



CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

NADLA SILVA LIMA

**ANÁLISE DE COBERTURAS EM ESTRUTURA METÁLICA COM
DIFERENTES TIPOS DE GEOMETRIA PARA UM GALPÃO
COMERCIAL**

Sinop/MT

2024

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

NADLA SILVA LIMA

**ANÁLISE DE COBERTURAS EM ESTRUTURA METÁLICA COM
DIFERENTES TIPOS DE GEOMETRIA PARA UM GALPÃO
COMERCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Avaliadora do Departamento de Engenharia Civil, do Centro Universitário Fasipe - UNIFASIPE, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Letícia Reis Batista Rosas

Sinop/MT

2024

NADLA SILVA LIMA

**ANÁLISE DE COBERTURAS EM ESTRUTURA METÁLICA COM
DIFERENTES TIPOS DE GEOMETRIA PARA UM GALPÃO
COMERCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Avaliadora do Curso de Engenharia Civil – do Centro Universitário Fasipe - UNIFASIPE como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: _____/_____/_____

Professor(a) Orientador(a):
Departamento de Engenharia Civil – UNIFASIPE

Professor(a) Orientador(a):
Departamento de Engenharia Civil – UNIFASIPE

Professor(a) Orientador(a):
Departamento de Engenharia Civil – UNIFASIPE

Professor(a) Orientador(a):
Departamento de Engenharia Civil – UNIFASIPE
Coordenador do Curso de Engenharia Civil

Sinop - MT

2024

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus, porque se não fosse através dele, não teria chegado até aqui.

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu marido, Marco Antônio Rodrigues de Oliveira, que esteve ao meu lado durante todo o meu percurso acadêmico, me incentivando e dando o apoio necessário para continuar nessa caminhada.

Agradeço também aos meus pais, Mayane Alves da Silva Lima e Napoleão Lima Sobrinho, que mesmo em meio a tantas dificuldades, acreditaram em mim e fizeram o possível para que esse momento fosse concretizado.

À minha professora orientadora, Letícia Reis Batista Rosas, que me orientou de forma objetiva para obter êxito neste trabalho.

Aos demais professores do curso de graduação, que nos transmitiram seus conhecimentos e muito contribuíram para nossa formação.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho e permitiram o enriquecimento de minha aprendizagem.

LIMA, Nadla Silva. Análise da viabilidade para cobertura em estrutura metálica com diferentes tipos de geometria para um galpão comercial. Número 45. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário Fasipe – UNIFASIPE

RESUMO

Este trabalho investiga diferentes geometrias de coberturas metálicas para galpões comerciais, visando identificar a configuração mais eficiente em termos de consumo de aço. Foram analisados doze modelos de galpões, todos padronizados com 20 metros de largura e 40 metros de comprimento, utilizando perfis de aço formados a frio, seguindo as diretrizes da NBR 14762 (ABNT, 2010). As cargas atuantes nas estruturas foram calculadas seguindo as normas NBR 14762 (ABNT, 2010), NBR 6120 (ABNT, 2019) e NBR 6123 (ABNT, 1988), considerando peso próprio, peso das telhas, sobrecargas e forças devidas ao vento. O dimensionamento estrutural foi realizado com o software CypeCad, avaliando as geometrias com base no consumo de aço em kg/m^2 e verificando critérios de resistência e estabilidade, como resistência à tração, compressão, flexão, esforço cortante e flambagem. As geometrias analisadas incluíram diferentes distâncias entre banzos (0,5 m, 0,75 m e 1,0 m) e distâncias entre montantes (0,5 m e 0,7 m) para inclinações de 10% e 15%, totalizando doze geometrias analisadas. Os resultados indicaram que a geometria com banzos a 0,75 m e montantes a 0,7 m, com inclinação de 15%, apresentou o menor consumo de aço, demonstrando uma distribuição mais eficiente das cargas e menor consumo de material. Ao comparar as inclinações de 10% e 15%, observou-se que a inclinação maior tende a otimizar a utilização do aço, distribuindo melhor os esforços estruturais. Concluiu-se que a geometria com distância entre banzos de 0,75 m e distância entre montantes de 0,7 m, é a mais eficiente, resultando em uma construção mais econômica e segura.

Palavras-chave: Aço; Estrutura metálica; Galpões comerciais; Consumo de Aço

LIMA, Nadla Silva. Feasibility analysis for a metal structure roof with different types of geometry for a commercial warehouse. Number 45. Course Completion Work – Centro Universitário Fasipe – UNIFASIPE

ABSTRACT

This work investigates different geometries of metal roofs for commercial warehouses, aiming to identify the most efficient configuration in terms of steel consumption. Twelve models of warehouses were analyzed, all standardized with 20 meters in width and 40 meters in length, using cold-formed steel profiles, following the guidelines of NBR 14762 (ABNT, 2010). The loads acting on the structures were calculated following the standards NBR 14762 (ABNT, 2010), NBR 6120 (ABNT, 2019), and NBR 6123 (ABNT, 1988), considering self-weight, roofing weight, live loads, and wind forces. The structural design was carried out with the CypeCad software, evaluating the geometries based on steel consumption in kg/m^2 and verifying resistance and stability criteria such as tensile strength, compression, bending, shear force, and buckling. The geometries analyzed included different distances between chords (0.5 m, 0.75 m, and 1.0 m) and distances between struts (0.5 m and 0.7 m) for inclinations of 10% and 15%, totaling twelve geometries analyzed. The results indicated that the geometry with chords at 0.75 m and struts at 0.7 m, with an inclination of 15%, presented the lowest steel consumption, demonstrating a more efficient load distribution and lower material consumption. Comparing the inclinations of 10% and 15%, it was observed that the higher inclination tends to optimize the use of steel, better distributing structural efforts. It was concluded that the geometry with a distance between chords of 0.75 m and a distance between struts of 0.7 m is the most efficient, resulting in a more economical and safer construction.

Keywords: Steel; Metal structure; Commercial warehouses; Steel consumption.

LISTAS DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Gráfico típico de diagrama e tensão x deformação de um ensaio de tração | 13 |
| Figura 2: Perfis Laminados | 15 |
| Figura 3: Perfis Soldados..... | 15 |
| Figura 4: Perfis Formados a Frio..... | 16 |
| Figura 5: Edifício em duas águas com cobertura de tesoura e colunas em perfil I. | 18 |
| Figura 6: Esquema das terças e linhas de corrente. | 18 |
| Figura 7: Tipologia de Treliças | 19 |
| Figura 8: Formas de contraventamento: a) travamento em X; b) travamento em Y; c) travamento em | 20 |
| Figura 9: Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s). | 22 |
| Figura 10: Flambagem local e distorcional | 25 |
| Figura 11: Valores de CPE, para inclinação de 10%..... | 30 |
| Figura 12: Valores de CPE, para inclinação de 15%..... | 31 |
| Figura 13: Vista frontal do galpão 01 | 32 |
| Figura 14: Galpão 01 | 32 |
| Figura 15: Pórtico galpão 01 | 33 |
| Figura 16: Tabela resumo de taxa de aço do galpão 01..... | 34 |
| Figura 17: Gráfico para geometrias com inclinação de 10%..... | 35 |
| Figura 18: Gráfico para geometrias com inclinação de 15%..... | 36 |
| Figura 19: Comparação da quantidade de Aço (Kg/m^2), para as diferentes inclinações..... | 38 |
| Figura 20: Gráfico de Análise de Deformação das configurações Geométricas de 10% e 15% | 40 |
| Figura 21: Galpão metálico 3D, configuração G10-0,75-0,7 | 42 |

LISTAS DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Dimensões para os Galpões de duas Águas..... | 28 |
| Tabela 2: Valores de Vk e “q” para as Diferentes Inclinações..... | 30 |
| Tabela 3: Combinações de modelos de galpões metálicos por inclinação, distância entre banzos e montantes..... | 34 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 9 |
| 1.1. Justificativa..... | 10 |
| 1.2. Problematização..... | 11 |
| 1.3. Objetivos..... | 11 |
| 1.3.1 Geral..... | 11 |
| 1.3.2 Específicos..... | 12 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 12 |
| 2.1. Aço..... | 12 |
| 2.2. Tipos de perfis metálicos | 14 |
| 2.3. Estruturas metálicas | 17 |
| 2.4. Ações atuantes na estrutura | 20 |
| 2.5. Conexões e ligações metálicas | 23 |
| 2.6. Dimensionamentos de estruturas metálicas. | 24 |
| 3. . PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS..... | 27 |
| 3.1. Procedimentos de Análise e Comparação..... | 27 |
| 3.2. Ações atuantes na Estrutura | 28 |
| 3.2.1 Ações permanentes | 28 |
| 3.2.2 Ação do vento | 28 |
| 3.3. Realização do dimensionamento pelo Software | 31 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 35 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 41 |
| REFERÊNCIAS | 43 |

1. INTRODUÇÃO

No setor da construção brasileira, o emprego das estruturas metálicas está sendo cada vez mais utilizado, sendo a razão desta prevalência às inúmeras vantagens proporcionadas pelas peças metálicas industrializadas quando em comparação a outros sistemas de construção (BARRETO e HILLESHEIM 2023). Quanto a seleção da forma da cobertura das construções, esta exerce um papel impactante na maneira como as forças internas e externas são distribuídas, influenciando significativamente na eficiência estrutural (ROMAN 2016).

As estruturas da cobertura em aço oferecem diferentes vantagens significativas em projetos horizontais, sendo os condomínios logísticos, centros de distribuição e instalações industriais principais exemplos dos referidos projetos. Essas vantagens incluem a capacidade de criar amplos vãos livres sem a necessidade de pilares internos que poderiam obstruir as operações. Além desse fator determinante, o aço é altamente compatível com outros materiais de construção, otimizando seus recursos, incluindo materiais e mão de obra. A precisão construtiva é perceptível, o que se traduz em uma redução significativa das cargas sobre as fundações, permitindo uma estimativa de custos mais precisa. (CBCA 2020). Ademais, é notável que as estruturas em aço proporcionam a possibilidade de redução do tempo de execução do projeto em comparação com outros materiais. (BELLEI, PINHO, & PINHO, 2008).

Estima-se que, atualmente, o maior número de edificações em aço no Brasil seja composto por estruturas de caráter simples, tais como coberturas e edifícios de apenas um pavimento. Dentro do citado segmento, os galpões ganham força como as construções que se destacam ao oferecer soluções econômicas e versáteis, adequadas para uma ampla variedade de vãos e uma diversidade de aplicações na indústria e na construção civil. Esses usos

predominam desde pequenas fábricas até espaços de armazenamento, como depósitos. (GERDAU 2018)

A utilização do aço em coberturas metálicas garante uma série de benefícios, como a elevada relação de resistência-peso, facilidade de fabricação e montagem, além de uma considerável vida útil. Com a utilização de distintas geometrias de cobertura, a capacidade do aço de suportar cargas estáticas e dinâmicas ganha contornos diferentes, resultando em padrões de tensões e deformações que podem variar significativamente (ROCHA NETO, 2019). Esta análise se propõe a explorar essa variabilidade, investigando as respostas estruturais das coberturas metálicas de um galpão com distintas geometrias, todas elaboradas com o emprego do aço como material central.

Nesse cenário narrado, o presente estudo visa investigar a análise das cargas atuantes em coberturas metálicas, de distintas geometrias, buscando compreender como as diferentes formas afetam o desempenho estrutural, e o consumo do Aço.

1.1. Justificativa

A região norte do estado de Mato Grosso, especialmente nos municípios de Sorriso e Sinop, destaca-se como um polo agroindustrial em contínuo crescimento. Esse desenvolvimento intensifica a demanda por construções robustas e eficientes, particularmente galpões comerciais que atendam às necessidades logísticas e produtivas da região. Dentro deste contexto, as coberturas metálicas emergem como uma solução ideal, combinando resistência, durabilidade e versatilidade.

A utilização de coberturas metálicas é especialmente relevante devido à sua capacidade de suportar grandes vãos livres, o que é crucial para galpões. Além disso, a adaptação das formas geométricas dessas estruturas permite uma utilização mais eficiente do aço, resultando em significativas economias de material e custos. A otimização geométrica das coberturas também contribui para a sustentabilidade, reduzindo o desperdício e minimizando o impacto ambiental das construções.

Realizar uma pesquisa que analise as diferentes geometrias de coberturas metálicas para galpões comerciais proporciona uma base científica sólida para decisões de engenharia, oferecendo soluções otimizadas que atendem às especificidades locais. Ao compreender como as distintas formas de cobertura impactam o comportamento estrutural e o desempenho geral

das edificações, engenheiros e projetistas podem oferecer projetos mais eficientes, seguros e economicamente viáveis.

1.2. Problematização

Conforme afirmado por Andrade e Vellasco (p.01 -2016), a finalidade primordial de qualquer projeto de estruturas de aço reside na busca incessante pela otimização econômica da utilização deste material. O desenvolvimento do projeto estrutural, complementado por técnicas construtivas eficazes, é a resultante natural dessa meta, a qual só pode ser atingida mediante um aprofundado conhecimento do comportamento dos variados elementos estruturais e das conexões que constituem a integridade da estrutura como um todo.

Dentro desse contexto, a análise estrutural das diferentes geometrias empregadas em coberturas metálicas visa identificar a forma geométrica mais eficiente para a construção de um galpão, com o objetivo de minimizar o consumo de aço, ao mesmo tempo em que garanta a segurança da estrutura projetada.

Para a busca da otimização econômica na utilização do aço em estruturas, é primordial o entender o relacionamento intrínseco entre a geometria da cobertura metálica e o desempenho estrutural do galpão. A opção da geometria não é apenas uma alternativa estética, mas sim um fator criterioso influente na divisão de esforços, na estabilidade e na eficiência da estrutura proposta.

Portanto, é indispensável a realização de uma análise estrutural aprofundada das diferentes formas geométricas disponíveis, questionando-se: como as distintas geometrias de coberturas metálicas afetam a distribuição de esforços e o consumo de aço do galpão? E qual a melhor geometria a ser aplicada no momento de sua projeção?

1.3. Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar e comparar os esforços estruturais em coberturas metálicas de diferentes geometrias, visando compreender como as variações de design impactam no consumo de aço em kg/m² do galpão de proporção de 1:2.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma análise comparativa entre diferentes geometrias de cobertura metálicas, bem como identificar qual a cobertura mais eficiente em termos de consumo de aço.

- Dimensionar as concepções propostas de acordo com as normas técnicas vigentes através do uso de software estrutural.

- Obter o consumo de aço em kg/m^2 da edificação para cada concepção, e comparar os resultados obtidos em cada caso.

- Propor recomendações práticas para o projeto e dimensionamento de coberturas metálicas de diferentes geometrias, considerando as conclusões obtidas a partir das análises.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Aço

De acordo com Chiaverini (1966), o aço é definido como uma liga composta de ferro e carbono, em que o teor de carbono varia de 0,008% a 2,11%, aproximadamente, além de alguns elementos residuais resultantes dos processos de fabricação. Em termos do desenvolvimento econômico de uma nação, a fabricação de aço é um fator significativo. Contudo, a fabricação de produtos de aço requer técnicas que precisam ser constantemente atualizadas, o que leva as siderúrgicas a investirem constantemente em pesquisa e desenvolvimento (IABR, 2023).

Segundo o Instituto Aço Brasil (IABR, 2023), houve uma queda de 5,5%, na produção do aço, em relação à 2022, totalizando 34,1 milhões de toneladas. No cenário global, a indústria siderúrgica brasileira contribuiu com 1,8% da produção mundial, sustentando-se na 9ª posição entre os que mais produzem de aço no globo. Na América Latina, o Brasil permaneceu como o líder, sendo responsável por 54,9% da produção total de aço na região.

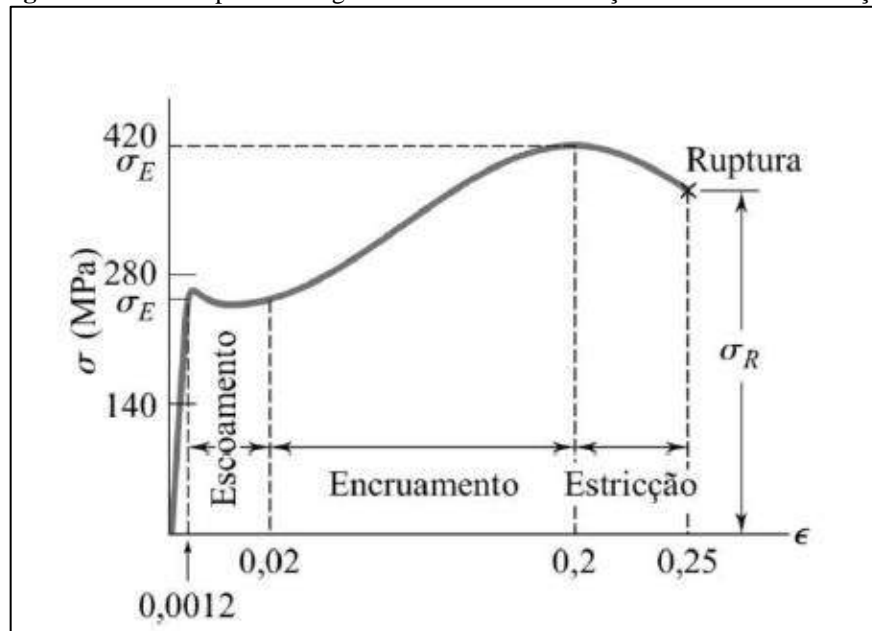
Nesse caminho, é importante consignar a relevância do aço na indústria, tanto nacional quanto global. Como apontado por Lima (2017, p. 22), as propriedades mecânicas do aço desempenham um papel fundamental na análise do seu comportamento estrutural. Essas propriedades são responsáveis por determinar como o aço reage sob cargas, influenciando sua capacidade de resistência e sua capacidade de transferir forças sem ocasionar rupturas ou deformações elevadas. Logo, compreender as referidas propriedades é de suma relevância para uma avaliação da eficácia do aço em suas diversas aplicações industriais e estruturais.

A ABNT NBR 8800 (2008) estabelece diretrizes normativas essenciais para a execução de estruturas de aço, detalhando e padronizando as propriedades mecânicas críticas e os valores correspondentes a serem adotados para fins de cálculo, que são os seguintes:

- Módulo de elasticidade, $E = 200\,000\text{ MPa}$;
- Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,3$;
- Módulo de elasticidade transversal, $G = 77\,000\text{ MPa}$;
- Coeficiente de dilatação térmica, $\beta = 1,2 \times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;
- Massa específica, $\rho = 7\,850\text{ kg/m}^3$

Para uma compreensão mais evidente, é possível averiguar o gráfico de tensão-deformação apresentado a seguir na Figura 1, que ilustra o comportamento do aço durante um teste de tração:

Figura 1: Gráfico típico de diagrama e tensão x deformação de um ensaio de tração



Fonte Mecânica dos materiais (2021).

A figura 1 citada acima, nos permite analisar o estágio inicial chamado regime elástica ocasião em que as tensões são diretamente proporcionais às deformações. No referido estágio, não há alterações visíveis no material, bem como as suas propriedades não são perdidas à medida que é submetido a uma elevação de carga. A citada relação é reputada como Lei de Hooke e é estabelecida pelos seguintes parâmetros: (E) Módulo de elasticidade, (σ) tensão normal e (ϵ) deformação.

Os materiais têm diferentes diagramas tensão-deformação, mas podem ser categorizados como dúcteis ou frágeis. Materiais dúcteis, como o aço, podem fluir sob carga. Após atingir uma tensão crítica, sofrem grande deformação, seguida de estricção. A ruptura ocorre no decorrer de uma superfície cônica devido a tensões de cisalhamento. O alongamento

pode ser até 200 (duzentas) vezes mais elevada do que no início. As tensões são denominadas resistência ao escoamento (σ_E), limite de resistência (σ_L) e resistência à ruptura (σ_R) (BEER, JOHNSTON, DEWOLF E MAZUREK 2021).

2.2. Tipos de perfis metálicos

Os perfis metálicos desempenham um papel de extrema importância dentro de um projeto, fabricação e na montagem de estruturas metálicas. São considerados componentes fundamentais, juntamente com outros elementos, como chapas de ligação, parafusos e chumbadores, todos com o propósito de garantir a integridade e a estabilidade das estruturas. Desta maneira, os perfis metálicos possuem a responsabilidade de conferir resistência, suportar as cargas, bem como distribuí-las adequadamente, além de determinar a forma e a geometria da estrutura. Portanto, a escolha e o dimensionamento conveniente dos perfis são determinantes para o êxito de qualquer projeto de estrutura metálica (SILVA e FRUCHTENGASRTEN, 2012).

Em relação aos perfis metálicos comumente utilizados, é importante destacar que esses perfis apresentam seções transversais que se assemelham às letras H, I, L, U e Z. Cada um deles recebe um nome que reflete essa semelhança, exceto o perfil cuja seção transversal se parece com a letra L, que é comumente chamado de 'cantoneira'. Além desses tipos mencionados, há também um perfil peculiar chamado de cartola, devido à sua forma que lembra a aba de um chapéu. Esses perfis podem ser obtidos por diferentes métodos de fabricação: laminação, soldagem ou através de operações de conformação a frio. São denominados, respectivamente, de perfis laminados, soldados e formados a frio (SILVA e FRUCHTENGASRTEN, 2012).

Os perfis laminados, são fabricados através de um processo chamado laminação a quente, que envolve a transformação mecânica de metais para torná-los adequados para sua finalidade de uso. Referidos perfis têm uma ampla gama de aplicações em setores como a construção civil, a indústria naval, as fundações e várias indústrias. Contudo, eles possuem algumas limitações na fabricação devido ao processo de laminação, que impõe restrições quanto às dimensões das seções transversais, especialmente em relação à altura das mesmas (AMORIM, 2019).

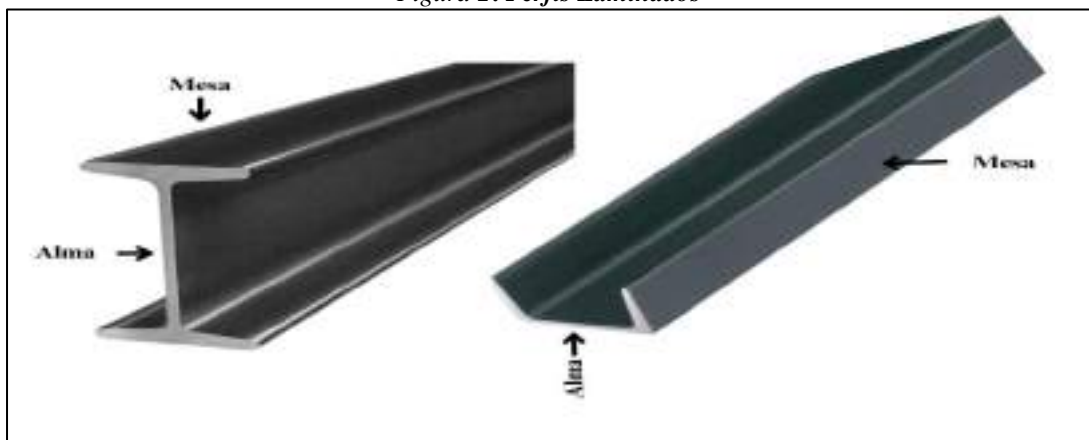
Por outro lado, os perfis soldados são chapas de aço estrutural ou perfis laminados unificados entre si através de solda elétrica. Eles são amplamente utilizados, principalmente, quando os perfis laminados não atendem as necessidades em decorrência da pouca variedade de seções transversais, que distintamente dos perfis soldados, admitem diversas combinações

de larguras, alturas e espessuras, auxiliando na redução do peso quando em comparação aos perfis laminados disponíveis (SILVA e FRUCHTENGASRTEN, 2012).

Os perfis estruturais formados a frio, conforme definido na norma ABNT NBR 14762 (2010), são produzidos de duas maneiras principais. A primeira é por meio do processo de dobramento em uma prensa dobradeira, onde tiras cortadas de chapas ou bobinas de aço são dobradas para criar a forma desejada do perfil. A segunda abordagem envolve a conformação contínua, em que o aço é moldado em sua forma final por meio de um conjunto de matrizes rotativas, resultando no perfil estrutural desejado.

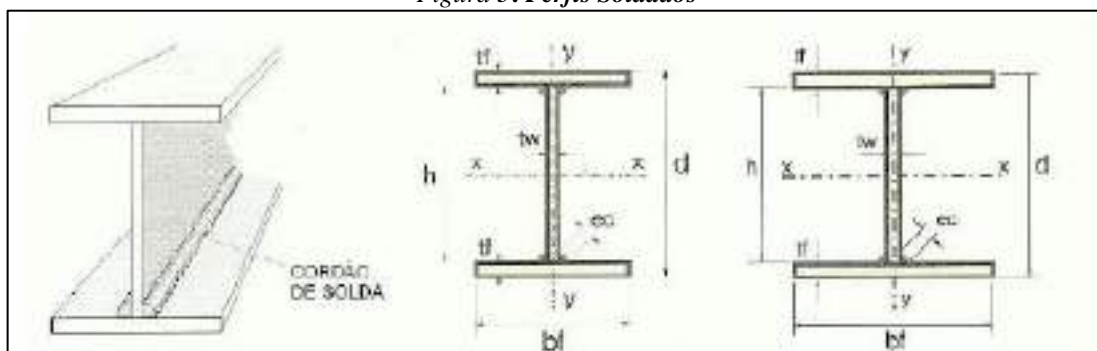
Os perfis formados a frio são criados através do dobramento de chapas e são compostos por três elementos planos: a mesa, a alma e os enrijecedores. Segundo, Teixeira (2020, p. 24), os enrijecedores são definidos como elementos adicionados ao perfil para aumentar a capacidade de carga da seção, principalmente no que diz respeito à flambagem local. Eles podem ser adicionados ao longo do elemento ou na sua extremidade. Para uma compreensão mais clara, é possível examinar as figuras 2, 3 e 4 que destacam algumas das diferenças entre os tipos de perfis metálicos.

Figura 2: Perfis Laminados



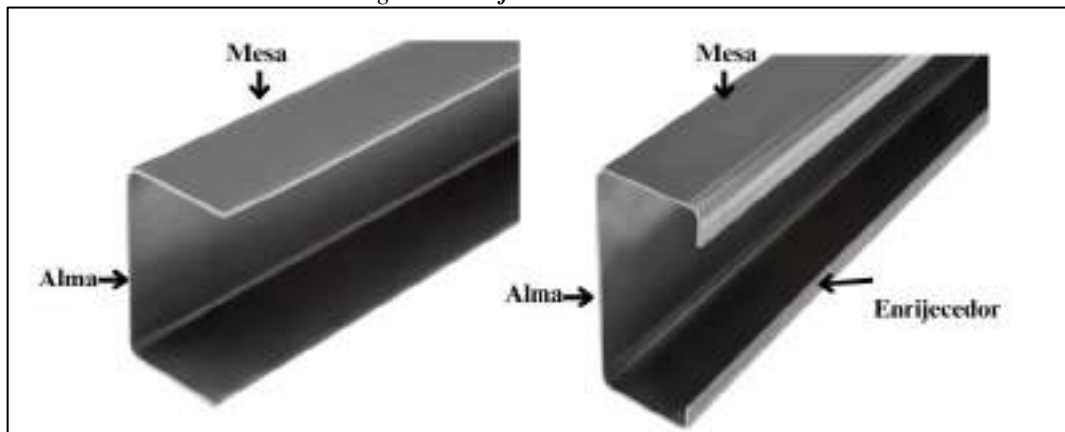
Fonte: Adaptado de New Aço (2024)

Figura 3: Perfis Soldados



Fonte: Dias (2006)

Figura 4: Perfis Formados a Frio



Fonte: Adaptado de Gravia (2024)

A NBR 8800 (ABNT, 2008) e a NBR 14762 (ABNT, 2010), estabelecem requisitos básicos relacionados ao projeto de estruturas de aço. No entanto, elas se aplicam a tipos distintos de estruturas e têm focos ligeiramente diferentes. A NBR 8800 (ABNT, 2008) é responsável por estabelecer diretrizes para o desenvolvimento de estruturas de aço, na utilização de perfis laminados e soldados, ou de seção tubular, com ou sem costura, já a NBR 14762 (ABNT, 2010) traz informações em relação ao dimensionamento de estruturas de aço compostas por perfis formados a frio.

De acordo com Silva e Fruchtengarten (2012), é comum não encontrarmos perfis laminados com as dimensões exatas necessárias para projetos de elementos estruturais leves, como terças, montantes, diagonais de treliças, travamentos e outros, disponíveis no mercado. No entanto, os perfis estruturais formados a frio, também conhecidos como perfis de chapas dobradas, podem ser fabricados com as dimensões desejadas. Por essa razão, eles estão se tornando cada vez mais populares na construção de estruturas metálicas leves. Uma grande vantagem desses perfis é a capacidade de serem projetados sob medida para atender a necessidades específicas de aplicação. Eles são compostos por chapas finas, tornando-os leves, fáceis de manusear, fabricar e transportar.

Além disso, possuem resistência e ductilidade adequadas para uso de estruturas metálicas, como por exemplo, os galpões. No entanto, é importante lembrar que esses perfis apresentam um comportamento diferente em comparação aos perfis laminados e soldados.

2.3. Estruturas metálicas

As estruturas metálicas são compostas por peças que são interligadas entre si. Essas ligações são estabelecidas por meio de solda e conectores, como parafusos. Um dos principais usos das estruturas metálicas é na construção de coberturas de grande vão, especialmente as de natureza industrial (CARNASCIALI, 1974). Essas estruturas são amplamente empregadas em projetos industriais devido à sua capacidade de cobrir grandes áreas de forma eficiente e econômica. A capacidade de realizar essas coberturas de vãos amplos é uma das características distintivas das estruturas metálicas, tornando-as uma escolha comum na indústria (GERDAU 2018). Diante disso os Galpões os galpões são um exemplo notável de aplicação das estruturas metálicas.

O Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA, 2010) caracterizam os galpões metálicos como estruturas construídas predominantemente com aço. Geralmente, esses galpões consistem em um único pavimento e são compostos por um sistema de pórticos que estão uniformemente distribuídos. A cobertura desses galpões é sustentada por terças, vigas ou até mesmo tesouras e terças, o que permite a abrangência de grandes áreas.

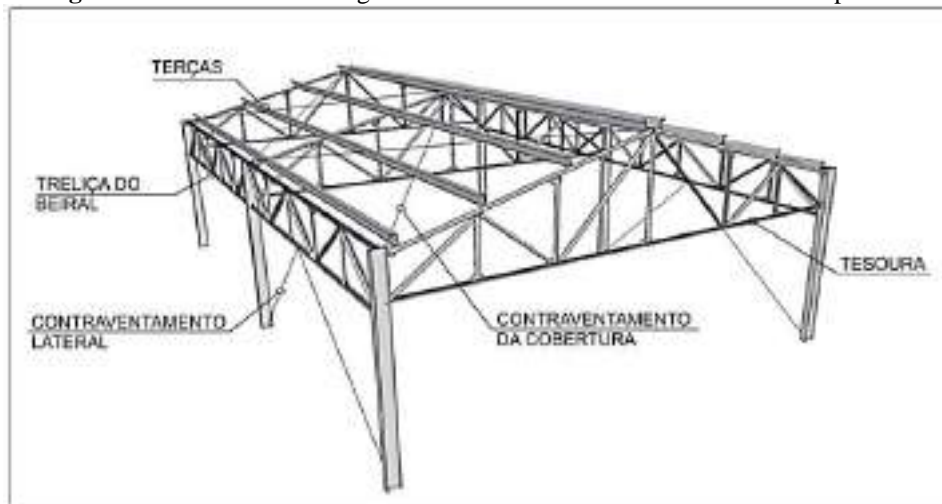
Quanto a tipologia dos galpões, o mercado oferece uma ampla variedade de opções de construção e configurações possíveis. Segundo o Centro Brasileiro de Construção em Aço, (CBCA, 2010), é possível a escolha entre diversas formas de construção, sendo que cada opção possui suas características e benefícios específicos. Essa diversidade de alternativas permite que os projetos de galpões sejam adaptados de acordo com as necessidades individualizadas, considerando fatores como o espaço disponível, carga a ser suportada, funcionalidade desejada e requisitos estéticos. Portanto, a escolha da configuração adequada é crucial para garantir que o galpão atenda de forma eficaz às exigências de sua finalidade.

As Principais Configurações Adotas no Mercado de acordo o Centro Brasileiro de Construção em Aço (CBCA, 210), são as Seguintes: duas águas com cobertura de tesoura e colunas em perfil I; duas águas com perfis I laminados ou soldados; duas águas, com viga de ponte rolante, apoiada em coluna com console; coluna treliçada para receber a coluna da cobertura e o apoio da viga de rolamento de ponte rolante; geminado com quatro meias-águas; geminado com duas meias-águas; geminado com meias-águas no sentido transversal; tipo Shed com vigas mestras treliçadas; tipo Shed com pórticos em perfis I, vigas mestras e secundárias em treliças; Galpão em arco.

Essas configurações oferecem distintas alternativas de projeto, permitindo que os galpões sejam adaptados para atender a uma variedade de necessidades e requisitos específicos

de uso. A Figura 5 demonstrada a seguir, representa uma estrutura metálica com a indicação de alguns elementos.

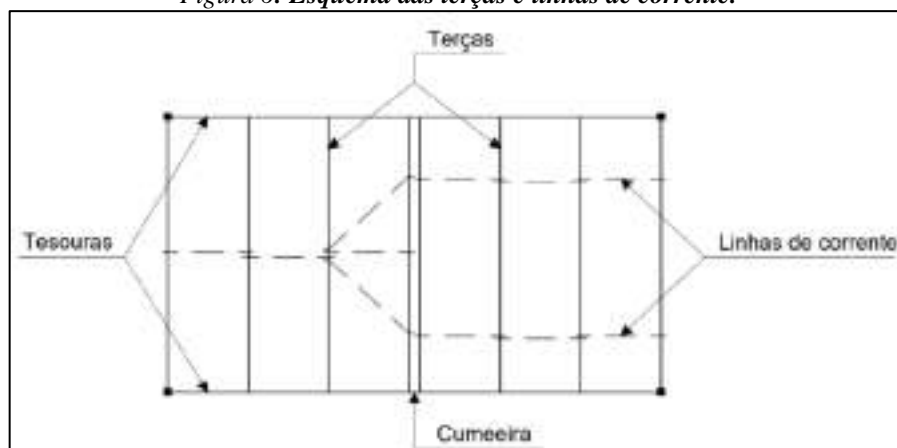
Figura 5: Edifício em duas águas com cobertura de tesoura e colunas em perfil I.



Fonte: CBCA (2010).

Quando se trata dos elementos que compõem a estrutura, de acordo com Pfeil e Pfeil (2022), as terças são vigas longitudinais, geralmente com vãos de cerca de 6 metros, localizadas nos planos da cobertura. Sua função principal é transferir as cargas atuantes nesses planos para a estrutura principal, incluindo o peso do telhado e as pressões de vento, tanto de pressão quanto de sucção causadas pelo vento. As cargas de vento (V) causam flexão reta nas terças em torno do eixo de maior inércia, enquanto as cargas gravitacionais (G) resultam em flexão oblíqua. O espaçamento entre as terças é determinado pelo tamanho das chapas que compõem o telhado, variando geralmente de 2 a 4 metros para chapas metálicas. A Figura 6 a seguir ilustra a disposição das terças.

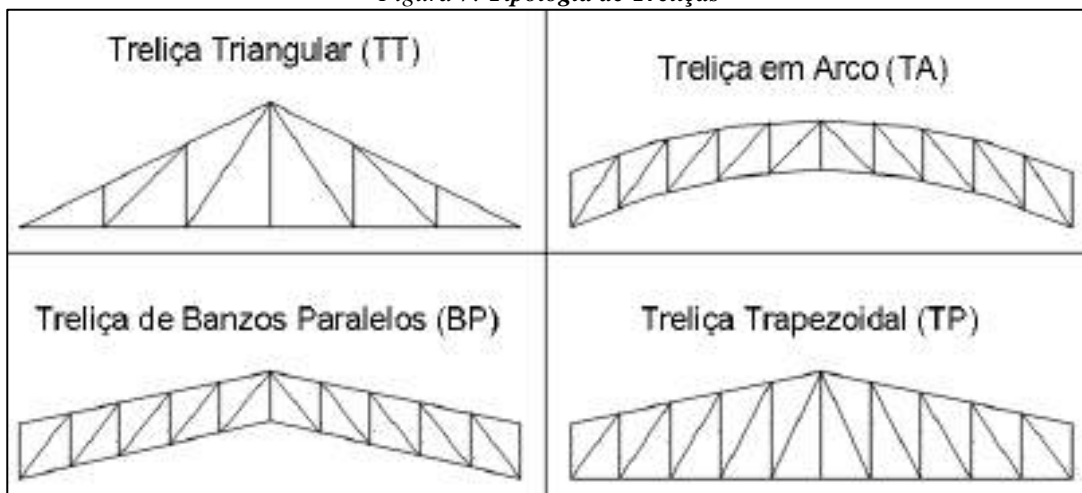
Figura 6: Esquema das terças e linhas de corrente.



Fonte: Rocha Neto (2019).

Em relação às treliças, de acordo com Pfeil e Pfeil (2022), estas consistem em conjuntos de segmentos de hastes que se conectam em pontos denominados nós, formando uma configuração geométrica estável de base triangular. Essa configuração pode ser classificada como isostática (ou seja, estaticamente determinada) ou hiperestática (estaticamente indeterminada). As estruturas de treliça são particularmente adequadas para uso em construções metálicas, onde os perfis são fabricados em segmentos de comprimento limitado. Elas oferecem uma solução versátil e eficaz para diversas aplicações de engenharia. A Figura 7 a seguir ilustra diferentes tipos de treliças, incluindo a treliça triangular, a treliça em arco, a treliça de banzos paralelos e a treliça trapezoidal.

Figura 7: Tipologia de Treliças

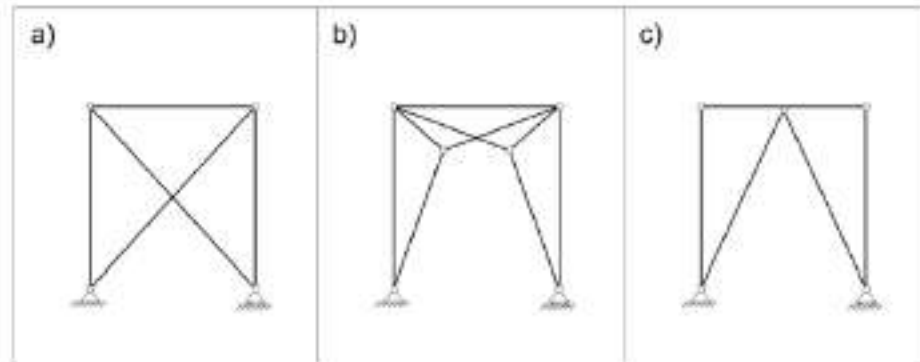


Fonte: Casarin e Hillesheim (2023).

Além disso, há sistemas estruturais chamados de contraventamento que consistem em treliças e pórticos dispostos verticalmente em planos paralelos, como habitualmente encontrados em coberturas e estruturas de galpões, devem ser reforçados para garantir sua estabilidade lateral e reduzir o risco de flambagem das partes sob compressão (PFEIL, PFEIL 2022).

Como explicado por Matos (2014, p. 14), contraventamentos são componentes compostos por barras adicionadas às estruturas com o propósito de reduzir ou impedir movimentos horizontais. Eles são principalmente utilizados para conferir estabilidade a estruturas que estão sujeitas à ação do vento e pode ser empregado tanto na direção vertical (para reforçar vigas e pilares) quanto na direção horizontal (para reforçar coberturas).

Figura 8: Formas de contraventamento: a) travamento em X; b) travamento em Y; c) travamento em



Fonte: Rocha Neto (2019)

Existem diversas maneiras de implementar o travamento de uma estrutura, sendo as configurações mais comuns em forma de "X", "Y" e "K". A Figura 8 ilustra essas formas de contraventamento em um modelo simplificado. (ROCHA NETO, 2019)

2.4. Ações atuantes na estrutura

As normas técnicas NBR 8800 (ABNT, 2008); NBR 6120 (ABNT, 2019) e NBR 8681 (ABNT, 2003) abordam as cargas que devem ser avaliadas durante a análise estrutural, as quais podem resultar em impactos substanciais na integridade da estrutura. Estas normas são elaboradas com o propósito de considerar os estados-limites de serviço, envolvendo cargas permanentes e cargas variáveis, bem como os estados-limites últimos, relacionados a cargas excepcionais.

As supracitadas normas definem as ações permanentes como, cargas que permanecem constantes e estáveis durante a vida útil da estrutura, sendo incluso o peso dos elementos estruturais e outros componentes que não sofrem variações significativas ao longo desse período. Além disso, também são consideradas como ações permanentes, as ações que crescem gradualmente com o tempo, reunindo-se a um valor-limite permanente.

Se dividem em ações permanentes diretas e indiretas. As ações permanentes diretas englobam o próprio peso da estrutura, bem como os próprios pesos dos elementos construtivos permanentes e das instalações fixas. Ademais, essa categoria acolhe os empuxos permanentes, que podem ser resultados de movimentos de terra e outros materiais granulares quando sua remoção é impossível. Ao contrário, as ações permanentes indiretas envolvem deformações que influenciam a estrutura ao longo do tempo, como aquelas ocasionadas pela retração e naturalidade do concreto, deslocamentos nos trechos de apoio e ausência de perfeição

geométricas. É relevante rememorar que é fundamental considerar seus valores representativos mais desfavoráveis para a garantia da segurança da estrutura.

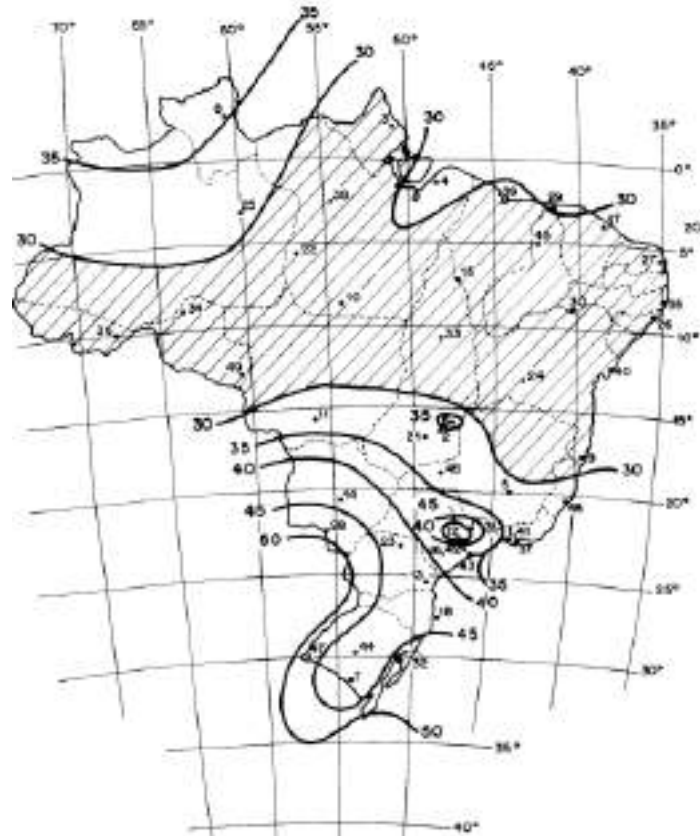
A ABNT NBR 8800 (2008) cita que em relação as ações variáveis, estas se referem a cargas que demonstram variações relevantes no decorrer da vida útil da construção. Referidas variações geralmente são ocasionadas pelo uso e ocupação da edificação, como as ações relacionadas à sobrecargas em pisos e coberturas, de equipamentos e de divisórias móveis, de pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas, bem como pela influência do vento e pela alteração da temperatura da estrutura.

As ações variáveis provocadas pelo uso e ocupação são especificadas no Anexo B, da NBR 6120 (ABNT, 2019) enquanto os esforços resultantes da ação do vento devem ser determinados de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988). A NBR 8800 (ABNT, 2008), prevê como sobrecarga nominal mínima, para coberturas comuns (telhados), uma sobrecarga mínima de $0,25 \text{ kN/m}^2$, em projeção horizontal, essa sobrecarga engloba as cargas provenientes de instalações elétricas e hidráulicas, isolamento acústico e pequenas peças eventualmente fixadas na cobertura.

Já para esforços causados pelas ações do vento, a NBR 6123 (ABNT, 1988), traz todas as considerações necessárias. É fundamental ter em mente que, para estruturas esbeltas, como galpões, pavilhões, ginásios, e outras com grandes vãos livres, a análise das ações do vento é de extrema importância. O vento é resultado das variações de temperatura e pressão na atmosfera, e, por conseguinte, os esforços exercidos dependem diretamente da velocidade das massas de ar. Vale destacar que essa velocidade varia conforme a localização geográfica da estrutura. Portanto, a análise cuidadosa das condições do vento é essencial para garantir a estabilidade e segurança dessas construções.

A norma NBR 6123 (ABNT, 1988) define a velocidade básica do vento (V_0) como a maior velocidade média registrada em um intervalo de 3 segundos, que tem uma probabilidade média de ser ultrapassada somente uma vez a cada 50 anos, a uma elevação de 10 metros acima do nível do solo, em uma área desobstruída e plana. A Figura 9 a seguir mostra as velocidades básicas para diferentes regiões do Brasil, agrupadas em intervalos de 5 metros por segundo (m/s).

Figura 9: Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s).



Fonte: ABNT NBR 6123:1988.

É importante consignar que o vento básico pode incidir de diversas direções (PRAVIA e DREHMER, 2004). Nesse contexto, a norma mencionada fornece critérios a serem considerados no cálculo dessa velocidade, que incluem três principais fatores: o fator topográfico (S_1), o fator relacionado à rugosidade do terreno, às dimensões da edificação e à altura acima do terreno (S_2), bem como o fator estatístico (S_3). Através da Figura apresentada acima, observa-se que a velocidade do Vento na Região de Sorriso é de 30m/s.

Pravia e Drehmer (2004) observaram que, quando o vento incide sobre uma superfície, ele gera uma sobre pressão (com sinal positivo). Entretanto, em alguns casos, pode ocorrer o fenômeno oposto, que é a sucção (com sinal negativo). Nesse sentido, para os edifícios com paredes internas permeáveis, a norma NBR 6123 (ABNT, 2019) menciona que a pressão interna pode ser considerada uniforme.

A norma NBR 8800 (ABNT, 2008) estabelece como sendo as ações excepcionais aquelas de menor duração e com uma probabilidade muito baixa de ocorrerem durante a vida útil da construção, contudo, ainda assim devem ser consideradas no projeto de determinadas estruturas. Essas ações podem ser resultantes de eventos como colisões de veículos, explosões, inundações, incêndios e terremotos.

No projeto de estruturas sujeitas a carregamentos excepcionais, onde os efeitos não podem ser mitigados por outros meios, é fundamental incorporar ações excepcionais com valores determinados de acordo com normas brasileiras específicas, adaptados a cada situação particular. Isso garante que a estrutura seja projetada para resistir a eventos raros, porém críticos, assegurando a segurança tanto dos ocupantes quanto da própria construção (ABNT NBR 8800:2008).

2.5. Conexões e ligações metálicas

As peças metálicas são fabricadas com dimensões padronizadas e limitadas devido à capacidade dos laminadores e à restrição dos veículos que as transportam (PFEIL e PFEIL 2022). As estruturas metálicas são formadas por combinações de peças interconectadas, usando ligações por solda ou conectores, como parafusos.

Os parafusos têm três partes: a rosca, a cabeça e o fuste. Eles são identificados comercialmente pelo diâmetro nominal, mas sua resistência à tração depende do diâmetro efetivo. Existem dois tipos principais de parafusos: comuns e de alta resistência. Os parafusos comuns são feitos de aço com baixo teor de carbono, com cabeças e porcas geralmente quadradas, identificados como A307 pela ASTM e ISO 4.6. Os parafusos de alta resistência são produzidos com aço de teor médio de carbono, submetidos a tratamento térmico, e têm cabeças e porcas hexagonais, identificados como ASTM A325 ou A490 (ANDRADE E VELLASCO, 2016).

As conexões soldadas são a união de duas ou mais peças estruturais, mantendo suas propriedades mecânicas e químicas. Elas oferecem algumas vantagens, como maior rigidez das ligações e redução de custos de fabricação. Além disso, as conexões soldadas são mais compactas do que as conexões parafusadas, resultando em economia de material. Também são mais fáceis de pintar, limpar e implementar em estruturas em geral (POMPERMAYER, 2018).

A soldagem é um processo de ligação no qual as camadas do material das peças a serem unidas são fundidas, preservando suas propriedades mecânicas e químicas. O método mais comum de soldagem em estruturas de aço é a soldagem por arco voltaico, onde o calor necessário para a fusão é gerado por um arco elétrico entre um eletrodo e as partes a serem unidas (ANDRADE E VELLASCO, 2016). Em resumo, as conexões soldadas oferecem várias vantagens em comparação com as conexões por parafusos.

2.6. Dimensionamentos de estruturas metálicas.

Um projeto estrutural tem como principal objetivo garantir que uma estrutura seja segura e não colapse, evitando danos, movimentos indesejados e vibrações excessivas (POMPERMAYER, 2018). Na fase inicial do projeto, decide-se quais materiais usar, que tipos de perfis estruturais utilizar e quais conexões serão usadas na construção da estrutura. Em seguida, nas etapas de dimensionamento e detalhamento, aplica-se regras e critérios específicos de acordo com as normas técnicas relevantes para cada tipo de estrutura. Isso inclui uma análise minuciosa de fatores como cargas, tensões e deslocamentos, entre outros, para garantir que a estrutura seja construída de maneira segura e atenda aos padrões de qualidade e conformidade exigida pelos órgãos reguladores.

Em resumo, o projeto estrutural é um processo complexo e crucial que começa com a escolha dos materiais e se estende até a análise detalhada das características da estrutura, tudo com o objetivo de assegurar sua estabilidade e segurança ao longo de sua vida útil (KASSIMALI, 2016). No dimensionamento de estruturas metálicas, é essencial considerar os esforços e reações a que a estrutura estará submetida. Alguns dos principais fatores a serem analisados durante o processo de dimensionamento incluem o Índice de Esbeltez, Estados Limites Últimos e de Serviço, Flambagem Local e Flambagem Distorcional.

Segundo a ABNT NBR 6118 (2023), o índice de esbeltez (λ) de um elemento é definido como a relação entre seu comprimento e o menor raio de giração da seção transversal. O estudo da esbeltez em peças submetidas à tração não costuma ser de grande importância, uma vez que a força de tração tende a alinhar a peça, minimizando excentricidades construtivas iniciais (PFEIL e PFEIL 2022).

Além disso, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), é fundamental considerar tanto o Estado-Limite Último (ELU) quanto o Estado-Limite de Serviço (ELS) no dimensionamento de estruturas. O Estado-Limite Último está diretamente associado ao colapso da estrutura, resultando na inutilização da mesma, apresentando danos graves à estabilidade e, em alguns casos, até levando à ruína estrutural. O Estado-Limite de Serviço, por outro lado, está relacionado à utilização normal da estrutura, mantendo a boa aparência e o conforto para os usuários, além de preservar a integridade e durabilidade. Na verificação dos estados-limites últimos e estados-limites de serviço, é essencial garantir que a resistência de cada elemento estrutural seja igual ou superior às solicitações de cálculo.

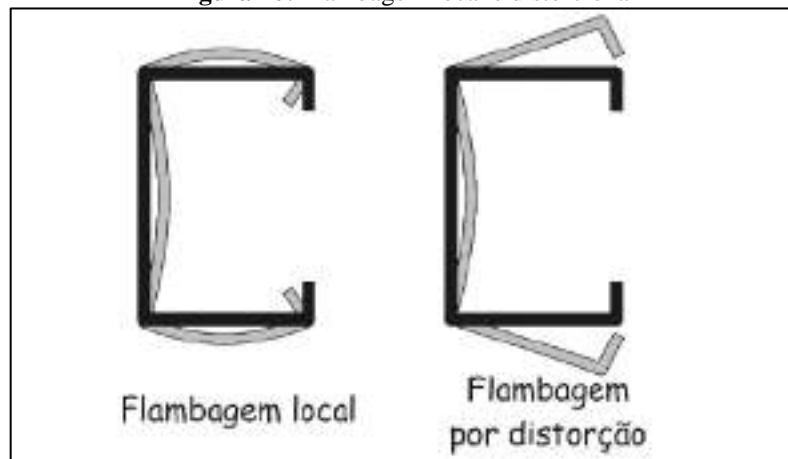
Já a flambagem é definida pelas principais escolas brasileiras, como a ocorrência de um ponto de bifurcação no diagrama de força em relação ao deslocamento de um ponto de uma

barra ou chapa submetida a compressão. No entanto, em elementos estruturais reais, na presença de imperfeições, esse ponto de bifurcação não ocorre, o que, de acordo com essa definição, implica que a flambagem não acontece. Portanto, é essencial distinguir a flambagem da flexão composta (SILVA, PIERIN, PIGNATTA, 2014).

No dimensionamento de perfis dobrados, é crucial considerar os tipos de flambagem, a flambagem local e a flambagem por distorção. A flambagem local ocorre quando o elemento da seção transversal sofre flexão, resultando em um deslocamento ou mudança de ângulo. Essa instabilidade provoca a redução da rigidez dos perfis e deve ser levada em conta no cálculo de resistência (COSTA, 2013).

Por outro lado, a flambagem por distorção é caracterizada pela alteração na forma inicial da seção transversal, o que resulta na rotação dos elementos submetidos à compressão. Esse fenômeno se torna mais evidente em aços de alta resistência, em elementos com maior relação entre a largura da mesa e a largura da alma, em elementos com menor largura do enrijecedor de borda e em seções cujos elementos são menos esbeltos. Em tais casos, a carga crítica de flambagem por distorção pode ser menor do que a da flambagem local (SILVA, PIERIN, PIGNATTA, 2014). A Figura 10 ilustra a diferença entre esses dois tipos de flambagem mencionados.

Figura 10: Flambagem local e distorcional



Fonte: Silva Perin Pignatta (2014).

A ABNT NBR 14762 (2010) oferece três métodos para o dimensionamento dos Perfis Formados a Frio, cada um com sua abordagem específica para considerar a flambagem local e distorcional, sendo eles:

Método da Largura Efetiva (MLE): Consideram a flambagem local das barras, utilizando propriedades geométricas efetivas (reduzidas) da seção transversal, propriedades

calculadas com base nas larguras efetivas dos elementos da seção que estão totalmente ou parcialmente comprimidos. Além disso, o método leva em consideração a flambagem distorcional em casos de barras submetidas à compressão ou flexão.

Método da Seção Efetiva (MSE): Assim como o MLE, este método também considera a flambagem local das barras, porém utiliza propriedades geométricas efetivas da seção transversal das barras, calculadas diretamente, de acordo com as especificações para barras submetidas à compressão ou flexão. Também é necessário considerar a flambagem distorcional em casos de barras submetidas à compressão ou flexão.

Método da Resistência Direta (MRD): Se baseia nas propriedades geométricas da seção bruta das barras, envolvendo uma análise abrangente de estabilidade elástica que permite identificar todos os modos de flambagem possíveis e seus respectivos esforços críticos. Este método pode ser usado como uma alternativa aos métodos da largura efetiva e o método da seção efetiva.

3. . PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1. Procedimentos de Análise e Comparação

Realizaram-se análises e comparações das geometrias de tesouras planas em coberturas de estruturas metálicas de um galpão comercial. O principal objetivo destas análises foi avaliar o consumo de aço em diferentes configurações geométricas e identificar qual formato de galpão apresentou o menor consumo de aço por metro quadrado. Para isso, examinaram-se doze coberturas de galpões metálicos destinados a uso geral, buscando determinar a alternativa geométrica mais eficiente.

Neste estudo, foram examinados modelos de galpões com cobertura de duas águas, todos padronizados com 20 metros de largura por 40 metros de comprimento, totalizando em uma área total de 800 m². A estrutura conta com pórticos dispostos a cada cinco metros, e um pé direito de cinco metros. A configuração escolhida para os pórticos foi a de treliça com banzos paralelos.

Em relação aos componentes estruturais, adotou-se o perfil U simples para os banzos superiores e inferiores, e para as diagonais e montantes, foram escolhidos perfis duplo L. já as terças foram construídas com perfis em U enrijecido, também conhecidos como perfis C. A estrutura também foi reforçada com componentes auxiliares, incluindo Flay Braces em perfil L, correntes e frechais fabricados em tubos e perfil L, e elementos de contraventamentos, também executados com Tubos Laminados.

O material utilizado foi o aço ASTM A36, que oferece resistência ao escoamento de 250 MPa e resistência à ruptura entre 400 e 550 MPa, segundo a norma ABNT NBR 8800:2008. Cabe ressaltar que a análise se concentrou unicamente na estrutura da cobertura metálica, sem abordar o dimensionamento de pilares ou fundações. Na Tabela 1 apresentam-se os modelos analisados abaixo.

Tabela 1: Dimensões para os Galpões de duas Águas

| Vão | L = 20 Metros | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| Inclinação | 10% | | | | | | 15% | | | | | |
| Distância entre banzos (m) | 0,5 | | 0,75 | | 1 | | 0,5 | | 0,75 | | 1 | |
| Distância Entre Montantes (m) | 0,5 | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,5 | 0,7 |

Fonte: Própria (2024).

O dimensionamento da estrutura foi realizado por meio do software CypeCad, na versão 2020, em conformidade com as normas técnicas vigentes. Foram adotados perfis de aço formados a frio, seguindo as diretrizes da NBR 14762 (ABNT, 2010). Esta norma estabelece critérios essenciais para o enquadramento de estruturas de aço formadas a frio, assegurando a adequação e segurança do projeto. O estudo paramétrico abordou as seguintes variáveis:

- Distâncias entre os banzos;
- Distância entre os montantes da treliça;
- Inclinação do telhado

3.2. Ações atuantes na Estrutura

As cargas atuantes nas estruturas foram analisadas conforme o anexo B da NBR 8800 (ABNT,2008), NBR 6120 (ABNT,1980) e NBR 6123 (ABNT,1988).

3.2.1 Ações permanentes

Para as cargas permanentes, foram considerados o peso próprio da estrutura metálica, determinado automaticamente pelo software CypeCad 3D 2020, o peso das telhas, levando em conta a utilização de telhas termoacústicas com EPS (isopor) e chapas de espessura de 0,50 mm, com um peso de 4,28 kg/m². Além disso, foi considerada uma sobrecarga de 0,25 kN/m², conforme recomendado pela norma NBR 8800 (ABNT, 2008).

3.2.2 Ação do vento

Quanto às cargas variáveis, destacamos a ação do vento. As forças estáticas devidas ao vento foram determinadas conforme o subitem 4.2 da NBR 6123 (ABNT,1988). Seguindo as diretrizes da norma, a velocidade básica do vento para a região de Sorriso/MT foi estabelecida em 30 m/s, baseada no mapa de isopletas apresentado na Figura 9 deste estudo. Ademais, foi considerado o fator topográfico (S1), a rugosidade do terreno, as dimensões da edificação, e a altura sobre o terreno (Fator S2) e o fator estatístico (S3).

Os valores adotados foram extraídos do software Visual Ventos, que se trata de um software educacional desenvolvido pela Universidade de Passo Fundo (UPF) que tem como objetivo determinar as forças devidas ao vento em edifícios de planta retangular e cobertura a duas águas, seguindo as prescrições da norma NBR 6123:1988. Este programa é especialmente útil para engenheiros civis na análise de estruturas metálicas e na verificação de cargas de vento, oferecendo uma interface prática e intuitiva para os cálculos necessários.

Dentro da interface do software, primeiramente, foram inseridos os dados geométricos do galpão, incluindo altura, largura, comprimento, distância entre pórticos e inclinação do telhado. Em seguida, verificou-se a situação da edificação para a determinação dos fatores s1, s2 e s3, conforme as normas de dimensionamento. Para o fator s1, adotou-se a classificação de terreno plano fracamente acidentado, o que reflete a topografia do local e sua influência nos esforços de vento sobre a estrutura.

No caso do fator s2, escolheu-se a categoria IV: "Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados em zona florestal, industrial ou urbanizados", considerando que a cota média do topo dos obstáculos é igual a 10 metros. Adotou-se a classe B, que caracteriza o tipo de superfície do terreno, influenciando a rugosidade e, conseqüentemente, a distribuição das cargas de vento. Para o fator s3, consideraram-se edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação, o que reflete a densidade de ocupação e uso do espaço interno da edificação.

Para uma inclinação de 10%, os valores obtidos foram $S1 = 0,1$; $S2 = 0,78$; e $S3 = 0,95$. Já para uma inclinação de 15%, os valores foram $S1 = 0,1$; $S2 = 0,79$; e $S3 = 0,95$. Com esses valores, foi possível calcular os valores de Vk (velocidade característica do vento) e q (pressão dinâmica de referência), que foram gerados automaticamente pelo software. Esses resultados são cruciais para a análise estrutural, pois determinam as cargas de vento atuantes na estrutura, conforme os parâmetros estabelecidos pela norma.

Esses resultados podem ser observados na Tabela 2, que apresenta os valores calculados de Vk e q para diferentes inclinações do telhado, permitindo uma análise comparativa e a seleção das condições mais adequadas para o projeto.

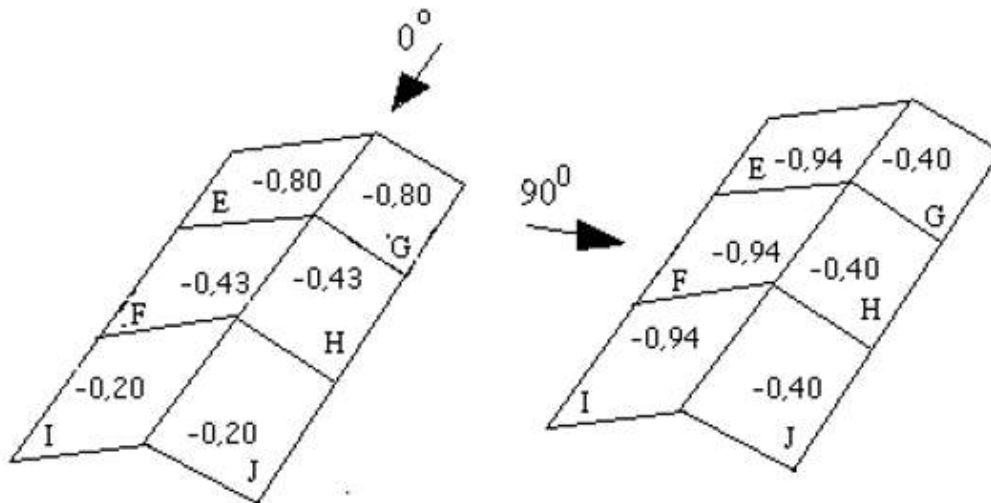
Tabela 2: Valores de V_k e “ q ” para as Diferentes Inclinações

| | V_k (m/s) | q (kN/m ²) |
|----------------|-------------|--------------------------|
| Inclinação 10% | 22,27 | 0,3 |
| Inclinação 15% | 22,5 | 0,31 |

Fonte: Própria (2024).

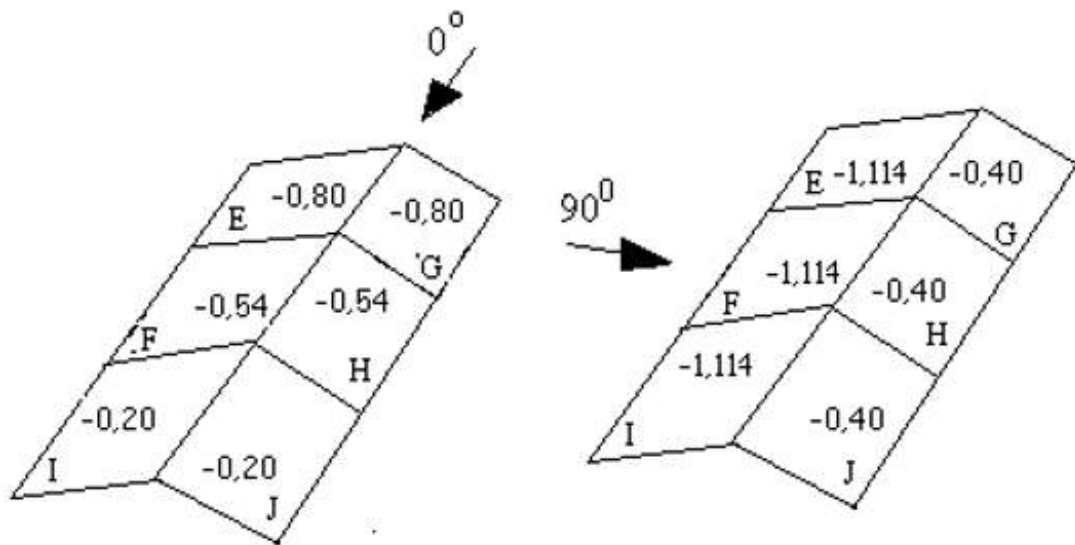
O software também determinou os valores de CPE (Coeficiente de Pressão Externa) calculados nas direções de 0 e 90 graus, assegurando uma avaliação precisa da pressão do vento sobre a estrutura para ambas as situações, inclinação de 10% e 15%. Os resultados obtidos podem ser verificados nas Figuras 11 e 12.

Figura 11: Valores de CPE, para inclinação de 10%



Fonte: Própria (2024)

Figura 12: Valores de CPE, para inclinação de 15%



Fonte: Própria (2024)

Quanto ao Coeficiente de Pressão Interna (CPI), foi considerado um galpão com quatro faces igualmente permeáveis, adotando-se $CPI = -0,3$ e $0,0$. Com esses valores, foi possível obter a pressão efetiva que age sobre o telhado, adotando-se a pior situação para garantir a segurança e durabilidade da estrutura. Para uma inclinação de 10%, os valores obtidos foram de $0,33 \text{ kN/m}^2$ com o vento a 0 graus e $0,37 \text{ kN/m}^2$ com o vento a 90 graus. Já para as geometrias com inclinação de 15%, os valores foram de $0,34 \text{ kN/m}^2$ com o vento a 0 graus e $0,44 \text{ kN/m}^2$ com o vento a 90 graus. Os cálculos foram realizados utilizando a fórmula de pressão efetiva determinada pela ABNT NBR 6123:1988, apresentada a seguir na Fórmula 01.

Equação 1: Pressão efetiva

$$\Delta p = (C_{pe} - C_{pi}) q$$

Sendo:

C_{pe} : Coeficiente de Pressão Externa

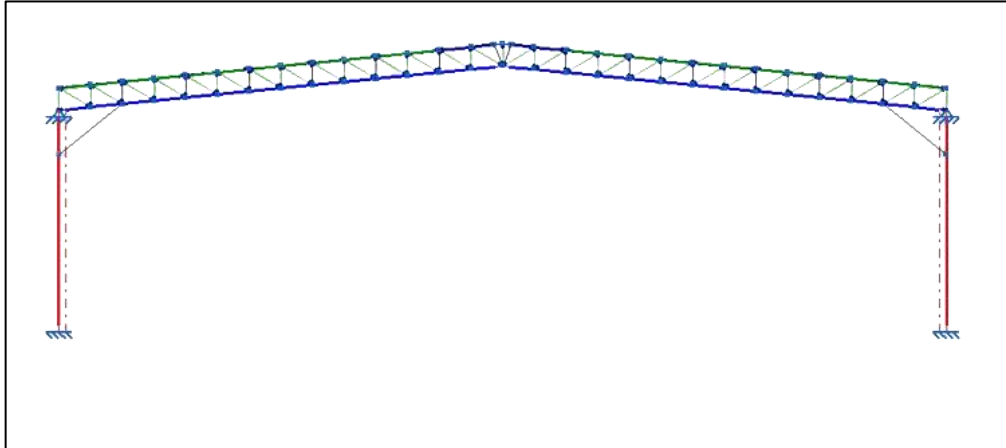
C_{pi} : Coeficiente de Pressão Interna

q : Pressão dinâmica do vento.

3.3. Realização do dimensionamento pelo Software

Inicialmente, foi desenhado o pórtico da estrutura e, em seguida, definidos os tipos de perfil para cada elemento. Conforme citado na seção 3.1 deste estudo, a Figura 13, abaixo, ilustra a vista frontal do modelo de galpão 1, com inclinação de 10%, distância entre os banzos de 0,5 m e distância entre os montantes de 0,5 m.

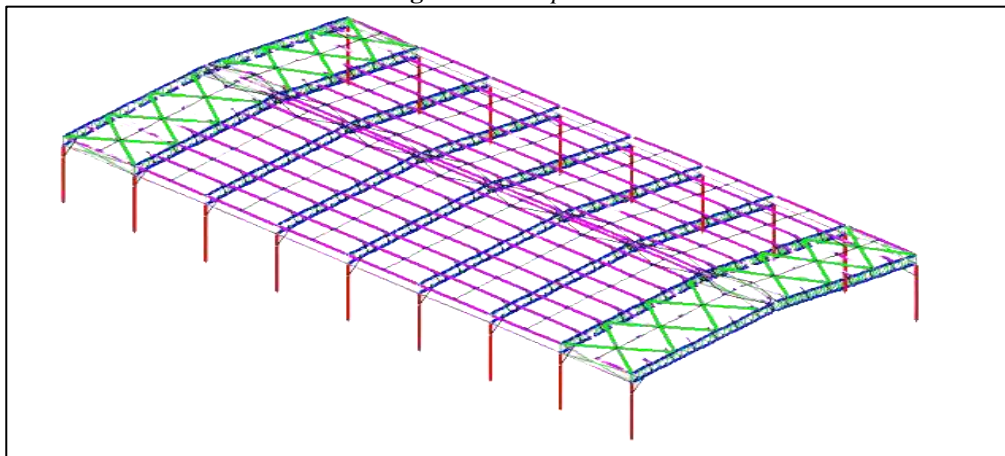
Figura 13: Vista frontal do galpão 01



Fonte: Própria (2024).

Logo em seguida, foi reproduzido um único pórtico com distância de 5 metros entre eles. Foram inseridas as terças e os componentes auxiliares, como as mãos francesas, tirantes e frechais, além de atribuir o comprimento de flambagem das barras e as flechas limites, conforme especificações da norma NBR 14762 (ABNT, 2010). Posteriormente, foram reproduzidos os demais pórticos, até totalizarem o comprimento de 40 metros, gerando um total de 9 pórticos. Por fim, foram lançadas as cargas, conforme mencionado no item 3.2 deste estudo, ilustrado na Figura 14.

Figura 14: Galpão 01

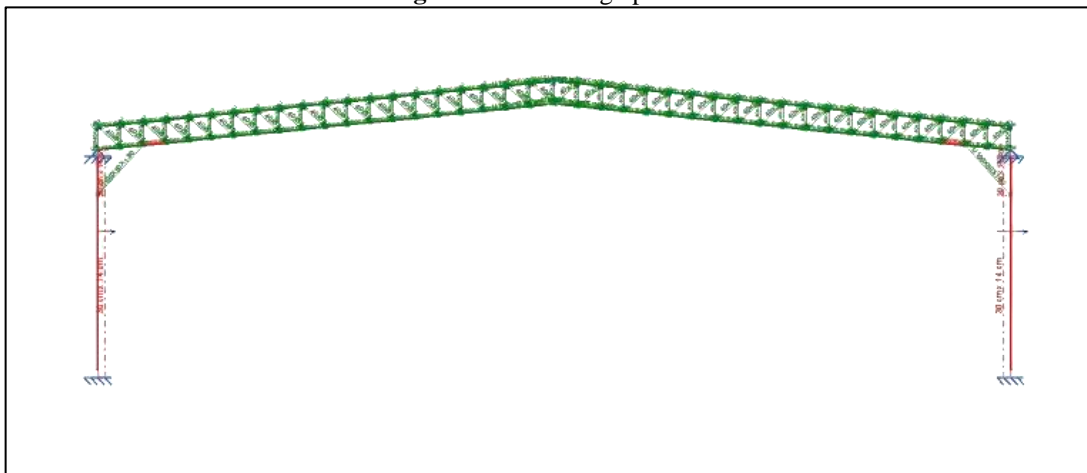


Fonte: Própria (2024).

Após o lançamento dos planos de carga, foi executado o comando de cálculo, com um pré-dimensionamento dos perfis, para verificar o Estado Limite Último (ELU) das barras e analisar se os perfis inicialmente escolhidos eram suficientes para suportar a estrutura. As verificações deviam atender aos seguintes critérios: valores máximos da relação comprimento-espessura; limitação de esbeltez; resistência à tração; resistência à compressão; resistência à flexão nos eixos X e Y; resistência ao esforço cortante nos eixos X e Y; resistência à combinação de momento fletor no eixo Y e esforço cortante no eixo X; resistência à flexo-compressão e à flexo-tração; e resistência à torção.

Caso algum parâmetro não fosse aprovado (indicado em vermelho), era necessário ajustar o perfil até que todos os critérios fossem atendidos, buscando soluções para melhor otimização da estrutura. Na Figura 15, pode-se observar o galpão 01 após a primeira verificação.

Figura 15: Pórtico galpão 01



Fonte: Própria (2024).

Após todo o refinamento das estruturas, obteve-se uma tabela de resumo, apresentada na Figura 16, que mostra a taxa de aço utilizada em cada configuração geométrica. Esses resultados permitiram analisar qual geometria apresentou o menor consumo de aço, um fator crucial para a eficiência estrutural e econômica do projeto.

Figura 16: Tabela resumo de taxa de aço do galpão 01

| TABELA RESUMO | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------|---------------|----------------|-------------|-----------|--------------|-------------|------------|---------------|-------------|------------|---------------|
| Material | | Série | Perfil | Comprimento | | | Volume | | | Peso | | |
| Tipo | Designação | | | Perfil (m) | Série (m) | Material (m) | Perfil (m³) | Série (m³) | Material (m³) | Perfil (Kg) | Série (Kg) | Material (Kg) |
| Aço Laminado | A-36 250 MPA | Barra Redonda | 1/2" | 446.894 | 446.894 | 446.894 | 0,057 | 0,057 | 0,057 | 444.40 | 444.40 | 444.40 |
| Aço Dobrado | A-36 250 MPA | U | 100x40x4.76 | 9.00 | 370,796 | 1.724.663 | 0.007 | 0.289 | 0.997 | 5522 | 2265.79 | 7827.76 |
| | | | 100x60x3.75 | 361.796 | | | 0.282 | | | 2210.57 | | |
| | | L | 40x30 - Duplo | 417.673 | 607,176 | | 0.189 | 0.231 | | 1480.21 | 1816.00 | |
| | | | 40x30 | 189.502 | | | 0.043 | | | 335.79 | | |
| | | C | 100x50x17x3.04 | 720.00 | 746,692 | | 0.468 | 0.477 | | 3674.00 | 3745.97 | |
| | | | 75x40x15x2.0 | 26.692 | | | 0.009 | | | 71.97 | | |

Fonte: Própria (2024).

Foram dimensionados 12 modelos de galpões metálicos, seguindo todos os critérios mencionados anteriormente, e em seguida, otimizados para identificar a estrutura que apresenta o menor consumo de aço. Para facilitar o entendimento após a geração dos gráficos, padronizou-se a nomenclatura dos galpões da seguinte forma: G01-0,5-0,5. Essa nomenclatura refere-se ao número adotado para os galpões, de 01 a 12, seguido pela distância entre banzos e a distância entre montantes, ambas em metros.

Para as análises comparativas, considerou-se a distância entre banzos para os modelos que tivessem a mesma inclinação e a mesma distância entre montantes, gerando mais confiabilidade nos resultados. As combinações para as respectivas análises estão organizadas na Tabela 03.

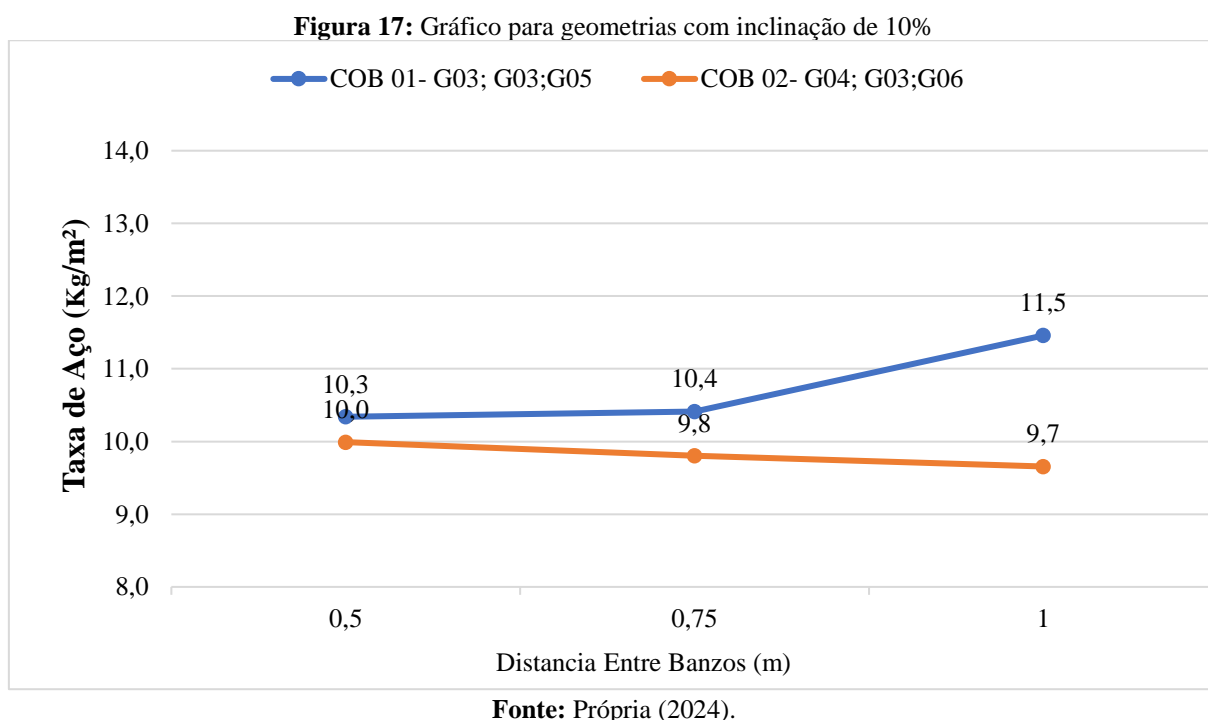
Tabela 3: Combinações de modelos de galpões metálicos por inclinação, distância entre banzos e montantes

| Inclinação | Modelos | Combinações |
|------------|--------------|-------------|
| 10% | G01-0,5-0,5 | COB - 01 |
| | G02-0,5-0,7 | COB - 02 |
| | G03-0,7-0,5 | COB - 01 |
| | G04-0,7-0,7 | COB - 02 |
| | G05-1,0 -0,5 | COB -01 |
| | G06-1,0-0,7 | COB - 02 |
| 15% | G07-0,5-0,5 | COB - 03 |
| | G08-0,5-0,7 | COB - 04 |
| | G09-0,7-0,5 | COB - 03 |
| | G10-0,7-0,7 | COB - 04 |
| | G11-1,0 -0,5 | COB -03 |
| | G12-1,0-0,7 | COB - 04 |

Fonte: Própria (2024)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todos os modelos analisados foram avaliados e otimizados, visando obter uma taxa mínima de aço sem comprometer a estrutura. A análise geométrica foi realizada alternando apenas as dimensões dos componentes dos perfis adotados, para garantir uma avaliação precisa. Na figura 17, podemos analisar o gráfico que compara a combinações COB 01- G01; G03; G05, com a COB 02- G02; G04; G06.



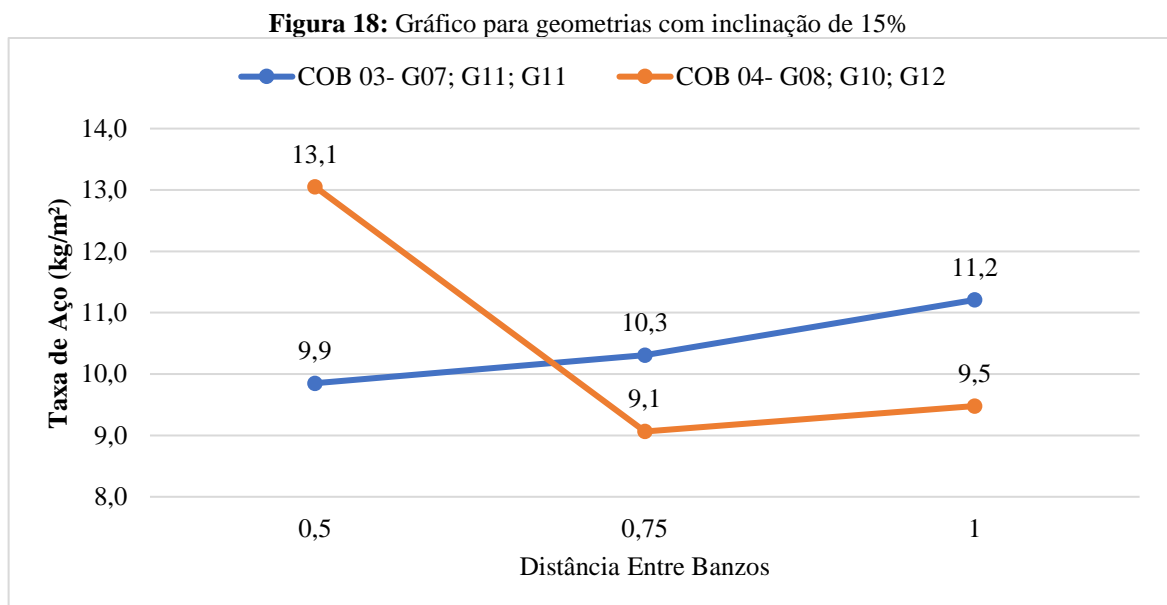
O gráfico mostra a taxa de aço (kg/m^2) em função da distância entre banzos (m) para diferentes distâncias entre montantes: 0,5 m (curva azul) e 0,7 m (curva laranja) em galpões com inclinação de 10%. Observa-se que, para a curva azul, representando a distância entre montantes de 0,5 m, aumenta a taxa de aço, conforme se aumenta a distância entre banzos há uma redução inicial na quantidade de aço ao aumentar a distância entre banzos de 0,5 m para

0,75 m. No entanto, ao aumentar ainda mais a distância entre banzos para 1 m, a quantidade de aço necessária cresce significativamente.

Em contrapartida, a curva laranja, que representa a distância entre montantes de 0,7 m, mostra uma redução contínua na quantidade de aço com o aumento da distância entre banzos. Esta configuração mantém sua integridade estrutural com menos material, aproveitando melhor as propriedades mecânicas dos elementos estruturais.

Isso pode ser explicado pelo fato de que o comprimento de flambagem dos montantes e diagonais é diretamente afetado pela geometria da treliça. Com uma distância maior entre os banzos e uma distância intermediária entre os montantes, os elementos podem trabalhar de forma mais eficiente contra flambagem, necessitando de menos material para evitar instabilidades. Se a distância entre montantes é muito pequena (0,5 m), os elementos podem ter um comprimento de flambagem mais curto, mas a distribuição de cargas e a eficiência estrutural global são comprometidas, exigindo mais material para manter a rigidez.

Portanto, conclui-se que, entre as geometrias analisadas neste gráfico, as que apresentam melhor eficiência estrutural, analisadas através do consumo de aço em kg/m^2 , são as que possuem distância entre montantes de 0,7 m. E, entre estas, a melhor configuração a se adotar é a que apresenta distância entre banzos de 1,0 m. Analisando a Tabela 3, do item 3.3, verifica-se que esta configuração corresponde à geometria G06-1,0-0,7. Agora, será apresentado o gráfico na Figura 18, que ilustra a quantidade de aço (Kg/m^2) em função da distância entre banzos (m) para diferentes distâncias entre montantes: 0,5 m e 0,7 m, desta vez para galpões com inclinação de 15%.



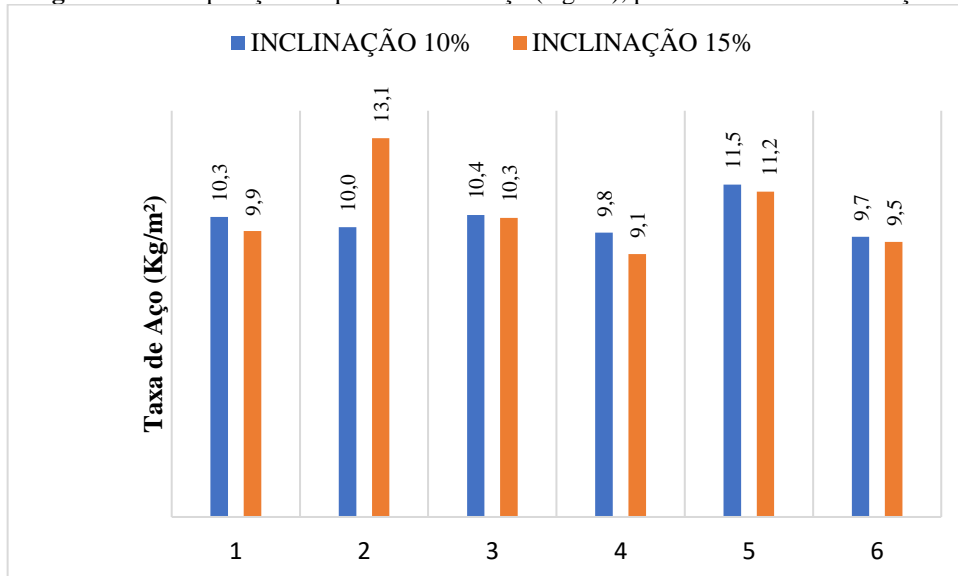
Fonte: Própria (2024).

Os resultados observados nas estruturas com inclinação de 15% mostram um comportamento diferente em relação às inclinações de 10%. Para a curva azul, que representa a distância entre montantes de 0,5 m, o comportamento da estrutura manteve-se o mesmo. Isso ocorre devido aos mesmos fatores abordados no gráfico anterior, com uma distância entre montantes de 0,5 m, uma maior distância entre banzos reduz a rigidez da estrutura, aumentando os esforços de flexo-compressão, especialmente nos banzos inferiores, devido ao maior comprimento sem suporte intermediário.

Esses maiores esforços resultam em momentos fletores e cargas axiais mais elevados, exigindo perfis mais robustos para manter a estabilidade estrutural. Por outro lado, a curva laranja, que representa a distância entre montantes de 0,7 m, mostra uma redução inicial na quantidade de aço ao aumentar a distância entre banzos de 0,5 m para 0,75 m, no entanto, ao aumentar para 1 m, a quantidade de aço necessária aumenta levemente.

Essa configuração ainda permite melhor distribuição de cargas e maior rigidez, proporcionando melhor resistência à flambagem em comparação com as configurações com montantes a 0,5 m de distância. Conclui-se que, entre as geometrias analisadas neste gráfico, a configuração que apresenta o menor consumo de aço em kg/m^2 é a que possui uma distância entre montantes de 0,7 m e uma distância entre banzos de 0,75 m. Pela Tabela 3, no item 3.3, verifica-se que essa configuração corresponde à geometria G10-0,75-0,7.

Após a análise detalhada dos gráficos individuais para as inclinações de 10% e 15%, é importante comparar como essas diferentes inclinações afetam o consumo de aço de forma conjunta. A seguir, é apresentado um gráfico comparativo (Figura 19) que ilustra as quantidades de aço utilizadas em função das distâncias entre banzos e montantes para ambas as inclinações. Este gráfico permitirá uma visão abrangente sobre a eficiência estrutural das diferentes geometrias em relação às inclinações adotadas, facilitando a identificação das configurações mais eficientes e econômicas.

Figura 19: Comparação da quantidade de Aço (Kg/m²), para as diferentes inclinações

Fonte: Própria (2024).

O gráfico compara a quantidade de aço (Kg/m²) para diferentes configurações de distância entre bancadas e montantes, com inclinações de 10% (barras azuis) e 15% (barras laranjas). Observa-se que, nos Conjuntos 01 (bancadas de 0,5 m e montantes de 0,5 m), 03 (bancadas de 0,75 m e montantes de 0,5 m), 04 (bancadas de 0,75 m e montantes de 0,7 m), 05 (bancadas de 1 m e montantes de 0,5 m) e 06 (bancadas de 1 m e montantes de 0,7 m), a inclinação de 15% resulta em menor consumo de aço em comparação à de 10%. Por outro lado, no Conjunto 02 (bancadas de 0,5 m e montantes de 0,7 m), a inclinação de 15% apresenta um consumo significativamente maior.

A análise revela que, na maioria dos casos, a inclinação de 15% tende a resultar em menor consumo de aço comparada à de 10%, exceto no Conjunto 02. Essas variações destacam a importância de considerar as especificidades de cada configuração ao planejar a estrutura de um galpão metálico, otimizando o uso de material e garantindo a eficiência estrutural.

A inclinação de 15% tende a resultar em menor consumo de aço na maioria dos casos porque melhora a distribuição das forças ao longo dos elementos estruturais. Na inclinação de 15%, as cargas verticais e horizontais são mais eficazmente direcionadas ao longo dos membros inclinados, resultando em menores momentos fletores nos bancadas. Os momentos fletores menores indicam que as tensões internas são distribuídas de maneira mais eficiente, permitindo que os membros suportem as cargas com seções transversais menores, reduzindo assim a quantidade de aço necessária.

Por outro lado, na inclinação de 10%, as cargas são menos eficientemente distribuídas, gerando maiores momentos fletores nos bancadas. Isso exige seções transversais maiores para

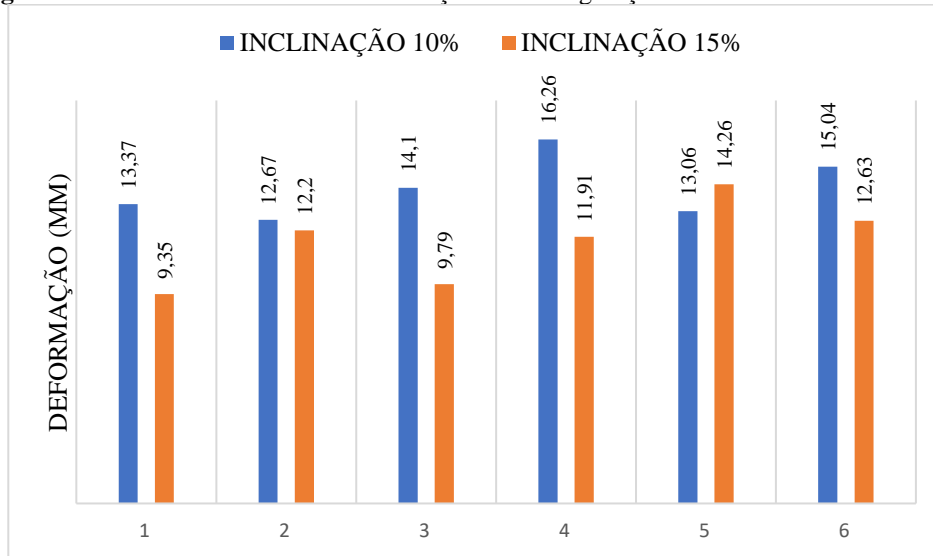
resistir às tensões de flexão, aumentando a quantidade de aço necessário. No Conjunto 02, onde a inclinação de 15% apresenta um consumo significativamente maior, isso pode ser atribuído à configuração específica de banzos e montantes que não favorece a transmissão direta das cargas, resultando em momentos fletores mais elevada e conseqüentemente, maiores necessidade de material.

A análise revela que, na maioria dos casos, a inclinação de 15% tende a resultar em menor consumo de aço comparada à de 10%, exceto no Conjunto 02. Essas variações destacam a importância de considerar as especificidades de cada configuração ao planejar a estrutura de um galpão metálico, otimizando o uso de material e garantindo a eficiência estrutural. Ao comparar os gráficos de 10% e 15%, observa-se que a inclinação maior permite uma melhor distribuição das cargas e um aproveitamento mais eficiente dos elementos estruturais.

A inclinação de 15% transmite as cargas mais diretamente ao longo dos elementos inclinados, resultando em uma menor exigência de material para suportar os mesmos esforços comparados à inclinação de 10%, onde as cargas são menos eficientemente distribuídas. Vale ressaltar que o menor consumo de aço, se mal projetado, pode potencialmente levar a maiores deformações na estrutura. No entanto, uma otimização adequada do uso de aço deve considerar não apenas a redução de material, mas também a manutenção da integridade estrutural e o controle das deformações.

Nesse contexto, foram verificadas as deformações das tesouras para o modelo analisado, a fim de garantir que o modelo escolhido, com menor taxa de aço, equilibre a redução de material com a necessidade de manter as deformações dentro de limites aceitáveis, garantindo que a estrutura permaneça funcional e segura. Com todos os modelos otimizados, em relação aos Estados Limites Últimos (ELU), foram verificadas as deformações sob a pior situação de carga, sendo está $(1,25PP + 1,25CP + 1,5SC)$, onde PP é o Peso Próprio, CP é a Carga Permanente, e SC é a Sobrecarga.

Constatou-se que os valores de deformação para as configurações com inclinações de 10% são, em sua maioria, maiores em comparação com as inclinações de 15%, com exceção da configuração G08-0,5-0,7. Essas informações podem ser analisadas na Figura 20, que apresenta o gráfico das deformações de cada tesoura para as inclinações de 10% e 15%. Também é importante ressaltar que todos os modelos adotados estão dentro dos limites de deformação especificados pela Norma NBR 14762 (ABNT, 2010).

Figura 20: Gráfico de Análise de Deformação das configurações Geométricas de 10% e 15%

Fonte: Própria (2024).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

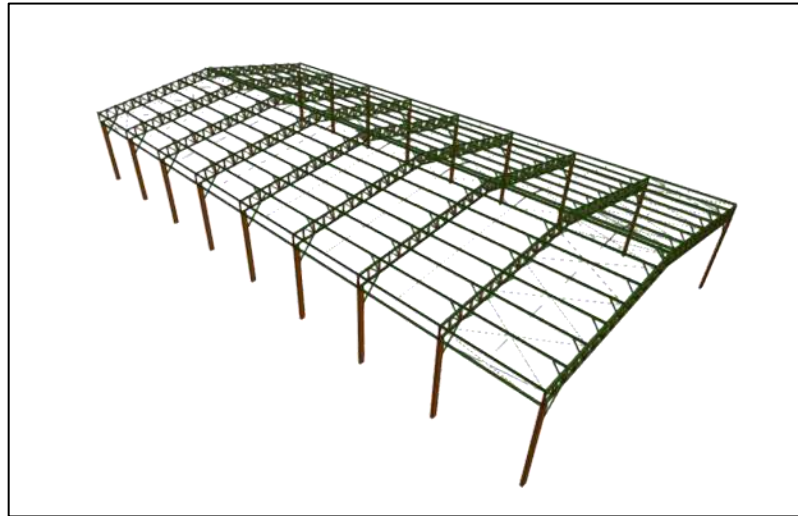
Este estudo analisou de diferentes geometrias para um galpão metálico, considerando o consumo de aço em função da distância entre banzos e entre montantes para inclinações de 10% e 15%. A análise mostrou variações significativas no consumo de material, destacando a importância de um projeto otimizado para eficiência estrutural e economia de recursos.

Para galpões com inclinação de 10%, observou-se que a distância entre montantes de 0,7 m e a distância entre banzos de 1,0 m resultaram no menor consumo de aço, tendo uma redução de até 15,65% na taxa de aço da estrutura quando comparados as configurações com distancias entre montantes de 0,5m.

Para galpões com inclinação de 15%, a configuração com uma distância entre montantes de 0,7 m, inicialmente proporcionou uma maior eficiência no uso de aço, para distância entre banzos de 0,5 e 0,75 m. embora a quantidade necessária tenha aumentado levemente ao estender a distância entre banzos para 1,0 m

Os resultados destacam que, para maximizar a eficiência no uso de materiais e garantir a estabilidade estrutural, é essencial considerar a interação entre a distância entre banzos e montantes, bem como a inclinação do galpão. A inclinação de 15% foi identificada como a mais eficiente em termos de consumo de aço na maioria das configurações analisadas, portanto, conclui-se que a geometria que apresentou o melhor desempenho estrutural entre as analisadas foi a G10-0,75-0,7. Esta configuração possui uma distância entre banzos de 0,75 m, distância entre montantes de 0,7 m e uma inclinação de cobertura de 15%, conforme visualizado na Figura 21.

Figura 21: Galpão metálico 3D, configuração G10-0,75-0,7



Fonte: Própria (2024).

Além disso, coberturas mais leves, além de serem mais baratas, também reduzem a seção de pilares e sapatas, e conseqüentemente a quantidade de material necessária nessas partes da estrutura, tornando o projeto globalmente mais econômico. Assim, recomenda-se que futuros projetos de galpões metálicos utilizem essas análises como referência para otimização e melhoria contínua, visando a criação de estruturas mais sustentáveis e econômicas.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, R. L. X. **Estudo de caso comparativo entre vigas mistas compostas por perfis laminados e formados a frio**. 2019. Galpões para Usos Gerais. CBCA 2010. Disponível em: <<https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/>>. Acesso em: 29 out. 2023.
- ANDRADE, S.; VELLASCO, P. **Comportamento e projeto de estruturas de aço**. Elsevier Brasil, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio**. - NBR-14762. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 87p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Forças Devidas ao Vento em Edificações** - NBR-6123. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.80p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio**. - NBR-6355. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.37p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. - NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto** - Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.
- 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
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.
- BARRETO, V. S.; HILLESHEIM, M. J. **Análise da Viabilidade Para Cobertura Em Estrutura Metálica com Diferentes Tipos de Aços para um Galpão Comercial**. 2023.
- BEER, F. P. **Mecânica dos materiais** [recurso eletrônico]; [tradução: Walter Libardi, José Benaque Rubert, Francisco Araújo da Costa]. – 8. ed. – Porto Alegre: AMGH, 2021.
- BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. 2.ed. São Paulo: PINI, 2008.
- CARNASCIALI, C. C. **Estruturas metálicas na prática**. São Paulo: 5a Edição, 1978.
- CASARIN, D. S.; HILLESHEIM, M. J. **Otimização de coberturas metálicas para galpões de duas águas**. 2023
- CHIAVERINI, V. Tecnologia mecânica: estrutura e propriedades das ligas metálicas. **Ed. Pearson Education do Brasil, São Paulo**, v. 2, 1986. Mercado Brasileiro de Aço. Agosto. 2023 Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/publicacoes/>>. Acesso em: 29 out. 2023.
- GALPÕES EM PÓRTICOS COM PERFIS ESTRUTURAIS LAMINADOS**. 7.ed. 2018. Disponível em: <<https://mais.gerdau.com.br/search/Galpões em Pórticos com Perfis Estruturais Laminados/>>. Acesso em: 29 out. 2023.

GRAVIA. **Perfis dobrados e perfilados**. Gravia, 2024. Disponível em: <<https://www.gravia.com/Perfis-Dobrados-e-Perfilados/>> Acesso em: 29 jun. 2024

KASSIMALI, A. **Análise estrutural**. Tradução da 5 ed. norte-americana 1 ed. Brasileira Cengage Learning, 2016.

LIMA, J. L. R. **Estudo comparativo entre estrutura metálica e de concreto armado em uma edificação: estudo de caso**. 2017.

MATOS, R. C. B. **Sistemas de contraventamentos em edifícios de estrutura metálica**. 2014.

NEW AÇO. **Perfil laminado**. New Aço, 2024. Disponível em: <<https://newaco.com.br/perfil-laminado/>>. Acesso em: 29 jun. 2024.

PFEIL, W.; PFEIL M. **Estrutura de aço: Dimensionamento básico**. 9 ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2022.

POMPERMAYER, R. **Análise comparativa entre estruturas metálicas e estruturas de concreto armado**. 2018.

PRAVIA, Z. M. C.; DREHMER, G. A. **Estruturas de aço**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2004.

ROCHA NETO, O. A. **Estudo de Caso: Análise Estrutural da Cobertura Metálica de uma Oficina Situada em Rio Verde - GO**. 2020.

ROMAN, R.R. **Otimização de Coberturas Metálicas de Edifícios Industriais**. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, 2016. 134p.

SILVA, V. P., FRUCHTENGARTEN, J. **Dimensionamento de estruturas de aço**. 2012. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

TEIXEIRA, I. L. **Otimização de Coberturas em Aço de Perfil Formado a Frio de Edifícios Industriais**, 2020.