineer*, o peso próprio dos elementos estruturais do pórtico transversal é calculado automaticamente, enquanto as outras cargas permanentes devem ser inseridas

separadamente. Para todos os modelos, foi considerada uma carga permanente de 0,15 kN/m², levando em consideração o peso próprio das telhas (telha trapezoidal simples de aço galvanizado), terças e outros elementos secundários da cobertura, como o contraventamento horizontal em forma de x e os travamentos.

b) Ações Variáveis

As ações variáveis se caracterizam por seus valores que demonstram variações consideráveis ao longo da vida útil da construção. Em relação aos galpões industriais de estrutura leve, as ações variáveis a serem levadas em consideração incluem a sobrecarga de cobertura e a ação do vento.

3.4.1 Sobrecarga de Cobertura (*Q*)

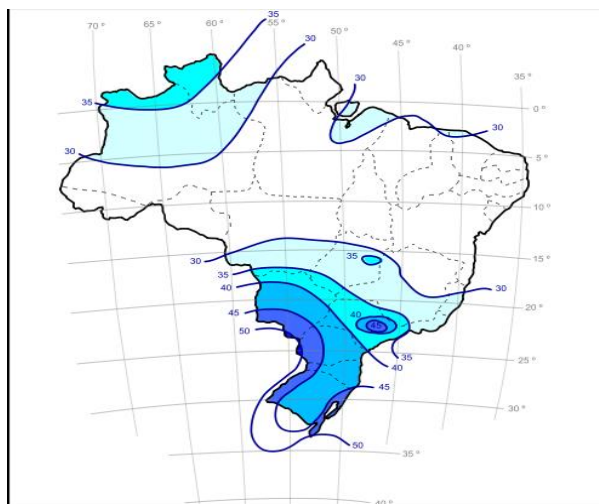
Conforme mencionado por BELLEI (2006), em relação a galpões de médio e pequeno porte, localizados em áreas que não sofrem acúmulo significativo de poeira, é possível adotar uma sobrecarga de cobertura de 0,15 kN/m². De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), para as coberturas convencionais, na ausência de especificações mais rigorosas, é recomendável prever uma sobrecarga mínima de 0,25 kN/m². De maneira similar às cargas permanentes, a sobrecarga de cobertura será aplicada nos nós onde as terças estão apoiadas.

3.4.2 Vento

A análise do regime de vento aplicada aos galpões estudados neste projeto seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 6123 (ABNT, 1988). Foi assumida uma condição de vento uniforme para todos os galpões, o que resultou na utilização de uma única velocidade básica de vento em todos os modelos.

No processo de avaliação das forças resultantes da ação do vento, foi adotada uma velocidade básica V_0 de 30 metros por segundo (m/s), que é a velocidade para o estado do Piauí, local do referente trabalho. Essa escolha é evidenciada pela área sombreada na Figura 12. Essa decisão torna a presente pesquisa representativa para os engenheiros civis e estudantes de engenharia civil do estado.

Figura 12 - Delimitação da área abrangida pelo estudo paramétrico nas Isopletas de de velocidade básica V_0 (m/s).



Fonte: Ciclone – EECS/USP (2024).

Além disso, assumiu-se que os galpões seriam instalados em áreas planas ou com suave inclinação topográfica (S1), caracterizadas por uma ausência de obstáculos significativos (S2), tais como árvores e edificações de pequena altura (com a altura média da parte superior dos obstáculos não excedendo 1 metro) e também como uma edificação para indústria com alto fator de ocupação (S3). Por fim, foi pressuposto que as principais aberturas dos galpões estariam fechadas em condições críticas de vento, o que permitiu a consideração de que as quatro faces seriam igualmente impermeáveis.

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

- Velocidade Básica - $V_0 = 30 \text{ m/s}$
- Fator Topográfico - $S_1 = 1,0$
- Fator de Rugosidade - $S_2 = 0,96$
- Fator Estatístico - $S_3 = 1,00$

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

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 = 28,8 \text{ m/s}$$

$$q = 0,613 V_k^2 = 508,45 \text{ N/m}^2 = 0,51 \text{ kN/m}^2$$

3.4.2.1 Estudo de Vento Típicos para Galpão em Duas Águas

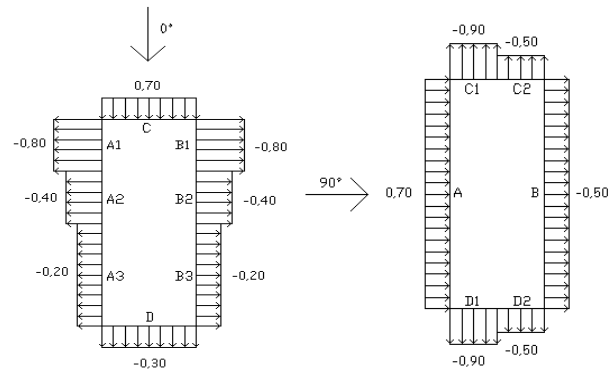
Por simplificação, será mostrado apenas o estudo para o vão livre de 20 metros, visto que, como são 9 modelos, seria uma grande quantidade de dados a serem mostrados.

a) Características

- Galpão em duas águas
- Vão livre - 20 metros
- Distância entre pórticos transversais - 5 metros
- Altura do pilar - 6 metros
- Inclinação - 10%
- Comprimento - 50 metros

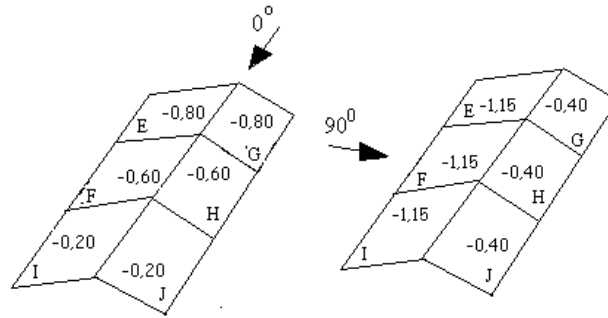
b) Coeficientes de Forma Externos

Figura 13 - Coeficientes de forma externos para as paredes.



Fonte: Autor (2024).

Figura 14 - Coeficientes de forma externos para telhado em duas águas.



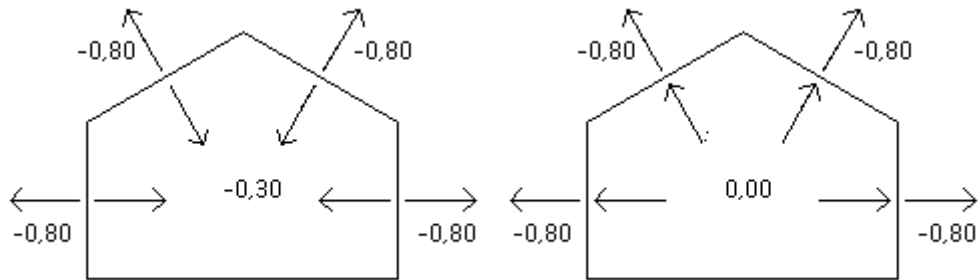
Fonte: Autor (2024).

c) Coeficientes de Pressão Interna

Supõe-se que o galpão apresenta as quatro faces com igual permeabilidade, com um coeficiente de permeabilidade, representado por C_{pi} , igual a -0,3 ou 0 (optando-se pelo valor que representar a condição mais desfavorável).

d) Sobreposição dos Coeficientes de Forma e de Pressão

Figura 15 - Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão para vento longitudinal ($W0^\circ$).



Fonte: Autor (2024).

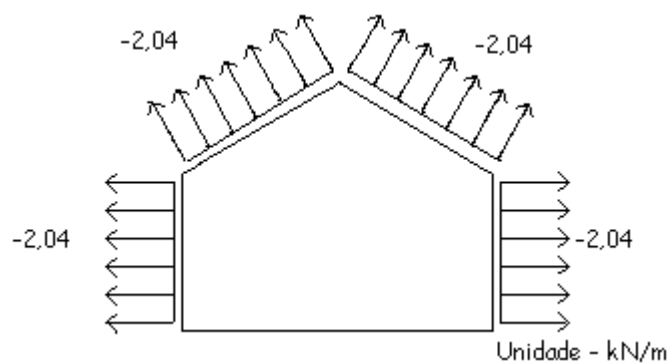
Figura 16 - Sobreposição dos coeficientes de forma e de pressão para vento transversal ($W90^\circ$).



Fonte: Autor (2024).

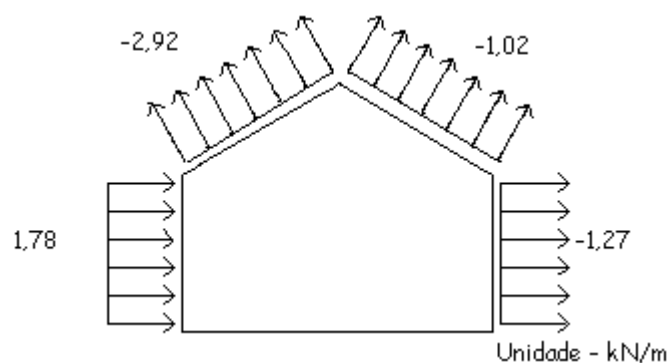
e) Casos de Carga Críticos

Figura 17 - Caso de carga para vento longitudinal ($W0^\circ$) (kN/m^2).



Fonte: Autor (2024).

Figura 18 - Caso de carga para vento transversal ($W90^\circ$) (kN/m^2),



Fonte: Autor (2024).

3.5 Combinação de Ações

O carregamento exercido sobre uma estrutura deriva da combinação de várias ações que apresentam a probabilidade de ocorrer simultaneamente durante um período de tempo definido.

A norma NBR 8800 (ABNT, 2008), estabelece diretrizes para a combinação das ações nos estados limites últimos e de serviço de uma estrutura de aço, visando a identificação dos efeitos mais críticos sobre a mesma.

Neste estudo serão consideradas as seguintes combinações de ações, também com base nos estudos de Chaves (2007) e Nogueira (2009):

- Combinação 01 - $1,25 \times G$ (peso próprio) + $1,5 \times Q$ (sobrecarga)
- Combinação 02 - $1,00 \times G$ (peso próprio) + $1,4 \times V0^\circ$ (vento longitudinal)

- Combinação 03 - $1,00 \times G$ (peso próprio) + $1,4 \times V_{90^\circ}$ (vento transversal)

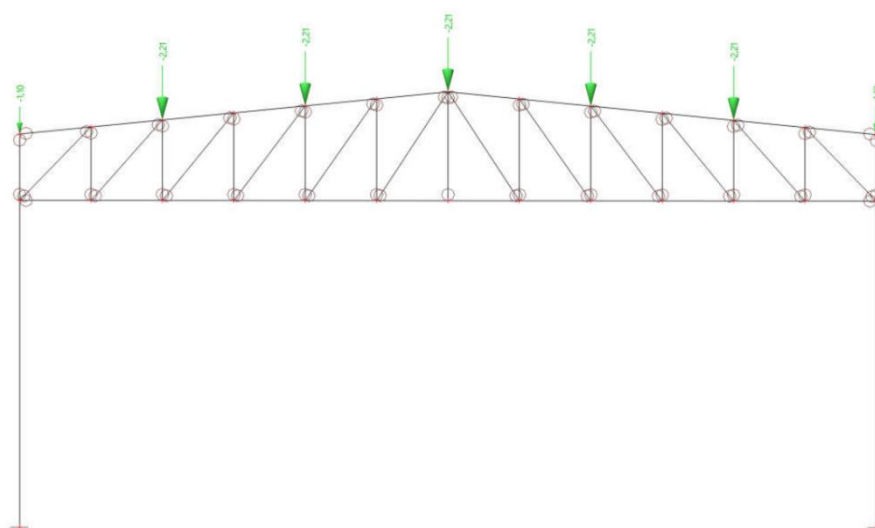
3.6 Análise e Dimensionamento dos Modelos Estruturais

Com o intuito de exemplificar o trabalho realizado para todas as tipologias de pórtico transversal considerados no estudo, serão apresentados os casos de carga, as vinculações e alguns resultados da análise estrutural de um modelo de pórtico com treliça trapezoidal (TP) com vão livre de 15 metros.

Neste modelo, os banzos superiores e inferiores são compostos por perfis em forma de U, os montantes e diagonais são constituídos por duplas cantoneiras, e as colunas são formadas por perfis soldados do tipo CS. Tal arranjo, tomado como base a partir de outros trabalhos pesquisados que trazem comumente esse tipo de concepção.

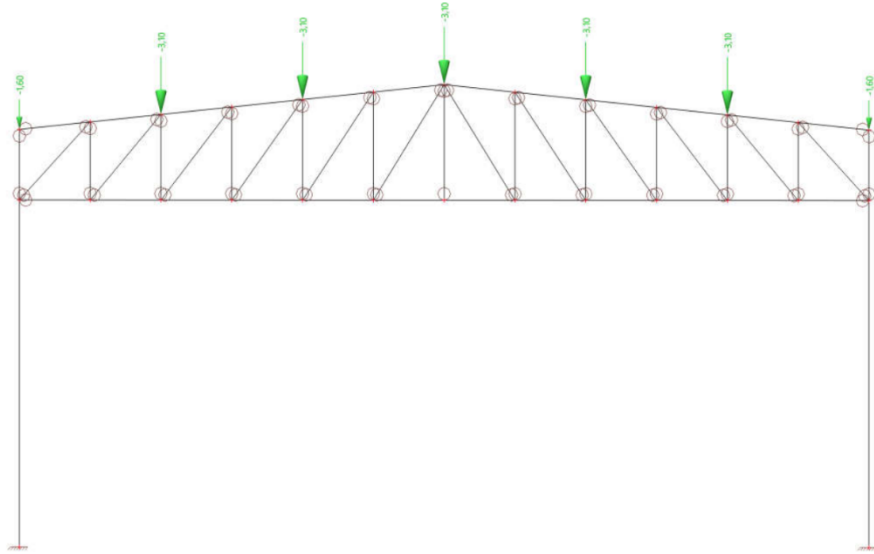
As Figuras 19 e 20 ilustram a aplicação das cargas provenientes do peso próprio e da sobrecarga de cobertura no modelo estrutural.

Figura 19 - Ações provenientes do peso próprio de cobertura (G) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 15 metros.



Fonte: Autor (2024).

Figura 20 - Ações provenientes do peso próprio de cobertura (G) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 15 metros.

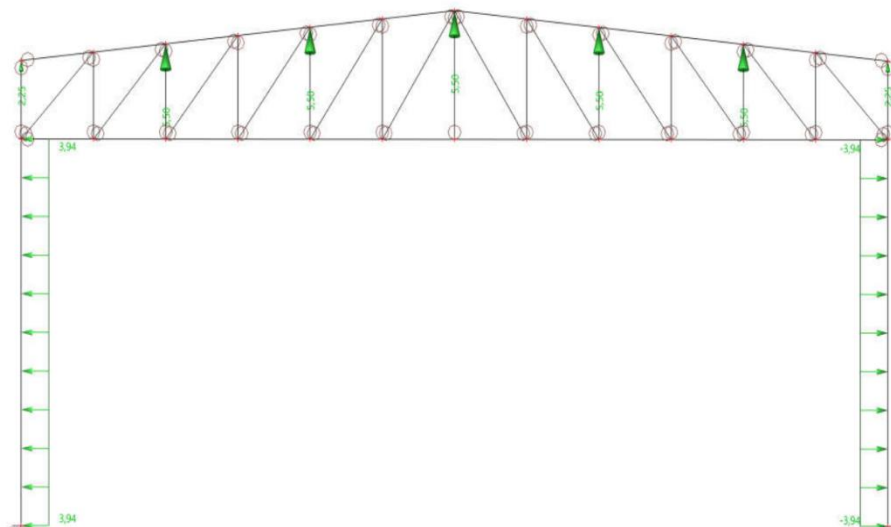


Fonte: Autor (2024).

Nas Figuras 21 e 22, são indicadas as ações devidas ao vento longitudinal ($W0^\circ$) e ao vento transversal ($W90^\circ$), respectivamente.

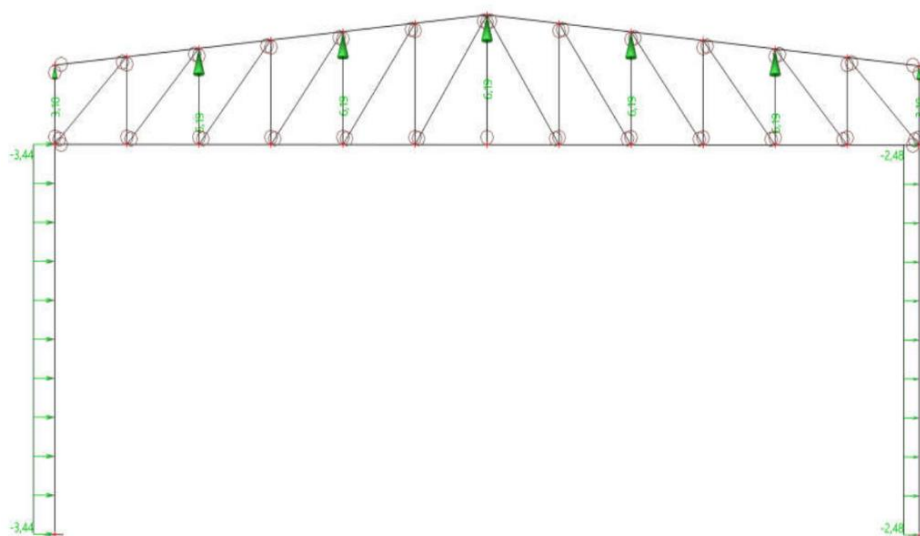
Ao incidir sobre uma estrutura, o vento exerce sua principal influência na face do telhado, sendo então transferido para as terças. Em virtude desse processo de transmissão de carga, a aplicação no nó do pórtico ocorre na direção da terça, formando um ângulo de 90° com o plano da cobertura.

Figura 21 - Ações provenientes do vento longitudinal ($W0^\circ$) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 15 metros.



Fonte: Autor (2024).

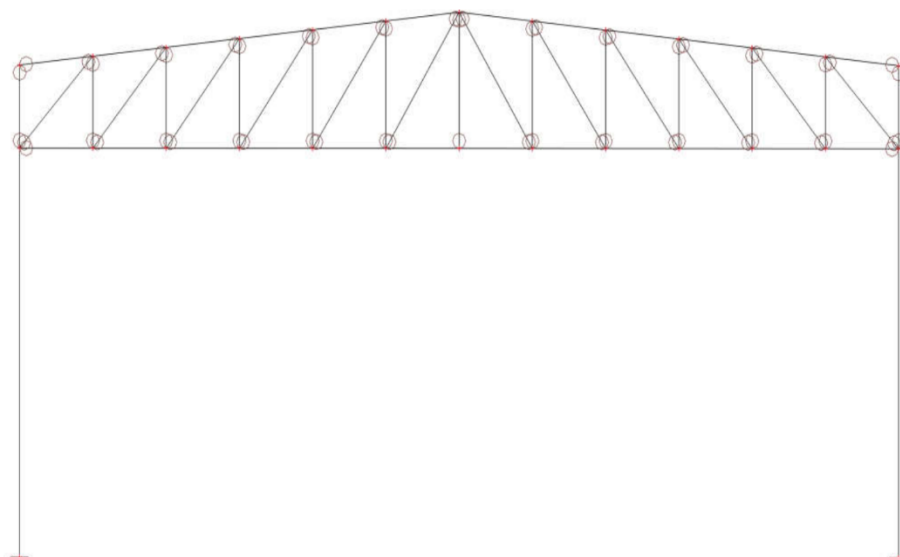
Figura 22 - Ações provenientes do vento longitudinal (W90°) no pórtico com treliça trapezoidal com vão livre de 15 metros.



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 23, apresenta-se a vinculação das barras que compõem o pórtico transversal. Observa-se que todas as diagonais e montantes são rotuladas em suas extremidades. A coluna é articulada na base e rotulada no plano perpendicular ao pórtico transversal.

Figura 23 - Vinculação das barras.

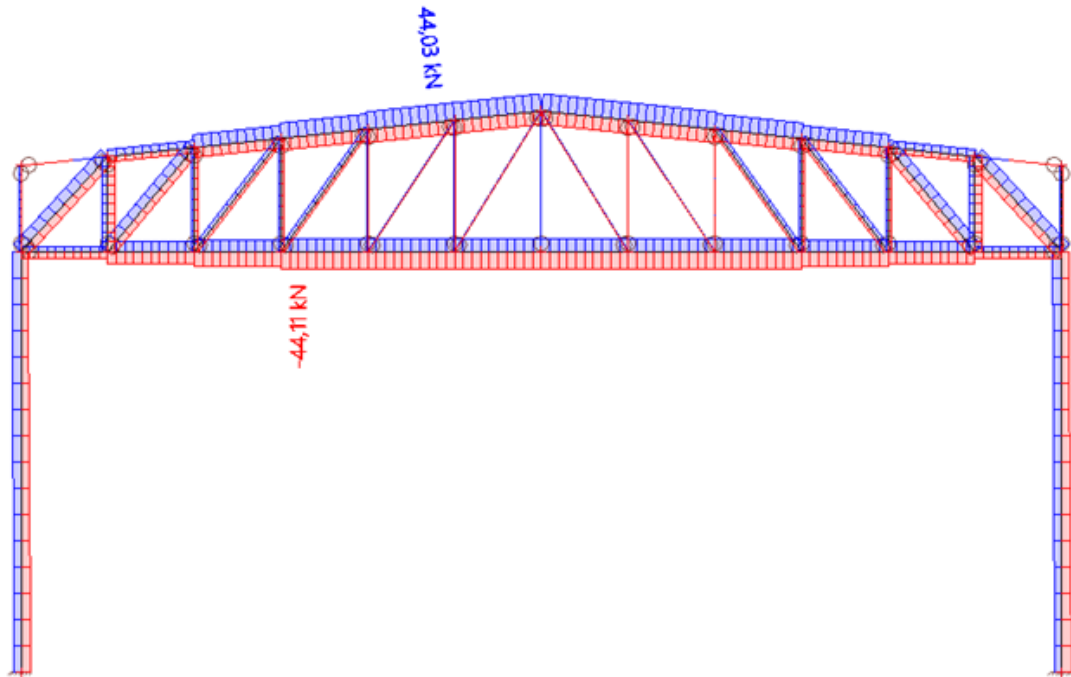


Fonte: Autor (2024).

Após a definição dos casos de carga e das combinações de ações, realiza-se a análise estrutural do modelo com o auxílio do *Scia Engineer*. A seguir, são apresentados alguns

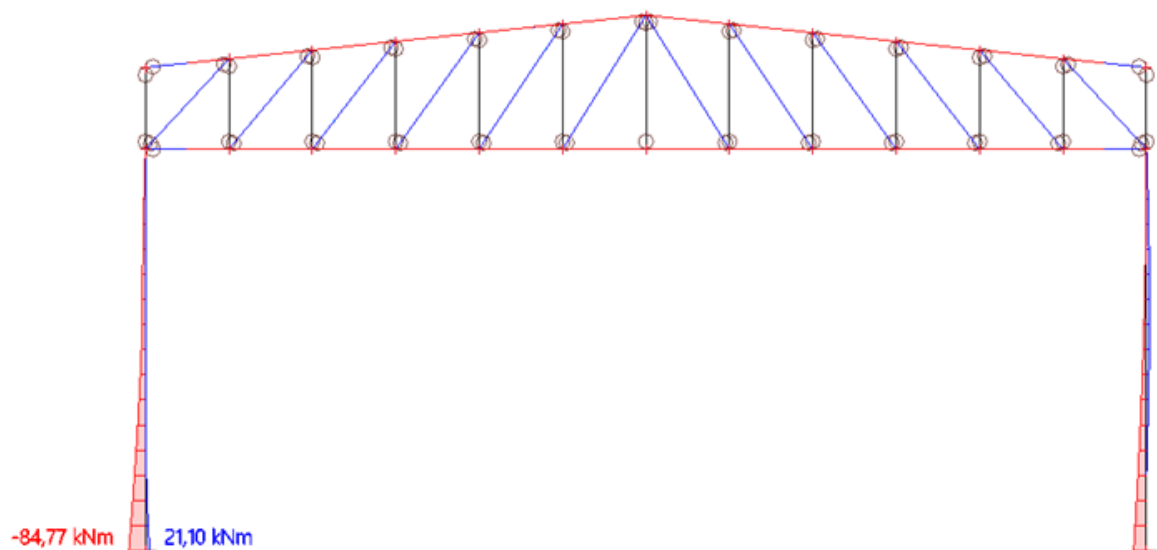
resultados da análise estrutural do pórtico com treliça trapezoidal e vão livre de 15 metros. Nas Figuras 24 e 25, são exibidos os diagramas de Esforços Axiais e de Momentos Fletores resultantes das combinações de carga consideradas.

Figura 24 - Diagramas de Esforços Axiais.



Fonte: Autor (2024).

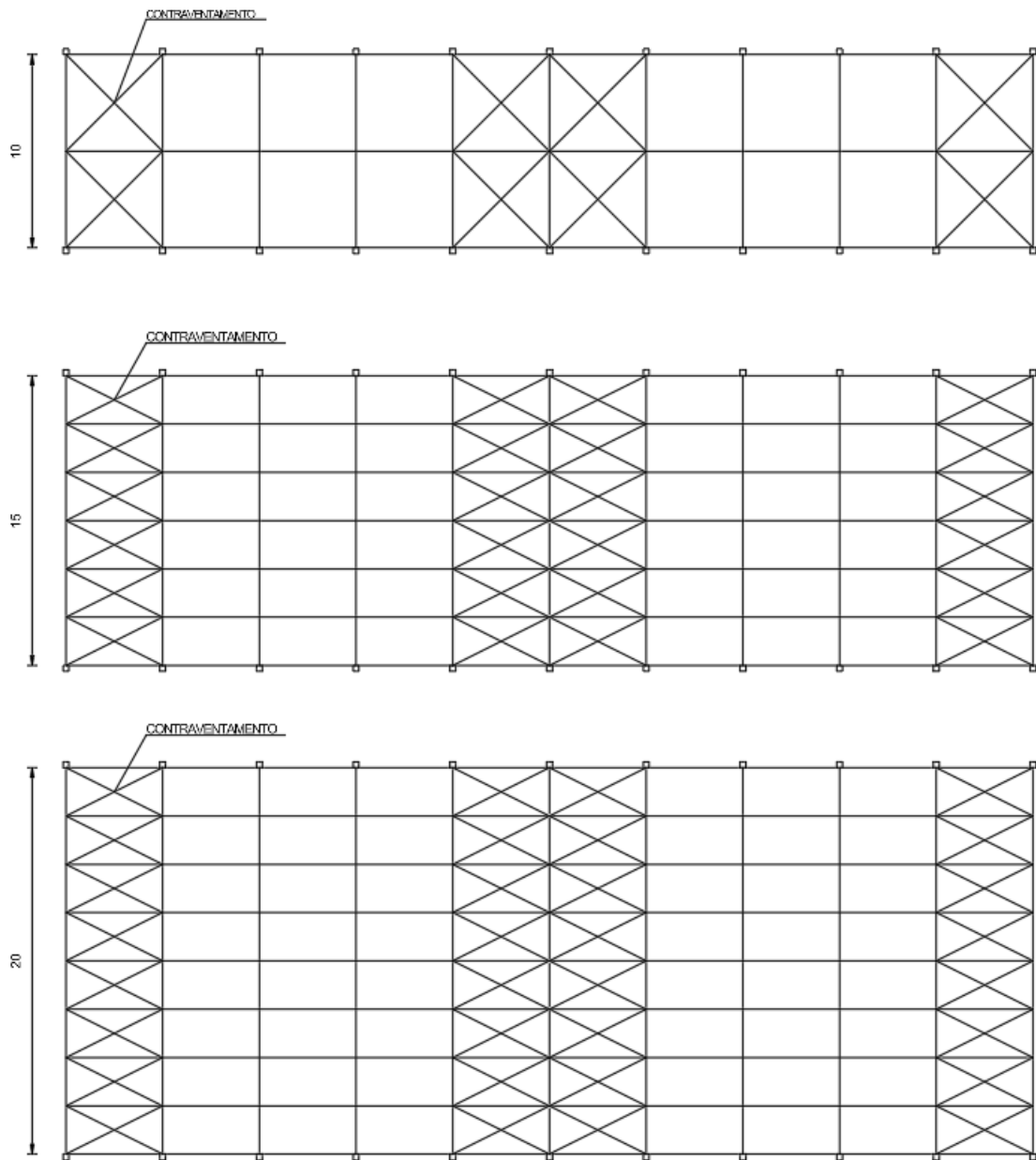
Figura 25 - Diagrama de Momentos Fletores.



Fonte: Autor (2024).

Quanto ao comprimento de flambagem, que é um parâmetro importante na análise da estabilidade, indicando a distância ao longo da qual a estrutura pode perder rigidez e colapsar sobre compressão. Considerando que, na situação estudada as estruturas estão engastadas nas extremidades, o comprimento de flambagem adotado foi de $2l$, ou seja, sob condições específicas de contorno e carregamento, o comprimento efetivo crítico é duas vezes o comprimento real da peça. Na figura 26 a seguir, são mostrados os contraventamentos para cada vão.

Figura 26 - Contraventamento para os vãos de 10, 15 e 20 metros.

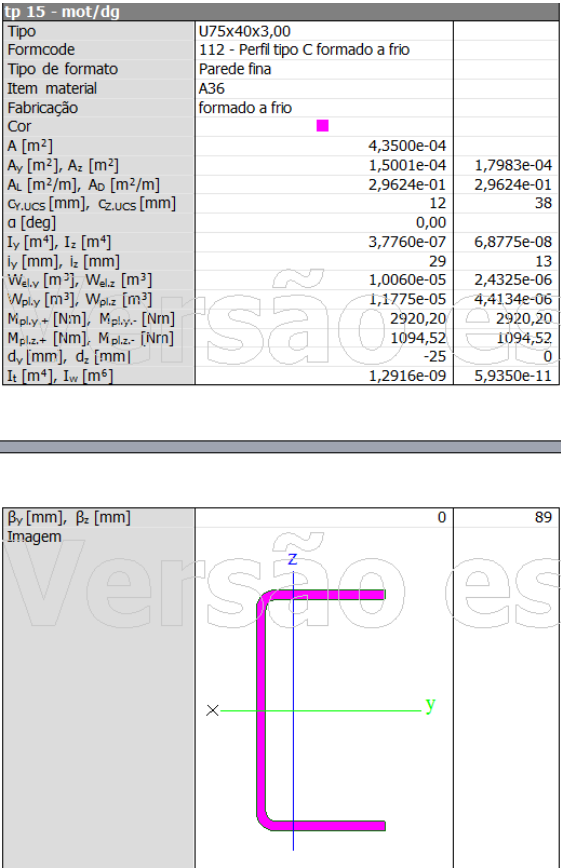


Fonte: Autor (2024).

Ainda com o intuito de exemplificar o procedimento adotado para todos os modelos de pórtico transversal, destacam-se a seguir algumas etapas utilizadas na definição das seções transversais. O *Scia Engineer* incorpora um módulo integrado à análise estrutural que possibilita a verificação de seções transversais de aço. Essa verificação no *Scia Engineer* pode ser conduzida com base nas normas brasileiras NBR 14762 (ABNT, 2010) e NBR 8800 (ABNT, 2008).

Como exemplo, será mostrado nas figuras 27, 28 e 29 alguns passos da verificação dos perfis que compoem os elementos estruturais das montantes e diagonais para a treliça trapezoidal com vão de 15 metros.

Figura 27 - Descrição das caracteriscas do perfil de dupla cantoneira para as montantes/diagonais da treliça trapezoidal com vão de 15 metros.



Fonte: Autor (2024).

Figura 28 - Dimensionamento a compressão do perfil de dupla cantoneira para as montantes/diagonais da treliça trapezoidal com vão de 15 metros.

Verificação pela Norma Brasileira de Aço

Valores: **UnityCheck**

Cálculo linear

Combinação: ELU-Norm (auto)

Sistema de coordenadas: Principal

Extremo 1D: Global

Seleção: Tudo

versão estudanti

Verificação pela Norma Brasileira de Aço - ABNT - NBR-14762:2010

Dados da barra		
Barra	Posição[m]	Perfil
B46	5	U(NBRf)100x40x2,25

Seção:

Seção: U(NBRf)100x40x2,25



OBS: Y-Y(SCIA) = X-X (NBR)

Z-Z(SCIA) = Y-Y (NBR)

Dados do aço				
Aço	Fy[kN/cm2]	Fu[kN/cm2]	E[kN/cm2]	G[kN/cm2]
A36	24.8	40	20000	7692

Esforços*				
Nd[kN]	Mdx[kN.cm]	Mdy[kN.cm]	Vdx[kN]	Vdy[kN]
-23.6	0	-1.06	-0.02	0

Combinação: PesoPróprio+1.40*V90°+
 Telhas

Item 9.7 - Resistência à compressão

Item 9.7.4 - Verificação da esbeltez

λ_x	λ_y	Status
64.8	102	OK

Carga de flambagem elástica

Ne _x	Ne _y	Ne _z	Ne _{xz}	Ne _{yz}	Ne
183	73.8	38.6	36.5	0	36.5

Item 9.7.2 - Cálculo da esbeltez reduzida

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{Ne}} = 1.62$$

Definição do fator de redução à flambagem global χ

$$\chi = \frac{0.877}{\lambda_0^2} = \frac{0.877}{1.62^2} = 0.333$$

Fonte: Autor (2024).

Figura 29 - Cálculo da largura efetiva do perfil de dupla cantoneira para montantes/diagonais da treliça trapezoidal com vão de 15 metros.

Cálculo da largura efetiva

$$\sigma = \chi \cdot f_y = 0.333 \cdot 248 \cdot 10^6 = 83 \text{ MPa}$$

Verificação da mesa - seção 9.2.2 Flambagem Local - tabela 6

caso a - compressão uniforme: $k = 0.43$

Seção 9.2.2.1:

Esbeltez reduzida:

$$\lambda_p = \frac{\frac{bf}{t}}{0.95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma}}} = \frac{\frac{0.0355}{2.25 \cdot 10^{-3}}}{0.95 \cdot \sqrt{\frac{0.43 \cdot 200 \cdot 10^9}{83 \cdot 10^6}}} = 0.514$$

$$A_e = A_g = 3.88 \text{ cm}^2$$

Mesa totalmente efetiva

Verificação da alma - seção 9.2.2 Flambagem Local - tabela 5

caso a - compressão uniforme: $k = 4$

Seção 9.2.2.1:

Esbeltez reduzida:

$$\lambda_p = \frac{\frac{d}{t}}{0.95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma}}} = \frac{\frac{0.091}{2.25 \cdot 10^{-3}}}{0.95 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 200 \cdot 10^9}{83 \cdot 10^6}}} = 0.432$$

$$b_{ef} = d = 91 \text{ mm}$$

Alma totalmente efetiva

Item 9.7.2 - Cálculo da esbeltez reduzida com a área efetiva

$$A_e = 3.88 \text{ cm}^2$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_e \cdot f_y}{N_e}} = 1.62$$

Definição do fator de redução à flambagem global χ

$$\chi = \frac{0.877}{\lambda_0^2} = 0.333$$

Compressão resistente

$$N_{crd} = \frac{\chi \cdot A_e \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 26.7 \text{ kN}$$

Resultados de compressão

N_d (kN)	N_{crd} (kN)	Verificação	Status
23.6	26.7	0.88	OK

Fonte: Autor (2024).

No entanto, ainda são realizadas mais verificações sobre o perfil, como pode ser mostrado na Figura 30 a seguir, que traz uma tabela de verificações e seus *status*, também gerada pelo programa *Scia Engineer*.

Figura 30 - Tabela de verificações sobre o perfil de dupla cantoneira para a treliça trapezoidal com vão de 15 metros.

Verificação	Fator de verificação	Status
Tração	0	OK
Compressão	0.96	OK
Flexão X-X	0.03	OK
Flexão Y-Y	0	OK
Cisalhamento X	0	OK
Cisalhamento Y	0	OK
Mx + Vy	0	OK
My + Vx	0	OK
T + Mx + My	0.03	OK
N + Mx + My	0.99	OK

Fonte: Autor (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Lista de Materiais e Deslocamento Vertical

Nas Tabelas 4, 5 e 6, são mostradas as listas de materiais elaboradas para os modelos de pórticos estudados no projeto, obtida após análise e dimensionamento dos elementos estruturais.

Na lista de materiais, são obtidas algumas informações relacionadas à composição do pórtico transversal, tais como:

- Descrição do modelo;
- Tipo do perfil para cada elemento estrutural;
- Peso total da treliça de cobertura;
- Deslocamento vertical.

Tabela 4 - Lista de material e deslocamento vertical para treliça em banzos paralelos (BP).

TRELIÇA DE BANZOS PARALELOS					
VÃO	BANZOS	MONT/DIAG	DESL. VERTICAL	CONSUMO	TAXA
			(cm)	(Kg)	(Kg/m²)
BP - 10	U 100 x 40 x 3,00	U 75 x 40 x 2,00	3,07	131,63	2,19
	U 100 x 40 x 4,25				
BP - 15	U 100 x 50 x 3,00	U 75 x 40 x 3,75	3,94	257,5	2,86
	U 100 x 50 x 4,25				
BP - 20	U 100 x 50 x 4,25	U 75 x 40 x 3,00	7,05	448,77	3,74
	U 100 x 50 x 6,30				

Fonte: Autor (2024).

Tabela 5 - Lista de material e deslocamento vertical para treliça trapezoidal (TP).

TRELIÇA TRAPEZOIDAL					
VÃO	BANZOS	MONT/DIAG	DESL. VERTICAL	CONSUMO	TAXA
			(cm)	(Kg)	(Kg/m²)
TP - 10	U 100 x 50 x 2,00	U 75 x 40 x 2,25	1,3	138,83	2,31
	U 100 x 50 x 2,25				
TP - 15	U 125 x 50 x 2,65	U 75 x 40 x 3,00	1,6	299,74	3,33
	U 125 x 50 x 3,00				
TP - 20	U 125 x 75 x 3,35	U 75 x 40 x 3,35	2,1	607,56	5,06
	U 125 x 75 x 3,75				

Fonte: Autor (2024).

Tabela 6 - Lista de material e deslocamento vertical para treliça triangular (TT).

TRELIÇA TRIANGULAR					
VÃO	BANZOS	MONT/DIAG	DESL. VERTICAL (cm)	CONSUMO (Kg)	TAXA (Kg/m ²)
TT - 10	U 100 x 40 x 2,00	U 75 x 40 x 2,25	2	91,62	1,53
	U 100 x 40 x 2,25				
TT - 15	U 100 x 50 x 2,25	U 75 x 40 x 2,65	2,7	196,03	2,18
	U 100 x 50 x 3,00				
TT - 20	U 125 x 50 x 2,65	U 75 x 40 x 3,00	3,6	333,92	2,78
	U 125 x 50 x 3,00				

Fonte: Autor (2024).

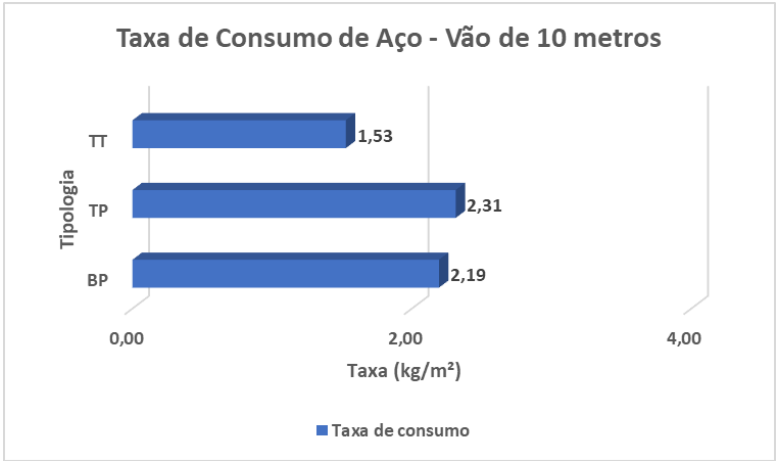
4.2 Comparativo de Taxa de Consumo de Aço

Neste tópico, é feito a análise comparativa das taxas de consumo de aço relacionadas às várias tipologias para as treliças de cobertura examinadas no estudo paramétrico, abrangendo vãos livres de 10, 15 e 20 metros. Os gráficos apresentados adotam a mesma identificação para as três diferentes tipologias de pórtico transversal, conforme previamente definido no Capítulo 4.

4.2.1 Variação da Taxa de Consumo de Aço para o Mesmo Vão Livre

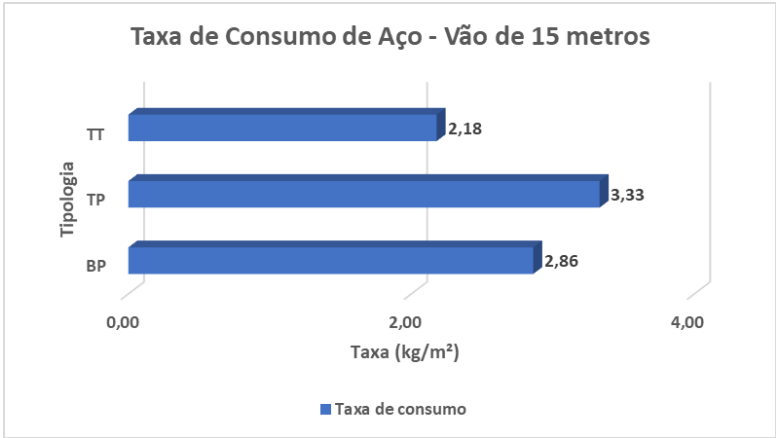
Na figura 31, 32 e 33, são mostradas as taxas de consumo de aço para os vãos livres considerados no estudo em função das tipologias abordadas, a fim de ilustrar uma análise comparativa.

Figura 31 - Taxa de consumo aço para vão livre de 10 metros.



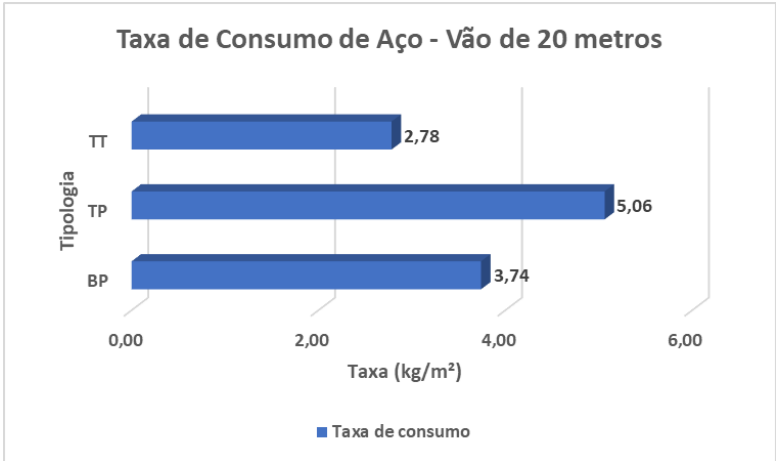
Fonte: Autor (2024).

Figura 32 - Taxa de consumo aço para vão livre de 15 metros.



Fonte: Autor (2024).

Figura 33 - Taxa de consumo aço para vão livre de 20 metros.

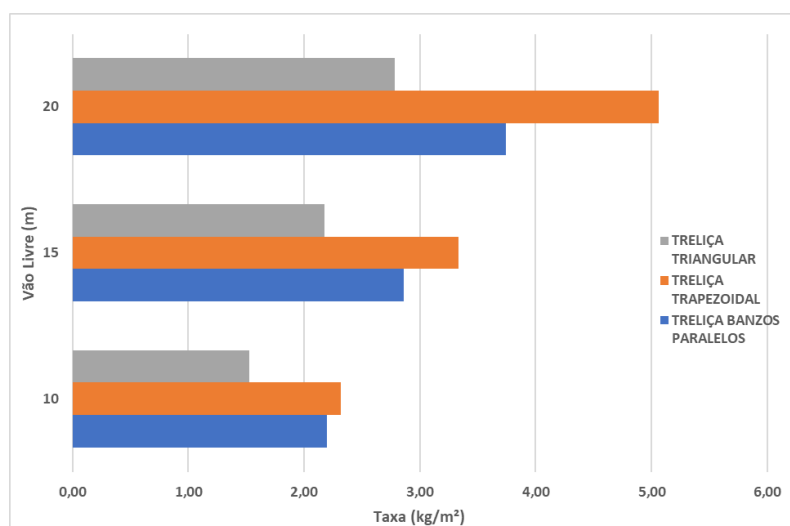


Fonte: Autor (2024).

A partir da análise desses gráficos, pode-se perceber que para o vão de 10 metros, a treliça triangular (TT) apresenta uma certa vantagem em relação as outras duas tipologias, em que essas apresentam um resultado similar entre si. Para os vãos de 15 e 20 metros, pode-se notar que a treliça trapezoidal (TP) destoa mais que as outras, tendo mais que o dobro de consumo de aço em relação a condição inicial.

Na Figura 34, é mostrada uma sobreposição dos resultados para as tipologias estudadas, onde pode-se notar um padrão para variação das taxas de consumo de aço para todos os vãos livres, com base nas tipologias estudadas.

Figura 34 - Taxa de consumo de aço para as tipologias das estruturas consideradas, em função do das tipologias.

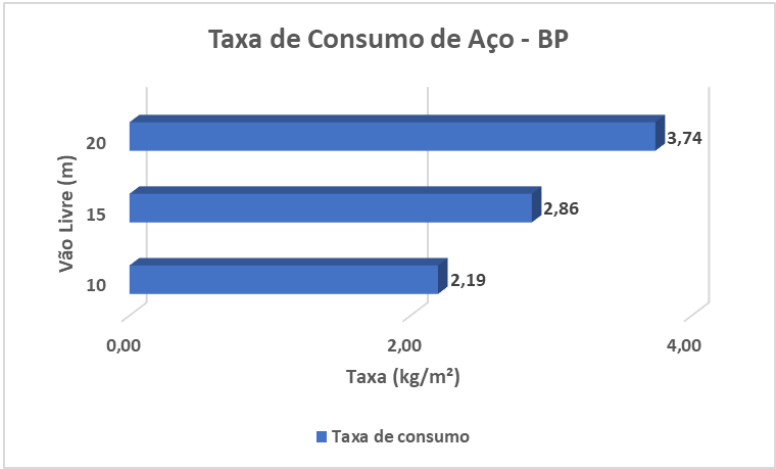


Fonte: Autor (2024).

4.2.2 Variação da Taxa de Consumo de Aço para uma Mesma Tipologia

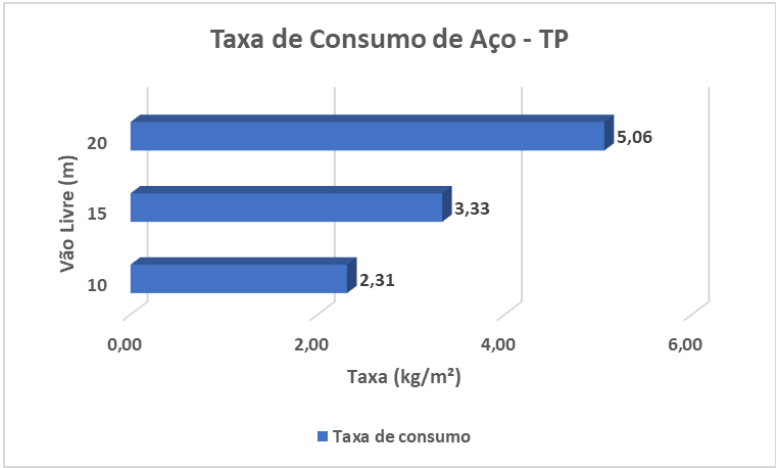
Nas Figuras 35, 36 e 37, são exibidas as taxas de consumo de aço para as diferentes tipologias de cobertura analisadas, em relação ao vão livre dos pórticos transversais. Logo, como no tópico anterior, também para ilustrar uma análise comparativa.

Figura 35 - Taxa de consumo de aço para pórtico com treliça de banzos paralelos (BP).



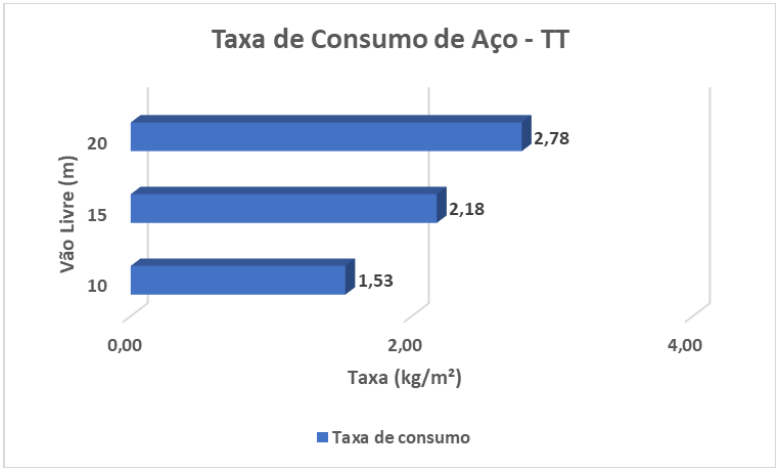
Fonte: Autor (2024).

Figura 36 - Taxa de consumo de aço para pórtico com treliça trapezoidal (TP).



Fonte: Autor (2024).

Figura 37 - Taxa de consumo de aço para pórtico com treliça triangular (TT).

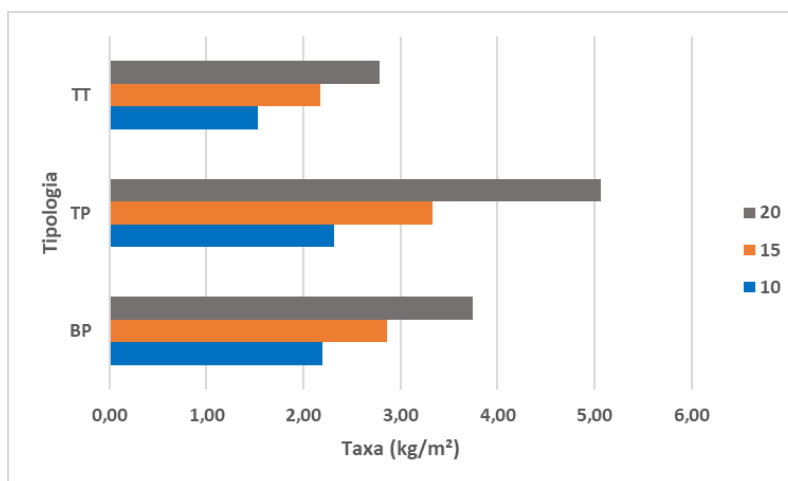


Fonte: Autor (2024).

Segundo as Figuras 35, 36 e 37, que representam a variação da taxa de consumo de aço para a treliça em banzos paralelos (BP), treliça trapezoidal (TP) e treliça triangular (TT), é possível afirmar que à medida que aumenta o vão livre, aumenta a taxa de consumo em todas as tipologias, evidenciando que a área de atuação influencia diretamente nesses resultados. Ou seja, à medida que se aumenta o vão livre, logo, aumenta o peso, e por consequência a taxa de consumo de aço.

Algo também que pode ser notado, é que do vão livre de 10 metros para o vão livre de 20 metros, a variação da taxa de consumo de aço é praticamente o dobro para todas as tipologias, variando um pouco menos para os modelos de treliça de banzos paralelos (BP) e treliça triangular (TT), e um pouco mais para os modelos de treliça trapezoidal (TP).

Figura 38 - Taxa de consumo aço para as tipologias de pórtico transversal consideradas, em função do vão livre.



Fonte: Autor (2024).

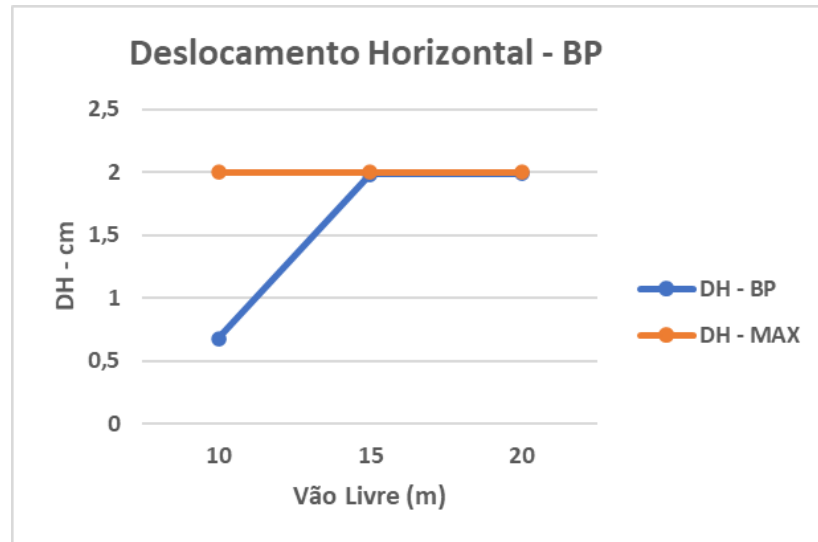
4.3 Comparativo dos Deslocamentos dos Modelos Propostos

4.3.1 Deslocamentos Horizontais

Nas Figuras 39, 40 e 41, são mostrados os gráficos comparativos dos deslocamentos horizontais para todas as tipologias estudadas em função do vão livre, fazendo a devida comparação com o deslocamento horizontal máximo estabelecido pela NBR 8800 (ABNT, 2008), Anexo C, que para o caso do presente trabalho limita o valor em $H/300$, sendo H a altura da coluna.

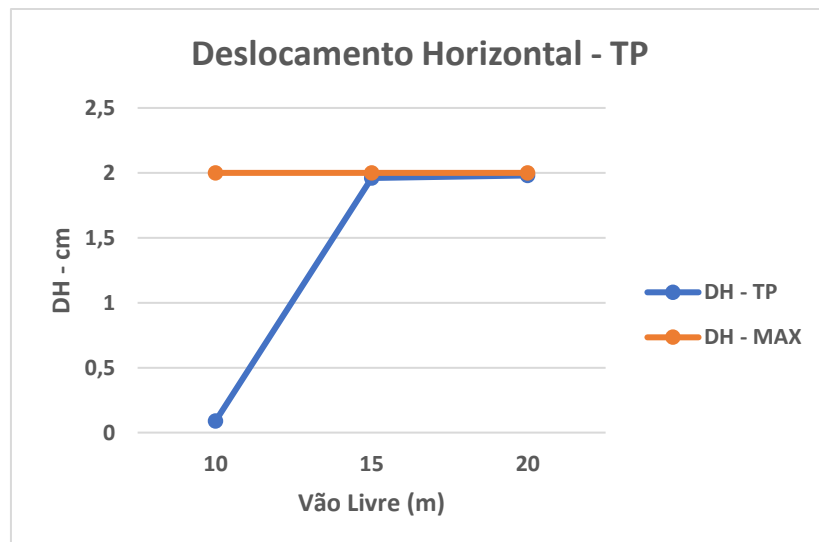
Da mesma forma que as taxas de consumo de aço, os deslocamentos do pórtico transversal podem ser empregados como um parâmetro de referência para a comparação do desempenho das tipologias.

Figura 39 - Comparativo do deslocamento horizontal para pórtico com treliça de banzos paralelos (BP).



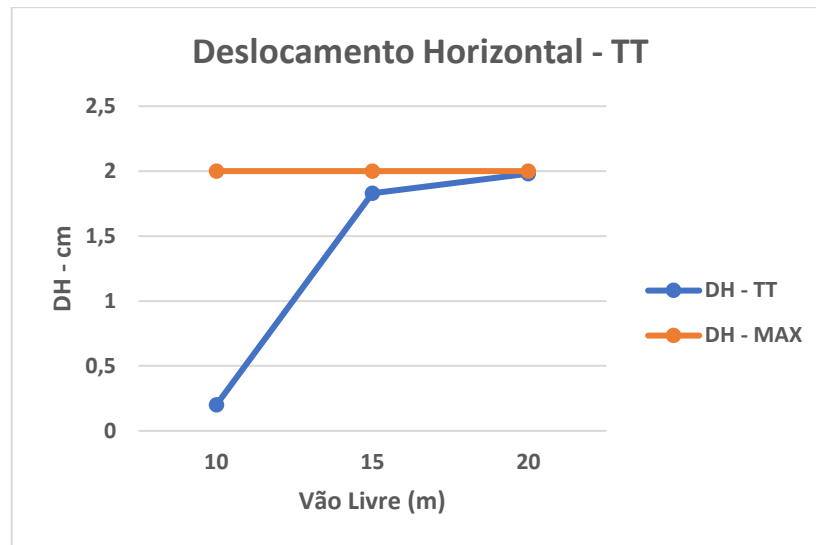
Fonte: Autor (2024).

Figura 40 - Comparativo do deslocamento horizontal para pórtico com treliça trapezoidal (TP).



Fonte: Autor (2024).

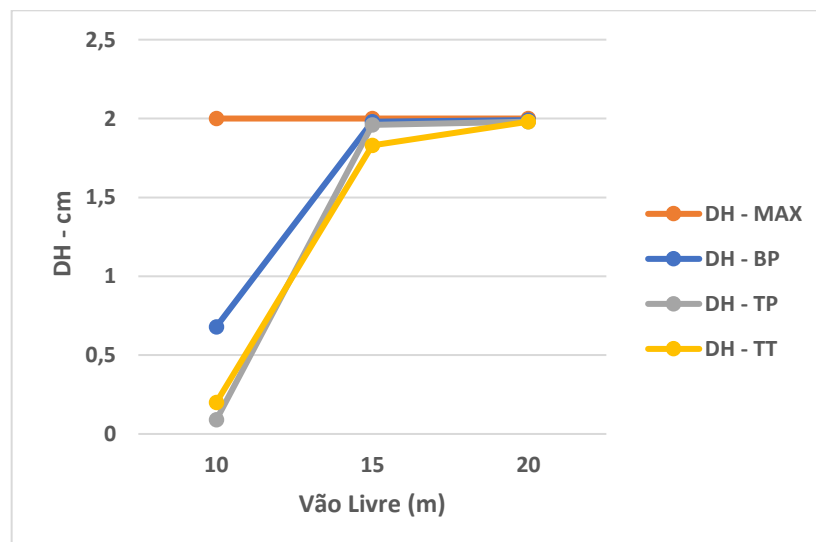
Figura 41 - Comparativo do deslocamento horizontal para pórtico com treliça triangular (TT).



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 42, é mostrado a sobreposição desses deslocamentos horizontais, para se ter uma melhor noção dessa verificação, tendo em vista que o valor do deslocamento horizontal máximo para todos os modelos foi de 2 cm, calculado com base no que já foi dito sobre a norma NBR 8800 (ABNT, 2008), sendo que, as alturas dos pilares são iguais em todos os modelos propostos.

Figura 42 - Sobreposição dos deslocamentos horizontais para todas as tipologias.



Fonte: Autor (2024).

Ao examinar a Figura 41, constata-se então, que todos os modelos estruturais satisfazem o critério do Estado Limite de Utilização, no que diz respeito a deslocamentos excessivos da

estrutura. Isso fica evidente quando é comparado os deslocamentos horizontais com os valores limites estabelecidos pela norma NBR 8800 (ABNT, 2008).

Os componentes estruturais predominantes na contenção dos deslocamentos horizontais nos pórticos transversais são as colunas. A viga de cobertura também desempenha um papel na contenção desses deslocamentos, porém sua contribuição é menos significativa.

Não há uma conclusão definitiva sobre qual tipologia de pórtico é a mais eficaz no que diz respeito ao deslocamento horizontal. No entanto, durante as análises, constatou-se que o deslocamento horizontal foi um fator crucial para o dimensionamento dos pilares.

4.3.2 Deslocamentos Verticais

Nas Figuras 43, 44 e 45, são mostrados os gráficos comparativos dos deslocamentos verticais para todas as tipologias estudadas em função do vão livre, fazendo a devida comparação com o deslocamento vertical máximo estabelecido pela NBR 8800 (ABNT, 2008), Anexo C, que para o caso do presente trabalho limita o valor em $L/250$, sendo L o vão teórico entre os apoios.

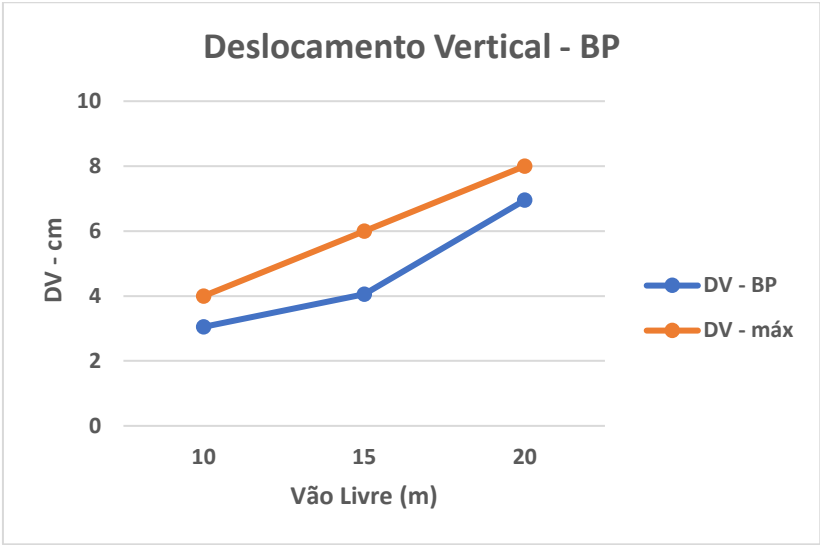
A Tabela 7 apresenta os limites definidos no presente estudo para as diferentes tipologias.

Tabela 7 - Deslocamento vertical máximo para as diversas tipologias.

Tipologia	Vão Livre	DV _{máx} (cm)
BP, TP, TT	10	4
	15	6
	20	8

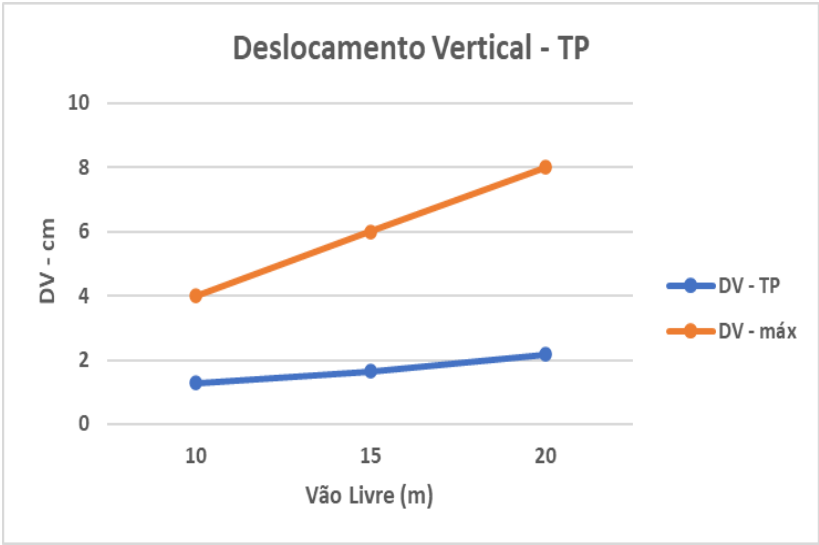
Fonte: Autor (2024).

Figura 43 - Comparativo do deslocamento vertical para pórtico com treliça de banzos paralelos (BP).



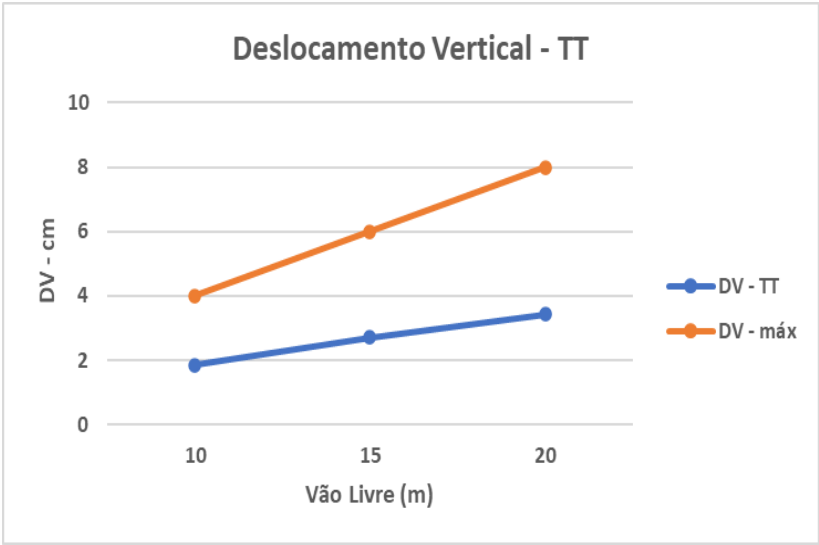
Fonte: Autor (2024).

Figura 44 - Comparativo do deslocamento vertical para pórtico com treliça trapezoidal (TP).



Fonte: Autor (2024).

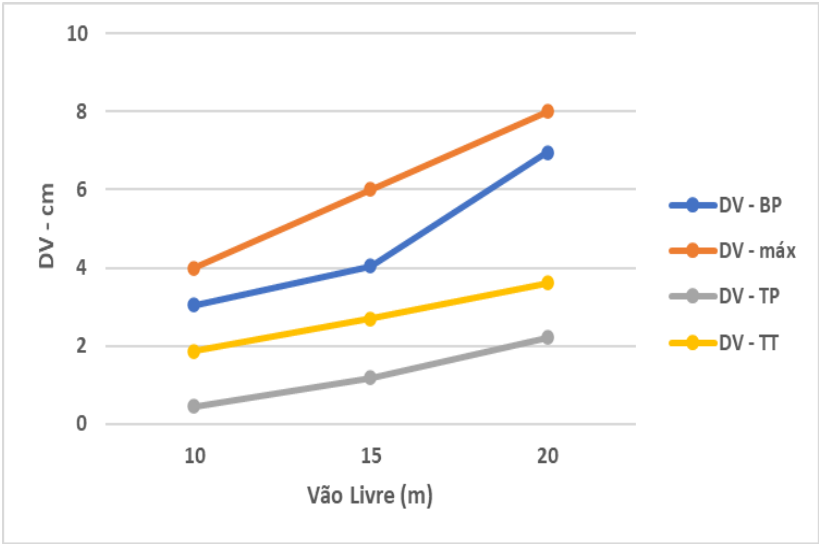
Figura 45 - Comparativo do deslocamento horizontal para pórtico com treliça triangular (TT).



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 46 a seguir, é ilustrado a sobreposição desses deslocamentos verticais, para uma melhor análise comparativa com os valores dos deslocamentos verticais máximos obtidos com base na norma NBR 8800 (ABNT, 2008), Anexo C. Geralmente, os deslocamentos verticais são originados devido à influência das forças geradas pelo vento, o peso da própria estrutura e às sobrecargas.

Figura 46 - Sobreposição dos deslocamentos verticais para todas as tipologias.



Fonte: Autor (2024).

Da mesma maneira que ocorre com os limites dos deslocamentos horizontais, no que se refere aos deslocamentos verticais, os modelos atendem ao Estado Limite de Utilização, conforme estabelecido pelas diretrizes da norma NBR 8800 (ABNT, 2008).

Como pode-se notar, a treliça trapezoidal tem um deslocamento vertical menor que as demais, principalmente devido à elevada inércia equivalente da viga em formato de treliça trapezoidal e à rigidez da conexão entre a viga e as colunas. Portanto, pode-se interpretar a treliça trapezoidal como uma viga equivalente com uma seção variável e uma ligação rígida com as colunas.

Nas vigas da treliça com banzos paralelos e nas vigas da treliça triangular, a falta de um componente para conter o deslocamento horizontal na parte superior das colunas leva a deslocamentos verticais superiores em comparação com as vigas de treliça trapezoidais.

5 CONCLUSÕES

As análises demonstraram que as treliças triangulares obtiveram a menor taxa de consumo de aço, sendo seguidas pelas treliças de trapezoidais e depois pelas treliças de banzo paralelo. Dessa forma, quanto maior é o vão livre da estrutura, maior é a influência da tipologia sobre a taxa de consumo de aço.

Os banzos inferiores da treliça trapezoidal e da treliça triangular atuam como um tirante, desempenhando um papel relevante na absorção dos carregamentos desses modelos. Adicionalmente, a inércia equivalente desta viga de cobertura é superior à das demais tipologias, garantindo assim menores deslocamentos verticais em relação a treliça de banzos paralelos.

Logo, para os deslocamentos verticais, foi possível observar que a treliça trapezoidal (TP) apresentou deslocamentos verticais inferiores, seguida pela treliça triangular e depois a treliça de banzos paralelos. Dessa forma, a diferença pode ser considerada significativa, uma vez que é influenciada pelo vento, que neste caso foi particularmente desfavorável devido à inclinação da cobertura.

Devido ao grau de continuidade nas ligações com as colunas, evidenciado nas vigas de cobertura, os deslocamentos horizontais são significativamente influenciados pelas colunas. Uma vez que as colunas para um mesmo vão livre apresentam semelhanças, os deslocamentos tornam-se próximos uns dos outros.

As características das seções transversais dos perfis exercem uma influência substancial na taxa de consumo de aço nos pórticos treliçados, independentemente da tipologia. A otimização da taxa de consumo de aço poderia ser obtida ao considerar uma maior variedade de bitolas em uma única viga de cobertura, desde que fosse viável construtivamente introduzir uma ampla gama de seções transversais em uma única treliça. No entanto, é importante observar que tal prática não é comum na construção civil.

O destaque de uma determinada tipologia em relação às outras não permite afirmar de maneira conclusiva que seja mais econômica do ponto de vista do projeto. Há outras variáveis em um projeto que influenciam a escolha de uma tipologia. Por exemplo, o pé direito efetivo, a estética, o tipo de atividade a ser empregado, entre outros.

Conclui-se, portanto, que do ponto de vista estrutural, entre as tipologias e vãos estudados, as treliças triangulares são mais eficientes quanto ao consumo de aço, seguidos pelos pórticos com treliça trapezoidal e treliça de banzos paralelos, respectivamente. No entanto, ao

tomar como parâmetro os deslocamentos verticais, a treliça trapezoidal apresenta um desempenho mais satisfatório.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – procedimento. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355**: Perfis de aço formados a frio – Padronização. Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- AISI - AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **S100**: North American specification for the design of cold-formed steel structural members, 2016.
- BLESSMANN, J. *Acidentes Causados pelo Vento*. 3.ed. revisado. Porto Alegre, Editora da Universidade/UFRGS, (Série Engenharia Estrutural 7), 1986.
- CHAVES, M. R. *Avaliação do Desempenho de Soluções Estruturas para Galpões Leves*. Ouro Preto, Editora da Universidade/UFOP, 2007.
- GIL, Antonio C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2022. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786559771653/>. Acesso em: 01 fev. 2023.
- HANISHA, Cherukuri Sri Sai; KISHORE, I. Siva. *Experimental and finite element analysis of cold formed steel beam-column joint*. *Materials Today: Proceedings*, v. 33, p. 480-483, 2020.
- INSTITUTO AÇO BRASIL – CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. PRAVIA, Z. M. C. (rev.); DREHMER, G. A.; MESACASA JÚNIOR, E. **Galpões para usos gerais**. 4. ed. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010.
- INSTITUTO AÇO BRASIL – CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. SILVA, E. L.; PIERIN, I.; SILVA, V. P. **Estruturas compostas por perfis formados a frio – dimensionamento pelo Método das Larguras Efetivas e aplicação conforme ABNT 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012**. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2014.
- MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO. SECRETARIA DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL (MIC/STI). **Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas**. v.1. Brasília: MIC/STI, 1986.
- NOGUEIRA, Gilcimar Saraiva. **Avaliação de soluções estruturais para galpões compostos por perfis de aço formados a frio**. 2009.

PAIVA, Phelippe et al. **AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE COBERTURAS METÁLICAS DE QUADRAS POLIESPORTIVAS EXECUTADAS COM PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO**. 2020.

PARK, Keum-Sung et al. *Embedded steel column-to-foundation connection for a modular structural system*. *Engineering Structures*, v. 110, p. 244-257, 2016.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço – Dimensionamento prático de Acordo com a NBR8800:2008**. 8ª edição, Rio de Janeiro, 2014.

PRAVIA, Z. M. C.; Moacir Kripka. (Org.). *Construção Metálica Estudos e Pesquisas Recentes*. Passo Fundo: Ediora UPF, 2005.

RUSCH, A.; LINDNER, J. **Remarks to the Direct Strength Method**. *Thin-Walled Structures*, v. 39, p. 807-820, 2001.