

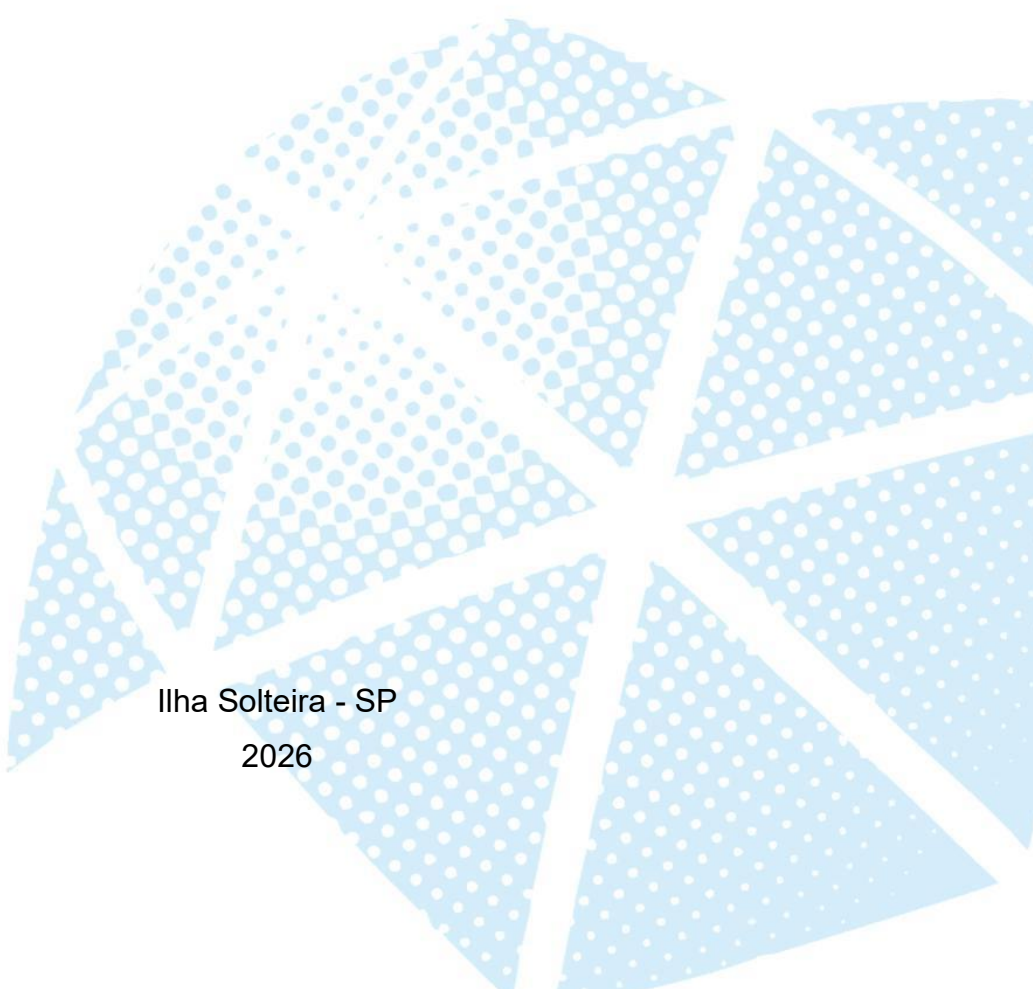
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

BRUNO MASSAO SOGAWA

**ESTUDO COMPARATIVO DA TAXA DE AÇO ENTRE GALPÕES INDUSTRIAIS
COM PÓRTICOS EM VIGA DE ALMA CHEIA E PÓRTICOS EM VIGA TRELIÇADA**

Ilha Solteira - SP

2026



BRUNO MASSAO SOGAWA

**ESTUDO COMPARATIVO DA TAXA DE AÇO ENTRE GALPÕES INDUSTRIAIS
COM PÓRTICOS EM VIGA DE ALMA CHEIA E PÓRTICOS EM VIGA TRELIÇADA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), FEIS, Ilha Solteira, para
obtenção do título de Grau acadêmico
Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia e
Tecnologia

Orientador(a): Prof. Dr. Emerson
Alexandro Bolandim

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- S682e Sogawa, Bruno Massao.
Estudo comparativo da taxa de aço entre galpões industriais com pórticos em viga de alma cheia e pórticos em viga treliçada / Bruno Massao Sogawa. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
49 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2026
- Orientador: Emerson Alexandro Boladim
- Inclui bibliografia
1. Análise comparativa de pórticos. 2. Taxa de consumo de aço em galpões. 3. Otimização de galpões metálicos.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Bruno Massao Sogawa

Título: Estudo Comparativo Da Taxa de Aço Entre Galpões Industriais Com Pórticos Em Viga De Alma Cheia E Pórticos Em Viga Treliçada

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **EMERSON ALEXANDRO BOLANDIM**
Data: 13/07/2026 08:19:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Emerson Alexandro Bolandim

UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **ROGERIO DE OLIVEIRA RODRIGUES**
Data: 13/07/2026 14:59:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rogério de Oliveira Rodrigues

UNESP – Campus de Ilha Solteira

Documento assinado digitalmente
 **GABRIEL SOUZA LOPES**
Data: 13/07/2026 17:11:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. MSc. Gabriel Souza Lopes

UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira

03/07/2026

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O presente trabalho possui relevância técnica e aplicada no contexto da engenharia estrutural, especialmente no estudo de galpões metálicos. Ao comparar o desempenho de pórticos com vigas de alma cheia e vigas treliçadas sob diferentes vãos e espaçamentos, a pesquisa contribui para a compreensão do comportamento estrutural e do consumo de material dessas tipologias.

Os resultados obtidos podem auxiliar na tomada de decisão em fases preliminares de projeto, uma vez que permitem identificar tendências de eficiência em função da geometria da estrutura, com impacto direto no consumo de aço e, conseqüentemente, nos custos de construção.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study has technical and applied relevance in the field of structural engineering, particularly in the analysis of steel industrial buildings. By comparing the performance of moment-resisting frames with solid-web beams and truss beams under different spans and bay spacings, the research contributes to understanding the structural behavior and material consumption of these systems.

The results may support decision-making in preliminary design stages, as they help identify efficiency trends as a function of structural geometry, with direct impact on steel consumption and, consequently, construction costs.

Dedico este trabalho à minha família, que me apoiou, me deu segurança e tornou tudo isso possível. Agradeço por cada esforço, compreensão e palavra de encorajamento, que foram fundamentais nos momentos de dificuldades e incertezas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Márcio Massatoshi Sogawa e Edina Shizue Ichibara Sogawa por terem sido o meu alicerce não apenas nesse ciclo, mas ao longo de toda a minha vida até aqui, me apoiando nos momentos ruins e me passando a segurança de que independente do que desse errado, eu sempre teria um lugar para voltar e recarregar as energias.

Agradeço também aos meus amigos, que tornaram esta jornada mais leve e significativa, mostrando que juntos podemos ir mais longe. Foram fundamentais com apoio, conselhos e motivação, não apenas na vida acadêmica, mas também na vida pessoal e profissional. São pessoas que levo como exemplo de perseverança e dedicação, mostrando que o esforço e o trabalho duro realmente valem a pena.

Agradeço ao grupo de pesquisa GMeCA, onde tive a oportunidade de construir laços e vivenciar aprendizados que marcaram este ciclo. O grupo contribuiu para o desenvolvimento de habilidades e responsabilidades até então inimagináveis, abrindo portas para diversas possibilidades. Agradeço em especial ao Prof. Dr. Emerson pelo convite e pela confiança, sendo o principal responsável por ter torando isso possível.

Por fim e não menos importante, gostaria de agradecer a todos os professores que me ensinaram ao longo da graduação. Com as dificuldades que antecedem o aprendizado, contribuíram para me formar não apenas como futuro engenheiro civil, mas também como pessoa. Me deram desafios que exigiram o desenvolvimento de habilidades, responsabilidades e maturidade que serão essenciais ao longo de toda a minha vida.

“As universidades serão o que são suas bibliotecas” (Gelfand, 1968, p. 19, tradução nossa).

RESUMO

Em galpões industriais, os pórticos metálicos, aliados a elementos secundários, como terças e sistemas de contraventamento, possibilitam o vencimento de grandes vãos, conciliando elevada capacidade resistente e rapidez construtiva. Nesse contexto, a escolha do sistema estrutural influencia diretamente no consumo de material, no desempenho estrutural e nos custos da edificação. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar comparativamente a taxa de consumo de aço de galpões industriais compostos por pórticos em vigas de alma cheia e pórticos em vigas treliçadas de banzos paralelos, buscando identificar as soluções mais eficientes para diferentes configurações geométricas. Foram analisados modelos estruturais com vãos variando entre 12 m e 24 m, associados a espaçamentos longitudinais entre pórticos de 5 m, 6 m, 7 m e 8 m, totalizando 56 modelos. As modelagens e análises estruturais foram realizadas com o auxílio do *software* Autodesk Robot Structural Analysis (ARSA), considerando verificações de Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS), conforme os critérios estabelecidos pela NBR 8800 (ABNT, 2008). A taxa de consumo de aço foi determinada a partir da relação entre o peso da viga analisada e a área construída do galpão. Os resultados demonstraram que os modelos em vigas de alma cheia apresentaram melhor desempenho estrutural e menores taxas de consumo de aço para galpões de menores dimensões, enquanto os modelos treliçados passaram a apresentar comportamento progressivamente mais eficiente conforme o aumento dos vãos e espaçamentos longitudinais.

Palavras-chave: Análise comparativa de pórticos; Taxa de consumo de aço em galpões; Otimização de galpões metálicos.

ABSTRACT

In industrial buildings, steel portal frames, combined with secondary members such as purlins and bracing systems, make it possible to span large distances while providing high structural capacity and rapid construction. In this context, the choice of the structural system directly influences material consumption, structural performance, and construction costs. Therefore, this study aimed to comparatively evaluate the steel consumption rate of industrial buildings composed of portal frames with solid-web beams and portal frames with parallel-chord truss beams, seeking to identify the most efficient solutions for different geometric configurations. Structural models with spans ranging from 12 m to 24 m and longitudinal frame spacings of 5 m, 6 m, 7 m, and 8 m were analyzed, totaling 56 models. Structural modeling and analyses were performed using Autodesk Robot Structural Analysis (ARSA), considering Ultimate Limit State (ULS) and Serviceability Limit State (SLS) verifications in accordance with the criteria established by ABNT NBR 8800:2008. The steel consumption rate was determined from the ratio between the weight of the analyzed beam and the building floor area. The results showed that the solid-web beam models exhibited better structural performance and lower steel consumption rates for smaller industrial buildings, whereas the truss beam models demonstrated progressively improved performance as the span lengths and longitudinal frame spacings increased.

Keywords: Comparative analysis of portal frames Steel consumption rate in industrial steel buildings; Optimization of steel industrial buildings

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema estrutural de um galpão industrial em aço.....	16
Figura 2 – Sistemas estruturais para galpões industriais com pórticos de diferentes tipologias	18
Figura 3 – Arranjo estrutural de um galpão industrial em aço	20
Figura 4 – Vista em corte da seção transversal de um galpão industrial em aço.....	21
Figura 5 – Galpão de vão simples.....	23
Figura 6 – Galpão de vãos múltiplos	23
Figura 7 – Ampliação longitudinal de galpão com vãos múltiplos	24
Figura 8 – Representação genérica da seção transversal dos perfis W e C.....	25
Figura 9 – Modelo estrutural do galpão industrial.....	26
Figura 10 – Propriedades mecânicas dos aços ASTM A36 e ASTM A572 Gr.50	27
Figura 11 – Pórtico com viga de alma cheia.....	27
Figura 12 – Pórtico com viga treliçada de banzos paralelo	28
Figura 13 – Relação altura e vão da viga de cobertura treliçada	29
Figura 14 – Distribuição das regiões que apresentam variação da pressão para parede, conforme a NBR 6123:2023	33
Figura 15 – Distribuição das regiões que apresentam variação da pressão para cobertura, conforme a NBR 6123:2023.....	34
Figura 16 – Modelo de viga em alma cheia intermediário (20 x 6).....	41
Figura 17 – Modelo de viga treliçada (20 x 6)	44
Figura 18 – Comparativo de taxa de aço entre modelos com viga de alma cheia e viga treliçada de banzos paralelos.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pressão dinâmica p/ vento 0° (Cobertura).....	31
Tabela 2 – Pressão dinâmica p/ vento 90° (Cobertura).....	32
Tabela 3 – Pressão dinâmica p/ vento 0° (Fechamento).....	32
Tabela 4 – Pressão dinâmica p/ vento 90° (Fechamento).....	32
Tabela 5 – Coeficientes de pressão e de forma externo para paredes	34
Tabela 6 – Coeficientes de pressão e de forma externo para cobertura	35
Tabela 7 – Composição dos modelos de viga em alma cheia	39
Tabela 8 – Taxa de aço em kg/m ² dos modelos de viga em alma cheia	41
Tabela 9 – Composição dos modelos de viga treliçada com banzos paralelos	43
Tabela 10 – Taxa de aço em kg/m ² dos modelos de viga treliçada com banzos	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Bases do estudo paramétrico.....	29
Quadro 2 - Ações atuantes sobre os modelos	37
Quadro 3 - Combinações das ações atuantes para avaliação de Estado Limite Último	37
Quadro 4 - Combinações das ações atuantes para avaliação de Estado Limite de Serviço	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Taxa de aço em kg/m ² dos modelos de viga em alma cheia	42
Gráfico 2 - Taxa de aço em kg/m ² dos modelos de viga treliçada com banzos paralelos	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARSA	Autodesk Robot Structural Analysis
CF	Combinação Frequente
CP	Carga Permanente
CQP	Combinação Quase-Permanente
CR	Combinação Rara
CUN	Combinação Última Normal
ELS	Estado Limite Último
ELU	Estado Limite de Serviço
NBR	Norma Brasileira
PP	Peso Próprio
SCC	Sobrecarga de Cobertura
V1 (+y)	Ação do vento 0° (+)
V1 (-y)	Ação do vento 0° (-)
V2 (+x)	Ação do vento 90° (+)
V2 (-x)	Ação do vento 90° (-)

LISTA DE SÍMBOLOS

b_m	Parâmetro meteorológico usado na determinação de S_2
cp_i	Coeficiente de pressão interno
C_e	Coeficiente de forma externo
C_i	Coeficiente de forma interno
F_r	Fator de rajada
p	Expoente da lei potencial de variação de S_2
q	Pressão dinâmica do vento, correspondente à velocidade característica V_k , em condições normais de pressão (1 atm = 1 013,2 mbar = 101 320 Pa) e de temperatura (15 °C)
q_v	Força distribuída do vento
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação, estrutura ou componente em estudo, e de sua altura sobre o terreno
S_3	Fator baseado em conceitos probabilísticos
V_k	Velocidade característica do vento
V_0	Velocidade básica do vento: velocidade de uma rajada de 3 s, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano, excedida na média uma vez em 50 anos
z	Cota acima do terreno

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	PREPOSIÇÃO.....	16
3	REVISÃO DA LITERATURA	20
3.1	CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	20
3.2	ESTRUTURA BASE	20
3.2.1	Coluna	21
3.2.2	Viga de cobertura	21
3.2.3	Terças.....	22
3.2.4	Travessas	22
3.2.5	Contraventamentos	22
3.3	TIPOS DE ESTRUTURA.....	22
3.4	PÓRTICOS TRANSVERSAIS	24
3.4.1	Pórtico com elementos em alma cheia.....	24
3.4.2	Pórtico com elementos treliçados	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1	BASES DO ESTUDO PARAMÉTRICO	25
4.2	ANÁLISE PARAMÉTRICA	27
4.3	PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS GALPÕES.....	28
4.3.1	Terças e longarinas.....	28
4.3.2	Pilar.....	29
4.3.3	Viga em alma cheia	29
4.3.4	Viga treliçada de banzos paralelos	29
4.4	AÇÕES ATUANTES.....	30
4.4.1	Cargas permanentes e sobrecarga.....	30
4.4.2	Ações do vento.....	30
4.4.3	Combinações	37
4.5	MODELAGEM E ANÁLISE.....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1	MODELOS COM VIGA EM ALMA CHEIA.....	39
5.2	MODELOS COM VIGA TRELIÇADA DE BANZOS PARALELOS.....	43
5.3	COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS COM DIFERENTES TIPOLOGIAS DE PÓRTICOS.....	46

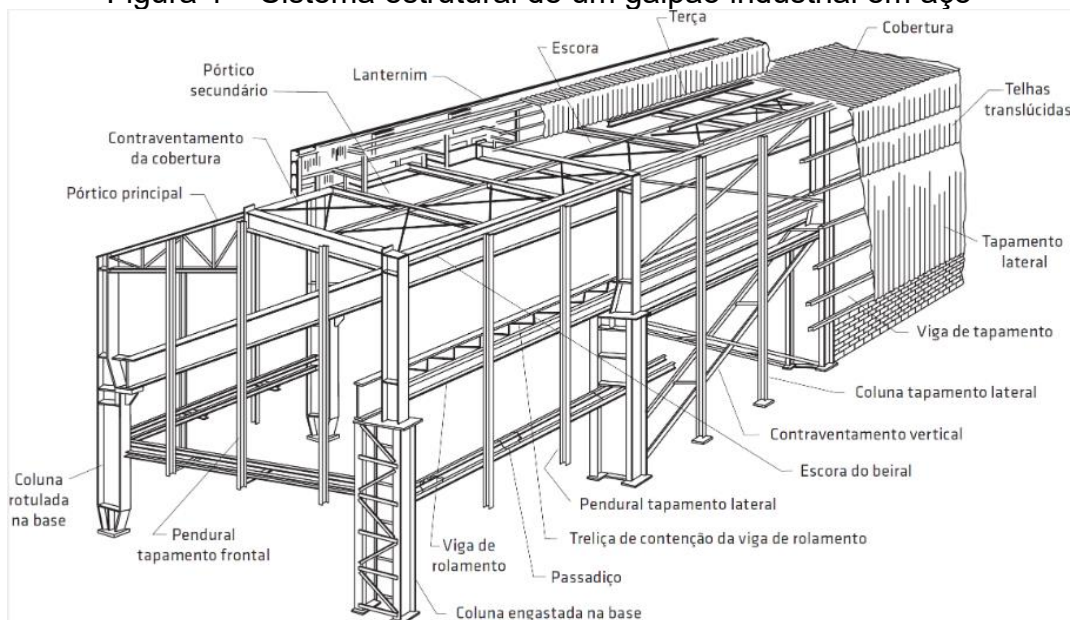
6	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

A utilização do aço na construção civil remonta a aproximadamente dois séculos atrás. Segundo Bellei (2024), as primeiras obras com emprego desse material datam a partir de 1750, sendo observadas construções na Inglaterra, em 1757, na França, por volta de 1780, e, mais tarde, nos Estados Unidos, especialmente na cidade de Chicago, a partir de 1880. No Brasil, o autor aponta que as primeiras construções que utilizaram o aço datam de 1812. Entre as obras pioneiras destacam-se a Ponte da Parahyba, localizada no município Paraíba do Sul, no estado de Rio de Janeiro, construída em 1857, e o Teatro Santa Isabel, em Recife, considerado uma das primeiras edificações do país a empregar aço importado em sua estrutura.

Desde então, a utilização do material tem se expandido continuamente, acompanhando a evolução das necessidades construtivas e o desenvolvimento de novos sistemas estruturais. Nesse cenário, os galpões industriais em aço (Figura 1) têm ganhado destaque no mercado, desempenhando um papel crucial na infraestrutura de diversos segmentos, como os setores comercial, industrial, logístico e agrícola.

Figura 1 – Sistema estrutural de um galpão industrial em aço



Fonte: Bellei (2024)

Legenda: Esquema estrutural de um galpão industrial em aço, destacando os principais elementos do sistema de pórticos, contraventamentos, cobertura e fechamento lateral.

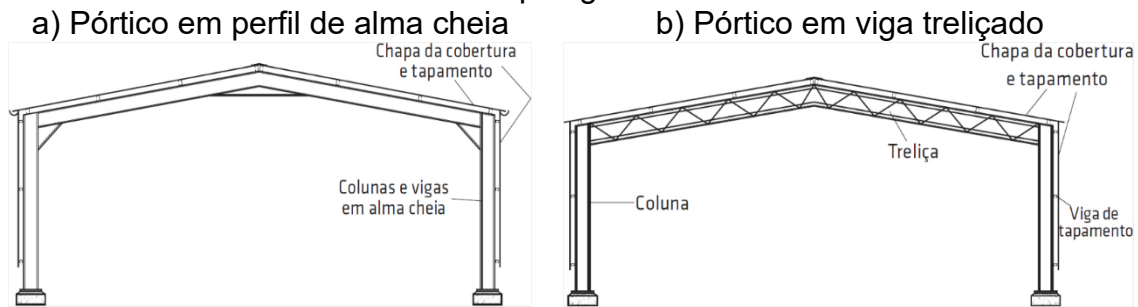
Essa notoriedade se deve à eficiência, flexibilidade e capacidade dessas estruturas de abranger grandes áreas livres, proporcionando espaços para atividades como armazenamento, produção e logística (Bellei, 2024). Além disso, o uso de perfis padronizados (laminados, soldados ou formados a frio), na confecção da estrutura garante agilidade na fabricação das peças e na montagem final, otimizando o processo produtivo (Chaves, 2007).

Apesar dessas vantagens, os sistemas estruturais em aço possuem vulnerabilidades inerentes que podem levar a falhas catastróficas, especialmente quando submetidos a carregamentos dinâmicos ou de impacto. Com isso, se torna essencial avaliar sua suscetibilidade quanto a fenômenos de instabilidade como a flambagem global, local e distorcional, imperfeições geométricas nos perfis e a rigidez global da estrutura, visando garantir a estabilidade da edificação (AISC, 2022).

Para mitigar esses riscos, estudos a respeito do comportamento mecânico de galpões industriais em aço têm buscado soluções que envolvam tanto o aprimoramento do projeto quanto a introdução de sistemas complementares de reforço e estabilização, assim como a elaboração de diretrizes que visam orientar Engenheiros e Projetistas para uma construção cada vez mais econômica, eficiente e segura (AIST, 2021).

O desempenho estrutural dos pórticos em sistemas estruturais para galpões industriais está intrinsecamente ligado à forma como são distribuídos os esforços internos, sendo os responsáveis por suportar grandes cargas gravitacionais, elevadas forças devidas ao vento e vencer vãos significativos. Entre as diversas tipologias existentes, alguma das mais utilizadas em galpões são os pórticos de alma cheia (Figura 2a), que transmitem os esforços por meio de perfis laminados ou soldados, e os pórticos treliçados (Figura 2b), que se destacam pelo uso eficiente do aço, com elementos que trabalham predominantemente à tração e compressão, sendo uma opção mais leve e eficiente do ponto de vista estrutural (AIST, 2021).

Figura 2 – Sistemas estruturais para galpões industriais com pórticos de diferentes tipologias



Fonte: Adaptado de Bellei (2024)

Legenda: Comparação entre pórtico em perfil de alma cheia (a) e pórtico em viga treliçada (b), evidenciando as diferenças entre os sistemas estruturais e seus elementos principais.

A escolha entre diferentes tipologias de pórticos impacta diretamente no consumo de materiais, manutenção e no comportamento estrutural, devendo-se optar pela configuração que melhor se adeque ao uso pretendido para o galpão (Bellei, 2024). A diferença no comportamento estrutural dos diferentes pórticos também reflete diretamente nos critérios de projeto e na construção desses sistemas, sendo a análise do desempenho dessas configurações fundamental para a elaboração de projetos otimizados (Chaves, 2007). A variação no espaçamento dos vãos e entre os pórticos é uma das estratégias utilizadas na busca por soluções que combinem economia com o desempenho requerido, uma vez que influenciam no peso da estrutura, na quantidade de elementos a serem utilizados e no custo da fundação (AISC DG 7, 2019).

O presente estudo foca na análise comparativa do desempenho estrutural de galpões industriais com pórticos de alma cheia e pórticos com vigas treliçadas de banzos paralelos. O equacionamento das capacidades resistentes de cálculo e verificação normativa foi realizada com auxílio do software Autodesk Robot Structural Analysis, o qual faz utilização da NBR 8800 (ABNT, 2008) presente em seu banco de dados. Para demais critérios de construção como avaliação do limite de deslocamento para verificação de ELS, ação de carregamentos e aspectos construtivos, fez-se a utilização da NBR 8800 (ABNT, 2024), norma mais atualizada até o momento.

A motivação para a realização deste trabalho surge da necessidade de entender e aprofundar o conhecimento quanto as condições em que cada solução se mostra mais vantajosa, alinhando economia de recursos a altos padrões de desempenho estrutural, propondo diretrizes que contribuam para o aumento da segurança e eficiência em projetos de galpões.

2 PROPOSIÇÃO

Esta pesquisa tem por finalidade avaliar o desempenho estrutural de galpões industriais com diferentes dimensões, comparando pórticos com vigas de alma cheia e pórticos com vigas treliçadas de banzos paralelos, buscando identificar a solução mais eficiente para cada configuração, visando à redução dos custos e do consumo de aço, assegurando o atendimento aos critérios normativos de resistência e estabilidade estabelecidos pela NBR 8800 (ABNT, 2008) e aos limites de deslocamento em serviço definidos pela NBR 8800 (ABNT, 2024)

3 REVISÃO DA LITERATURA

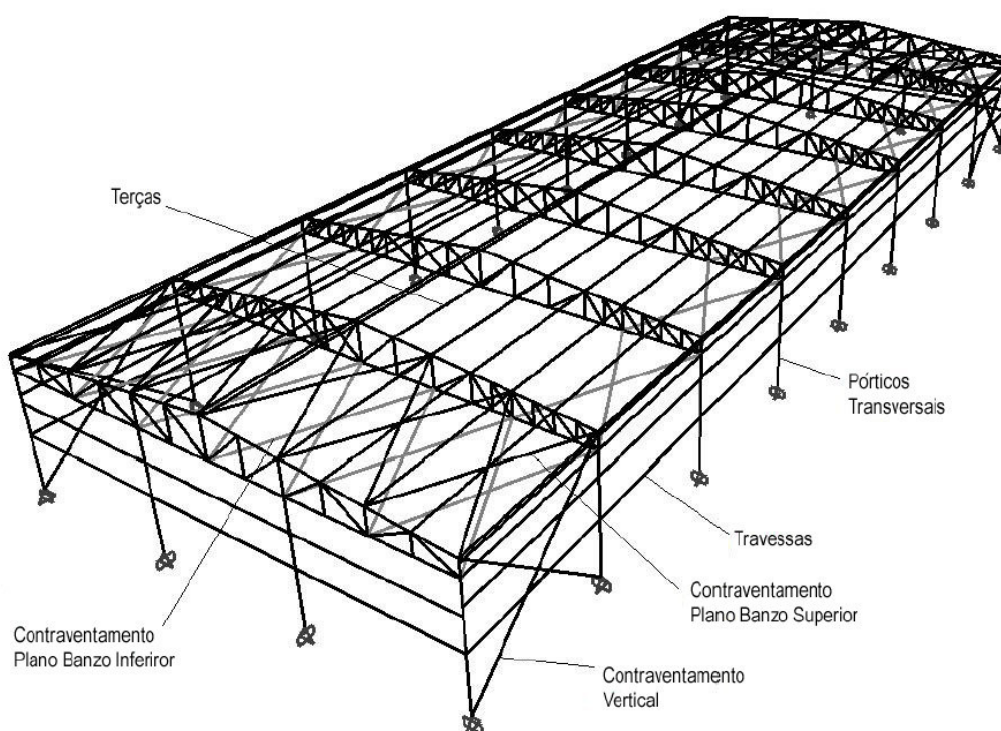
3.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Segundo D’Alambert (2018), galpões são estruturas basicamente compostas por um conjunto de pórticos (pilares e vigas de cobertura) regularmente espaçados, nos quais são instaladas sobre o vigaamento terças e telhas de cobertura responsáveis pelo fechamento superior da edificação, possuindo em sua maioria a presença também de longarinas e tapamento lateral que cumprem a função de vedação.

3.2 ESTRUTURA BASE

Na Figura 3 e 4 dispostas abaixo, está representada o arranjo estrutural básico de um galpão em aço apresentado por Chaves (2007), nos quais pode-se observar os elementos que compõem a estrutura.

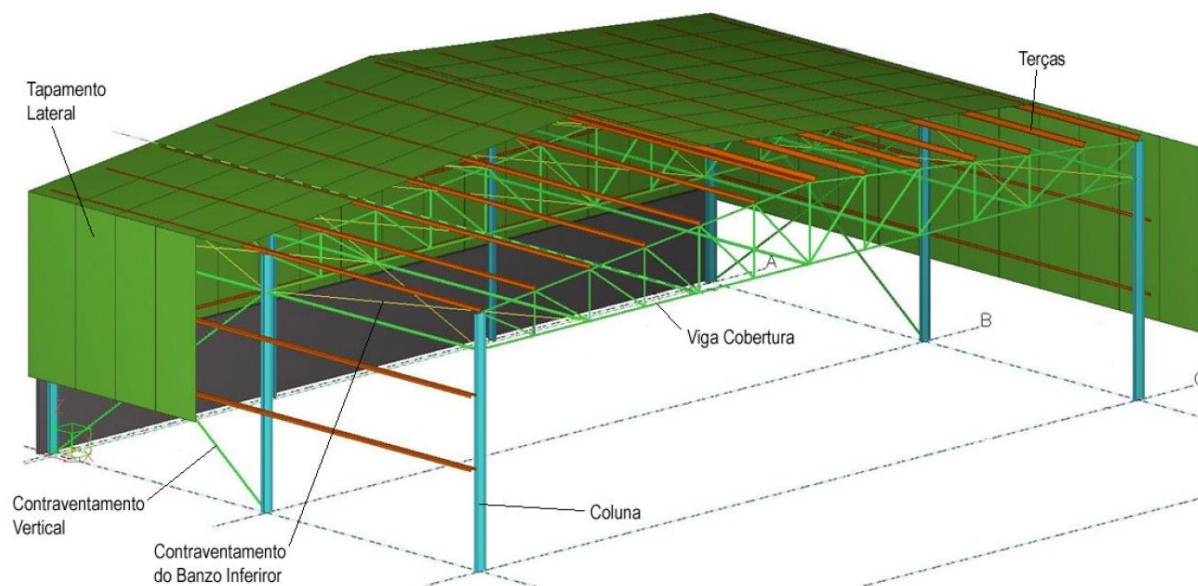
Figura 3 – Arranjo estrutural de um galpão industrial em aço



Fonte: Chaves (2007)

Legenda: Representação esquemática de uma estrutura metálica de galpão. A imagem exhibe a modulação dos pórticos principais, evidenciando o vão livre transversal e o espaçamento longitudinal entre os quadros estruturais. É possível observar a disposição sequencial dos pilares e das vigas de cobertura que compõem o sistema.

Figura 4 – Vista em corte da seção transversal de um galpão industrial em aço



Fonte: Chaves (2007)

Legenda: Desenho esquemático em corte de uma estrutura metálica. O esquema destaca os pilares laterais de sustentação e uma viga de cobertura do tipo treliçada de duas águas, evidenciando a disposição geométrica de seus banzos, montantes e diagonais. O desenho também destaca os principais elementos que compõem um galpão metálico.

3.2.1 Coluna

Sendo a base de sustentação, tal elemento estrutural tem como principal função realizar a distribuição de todo o carregamento da estrutura, transmitindo os esforços provenientes da viga, dos demais elementos do galpão e das ações atuantes, para a fundação. Além disso, ele desempenha um papel essencial na estabilidade global, contribuindo para a rigidez da estrutura contra ações que incidem lateralmente sobre a edificação (Chaves, 2007).

3.2.2 Viga de cobertura

A viga é um elemento que compõe a estrutura principal do fechamento superior da edificação. Sua função é receber as cargas provenientes da cobertura, tais como o peso próprio das telhas, sobrecargas de utilização, ações do vento e da chuva, e transferi-las para as colunas. A associação de coluna com a viga de cobertura forma uma estrutura básica da edificação, denominada pórtico transversal (Chaves, 2007).

3.2.3 Terças

A terça é um elemento secundário disposto perpendicularmente às vigas de cobertura. Sua principal função é servir de apoio para as telhas ou painéis de cobertura, distribuindo as cargas recebidas diretamente para as vigas (Chaves, 2007).

3.2.4 Travessas

As travessas, também conhecidas como longarinas, são elementos estruturais secundários com função semelhante à das terças. No entanto, diferentemente destas, as travessas são fixadas nas colunas, sendo responsáveis por receber as cargas provenientes dos fechamentos laterais da edificação e das ações que incidem sobre elas (Chaves, 2007).

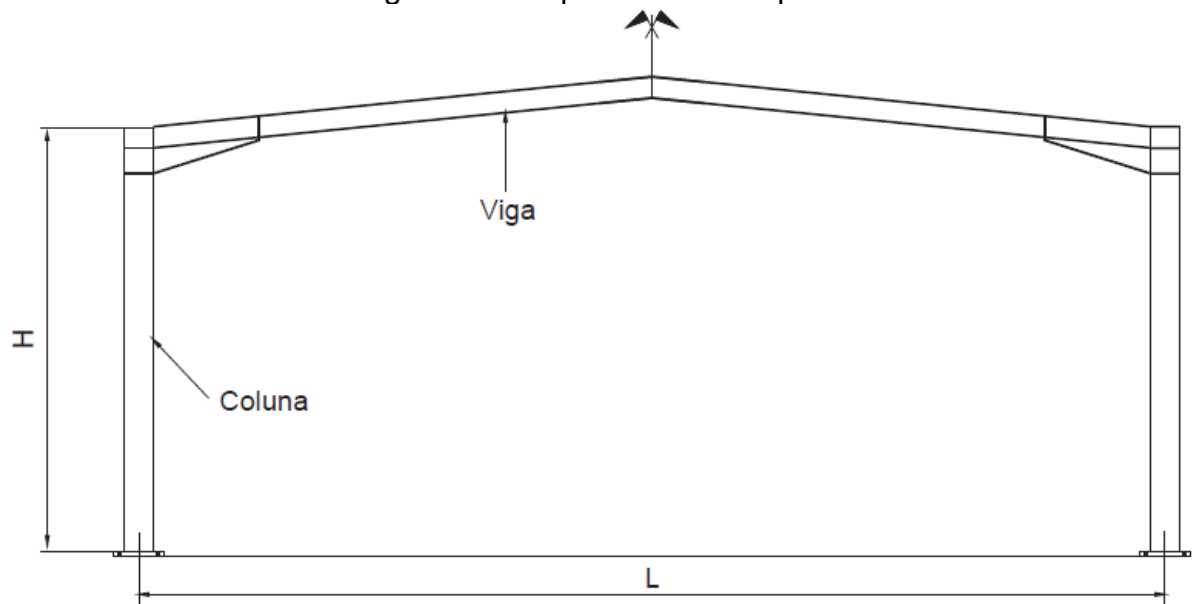
3.2.5 Contraventamentos

Os contraventamentos são elementos utilizados para garantir a estabilidade global da edificação, principalmente em relação as ações horizontais como o vento. Eles geralmente são compostos por barras diagonais dispostas em planos verticais ou horizontais, que tem por função aumentar a rigidez geral da estrutura, restringindo deslocamentos laterais e deformações excessivas que possam causar a perda da estabilidade da edificação (Chaves, 2007).

3.3 TIPOS DE ESTRUTURA

Para D’Alambert (2018), os galpões industriais podem ser classificados em duas tipologias básicas, sendo elas os de vãos simples (Figura 5), e os de vãos múltiplos (Figura 6).

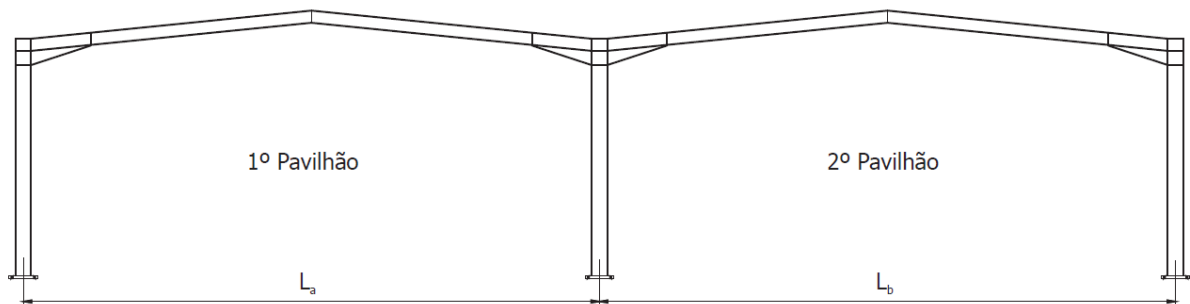
Figura 5 – Galpão de vão simples



Fonte: D'Alambert (2018)

Legenda: Representação bidimensional mostrando a vista frontal de um pórtico estrutural metálico de vão simples. A representação ilustra os pilares laterais de sustentação e a viga de cobertura em perfil de alma cheia.

Figura 6 – Galpão de vãos múltiplos

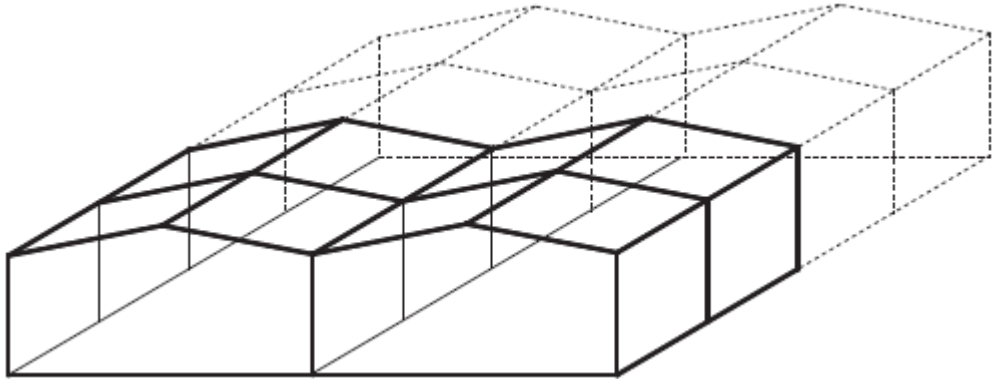


Fonte: D'Alambert (2018)

Legenda: Representação bidimensional mostrando a vista frontal de um pórtico estrutural metálico de vãos múltiplos. A representação ilustra pilares laterais e central de sustentação, além de viga de cobertura em perfil de alma cheia.

Os galpões também podem ser ampliados tanto lateralmente quanto longitudinalmente, sem que se faça necessário alterar o dimensionamento original dos pórticos (Figura 7).

Figura 7 – Ampliação longitudinal de galpão com vãos múltiplos



Fonte: D'Alambert (2018)

Legenda: Vista em perspectiva de um modelo estrutural de galpão metálico. A imagem exibe o esqueleto da estrutura composto por pórticos de vãos múltiplos. Em uma das extremidades longitudinais do galpão, há uma indicação gráfica projetando a ampliação dos elementos.

Nas edificações com vãos múltiplos, o pilar central da estrutura é submetido a um carregamento aproximadamente duas vezes maior do que aquele observado em modelos com vão simples. Entretanto, a presença de um maior número de pilares proporciona maior rigidez à estrutura frente aos deslocamentos laterais, aumentando sua estabilidade global e tornando-a menos suscetível a deformações decorrentes das solicitações de momentos fletores (D'Alambert, 2018).

3.4 PÓRTICOS TRANSVERSAIS

Segundo Pinho (2005, *apud* Chaves, 2007), existem duas tipologias básicas para o pórtico transversal, sendo a composta por elementos com perfis de alma cheia, e a composta por elementos treliçados.

3.4.1 Pórtico com elementos em alma cheia

Os pórticos com seção de alma cheia são aqueles em que os pilares, as vigas de cobertura ou ambos os elementos que compõem o pórtico são constituídos por perfis de alma cheia (Figura 2a). Esse sistema estrutural utiliza elementos de maior robustez, responsáveis por resistir simultaneamente a esforços axiais e de flexão.

3.4.2 Pórtico com elementos treliçados

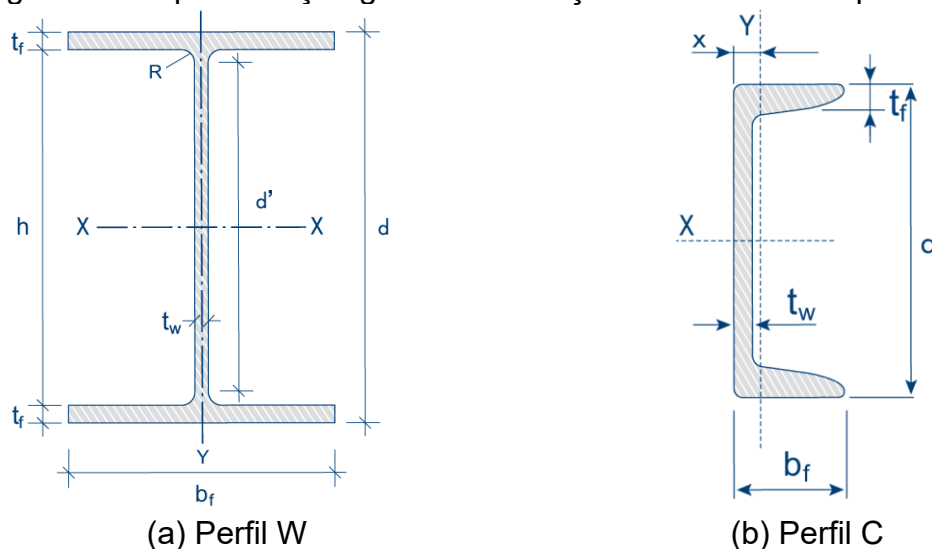
Em contrapartida, os pórticos compostos por elementos treliçados utilizam conjuntos de perfis menores e de diferentes geometrias, organizados em sistemas de treliças que promovem uma distribuição mais eficiente dos esforços internos (Figura 2b). Nesse arranjo, os elementos estruturais são projetados para trabalhar predominantemente sob esforços de tração e compressão.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 BASES DO ESTUDO PARAMÉTRICO

Para o presente estudo, foram definidos inicialmente os elementos que compõem o modelo estrutural base. Cada galpão possui pilares em perfil W com 10,30 m de altura engastados na base, escoras em perfil W (Figura 8a), terças e longarinas em perfil C (Figura 8b). A cobertura é composta por duas águas com inclinação de 5%, valor mínimo recomendado pela NBR 8800 (ABNT, 2024) para evitar empoçamentos na cobertura da estrutura.

Figura 8 – Representação genérica da seção transversal dos perfis W e C



Fonte: Adaptado do catálogo da Gerdau [20- -]

Legenda: Representação bidimensional da seção transversal de um perfil metálico tipo W e tipo C, com todas as medidas e nomenclatura das dimensões.

Para as vigas de alma cheia e vigas treliçadas de banzos paralelos, foram adotados perfis W fabricados em aço ASTM A572 Gr.50.

Cada modelo possui cinco módulos longitudinais, contendo sistemas de contraventamento vertical posicionados nos módulos das extremidades e no módulo central, compostos por cantoneiras L 51x51x2,5 mm em aço ASTM A36 (Figura 9). A cobertura conta ainda com um sistema de contraventamento horizontal entre as terças, utilizando barras redondas RB 15,88 mm, também em aço ASTM A36.

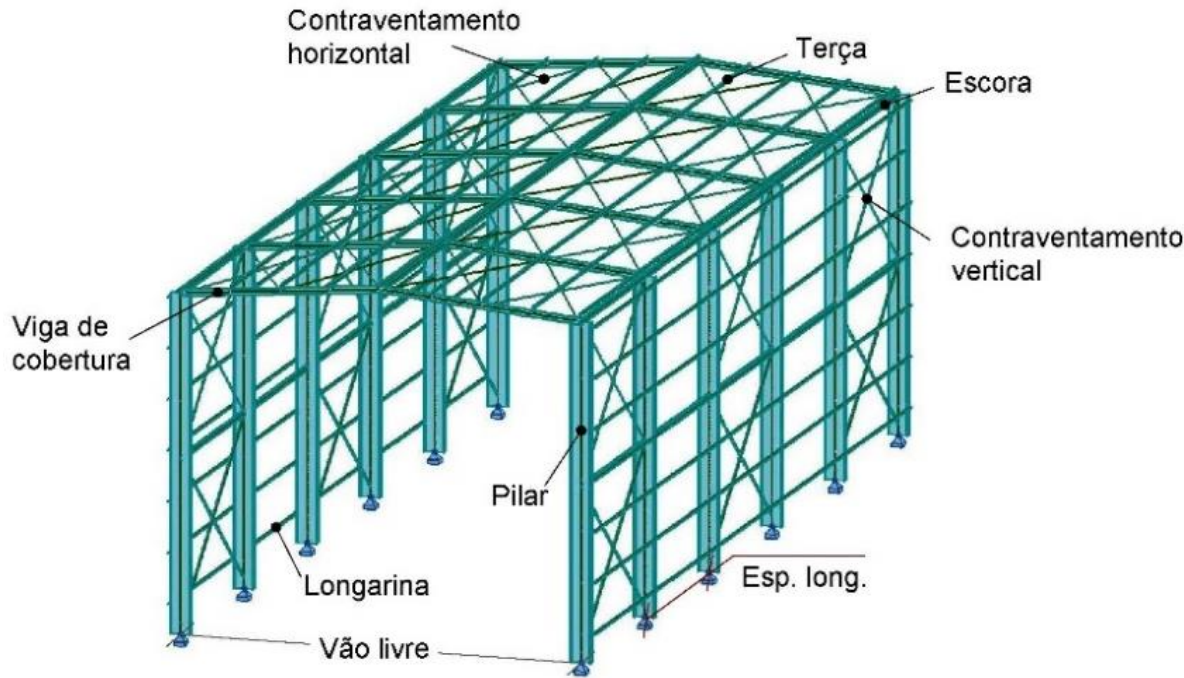
As bases apresentadas nesse tópico estão dispostas no Quadro 1.

Quadro 1 – Bases do estudo paramétrico

Estrutura/elemento	Especificação
Altura dos pilares	10,30 m - Perfil W - Engastamento na base
Inclinação da cobertura	5% - Recomendação NBR 8800 (ABNT, 2024)
Contraventamento vertical	Cantoneiras L 51x51x2,5 mm – ASMT A36
Contraventamento horizontal	Barras redondas RB 15,88 mm – ASMT A36
Módulos longitudinais	5 módulos por modelo
Espaçamento entre longarinas	1,5 m (fixo em todos os modelos)

Fonte: Produção do autor (2026)

Figura 9 – Modelo estrutural do galpão industrial



Fonte: Produção do autor (2026)

Legenda: Imagem de um ambiente virtual de análise estrutural apresentando a geometria 3D de uma edificação industrial em aço. A representação foca na disposição espacial da estrutura metálica, com marcações visuais que diferenciam e identificam os diversos elementos estruturais lançados no modelo, ilustrando a organização adotada para a simulação numérica.

Os aços utilizados nos perfis metálicos são do tipo estrutural, possuindo resistências diferentes a depender da sua composição. As propriedades mecânicas dos tipos de aços utilizados neste trabalho estão apresentadas na Figura 10.

Figura 10 – Propriedades mecânicas dos aços ASTM A36 e ASTM A572 Gr.50

	ASTM A36	ASTM A572 Grau 50
Limite de Escoamento (MPa)	250 mín.	350 mín.
Limite de Resistência (MPa)	400 a 550	450 mín.
Alongamento 200 mm (%)	20 mín.	18 mín.
Alongamento 50 mm (%)	21 mín.	21 mín.
Equivalência NBR 7007	MR 250	AR 350

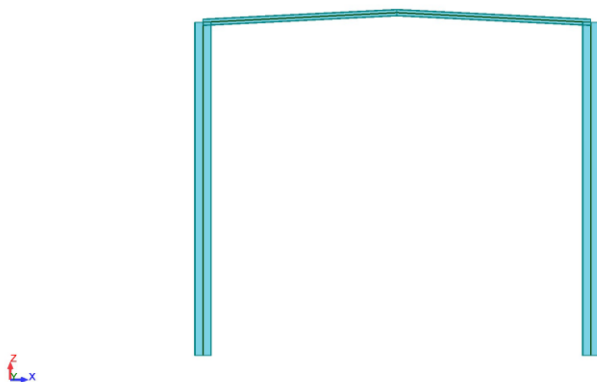
Fonte: Adaptado do catálogo da Gerdau [20- -]

Legenda: Recorte da tabela de propriedades mecânicas obtidas do catálogo da Gerdau, apresentando os limites de escoamento e alongamento para os tipos de aço ASTM A36 e ASTM A572 Gr. 50 utilizados nos perfis metálicos adotados neste trabalho.

4.2 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Para a análise, foram considerados sete vãos livres distintos, sendo eles de 12 m, 14 m, 16 m, 18 m, 20 m, 22 m e 24 m. Além disso, foram adotados quatro espaçamentos longitudinais entre os pórticos, sendo eles de 5 m, 6 m, 7 m e 8 m. A comparação foi realizada entre galpões de mesmas dimensões, utilizando dois sistemas estruturais distintos: pórticos com vigas de alma cheia (Figura 11) e pórticos com vigas treliçadas de banzos paralelos (Figura 12).

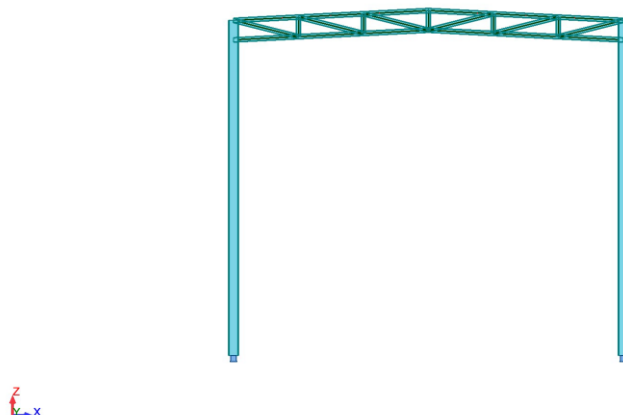
Figura 11 – Pórtico com viga de alma cheia



Fonte: Produção do autor (2026)

Legenda: Desenho esquemático bidimensional que apresenta a vista frontal de um pórtico estrutural simples com viga em alma cheia.

Figura 12 – Pórtico com viga treliçada de banzos paralelo



Fonte: Produção do autor (2026)

Legenda: Desenho esquemático bidimensional que apresenta a vista frontal de um pórtico estrutural simples com viga treliçada de banzos paralelos.

O estudo considerou exclusivamente o consumo de aço referente às vigas de cobertura, desconsiderando os quantitativos de pilares, terças, longarinas e elementos de contraventamento, de modo a permitir uma comparação direta entre as duas soluções estruturais avaliadas. Ao total, foram gerados 56 modelos.

4.3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS GALPÕES

Para o pré-dimensionamento dos elementos estruturais, inicialmente foram adotadas relações entre a altura do perfil e o comprimento dos elementos, conforme recomendações apresentadas na literatura de Bellei (2024).

4.3.1 Terças e longarinas

Para as terças e longarinas, foi utilizada a relação entre a altura do perfil e o comprimento do elemento variando entre $L/40$ e $L/60$, sendo L o comprimento do elemento estrutural. Visando a melhor otimização dos perfis adotados, também foi considerada a disposição desses elementos com espaçamento variando de 1,5 m a 2,0 m.

4.3.2 Pilar

Para pilares com comprimentos entre 10 m e 15 m, Bellei (2024) recomenda a utilização da relação entre a altura do perfil e seu comprimento variando entre $L/15$ e $L/18$.

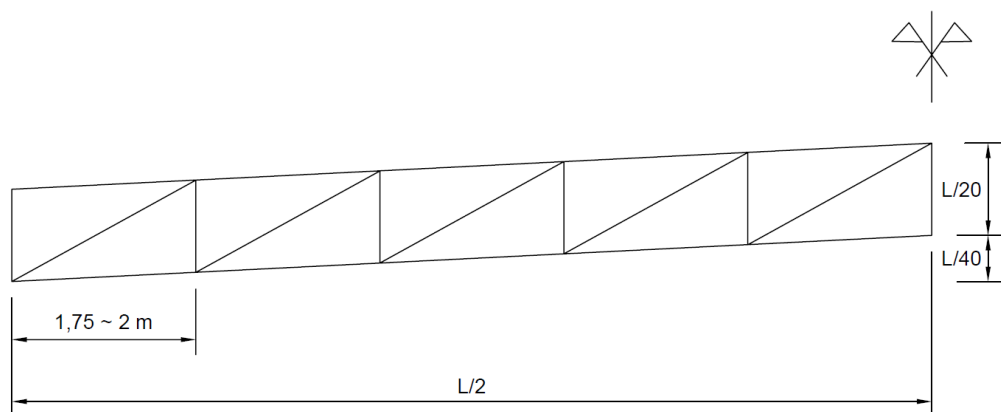
4.3.3 Viga em alma cheia

Para o pré-dimensionamento das vigas de alma cheia em galpões sem ponte rolante, o autor recomenda a adoção da relação entre a altura do perfil e o vão da estrutura variando entre $L/50$ e $L/70$.

4.3.4 Viga treliçada de banzos paralelos

Por fim, para o pré-dimensionamento das vigas treliçadas com banzos paralelos, foi adotado o perfil W 150x13 presente no catálogo da Gerdau como ponto de partida inicial para otimização e cálculo dos demais modelos. Os comprimentos e espaçamentos dos elementos de cordas e diagonais da treliça foram definidos com base na dissertação de Chaves (2007) no artigo de Souza (2019), onde a disposição dos elementos de montantes foi definida com espaçamentos que variam de 1,75 até 2 metros dependendo do comprimento do vão, sendo a altura entre as cordas da treliça de $L/20$, onde “L” é o vão do pórtico (Figura 13).

Figura 13 – Relação altura e vão da viga de cobertura treliçada



Fonte: Produção do autor (2026)

Legenda: Desenho esquemático bidimensional que ilustra a configuração de uma treliça de banzos paralelos. Na figura estão cotadas dimensões e relações adotadas no dimensionamento da treliça.

Nos pórticos localizados nas extremidades dos modelos, foram adotadas vigas de alma cheia com o mesmo dimensionamento utilizado nos respectivos modelos concorrentes analisados. Essa estratégia teve como objetivo otimizar o sistema estrutural, considerando a menor participação dos pórticos de extremidade na absorção dos esforços atuantes quando comparados aos pórticos internos. Dessa forma, buscou-se reduzir o consumo de material sem comprometer o desempenho estrutural da edificação.

4.4 AÇÕES ATUANTES

4.4.1 Cargas permanentes e sobrecarga

Os carregamentos considerados em cada configuração estrutural compreenderam as ações permanentes correspondentes ao peso próprio da estrutura e da cobertura, bem como as sobrecargas de utilização decorrentes da presença de equipamentos. O peso próprio da estrutura metálica foi determinado automaticamente pelo software de análise estrutural, que possui em seu banco de dados as propriedades dos perfis laminados da Gerdau utilizados neste trabalho.

Para a carga permanente referente ao peso próprio das telhas de cobertura, foi adotado o valor de $0,12 \text{ kN/m}^2$, conforme recomendado por D’Alambert (2018).

As ações de sobrecarga foram definidas com base nas recomendações de D’Alambert (2018) e Bellei (2024), adotando-se o valor mínimo de $0,25 \text{ kN/m}^2$, aplicado em projeção horizontal da cobertura, conforme estabelecido pela NBR 8800 (ABNT, 2024).

4.4.2 Ações do vento

As ações do vento foram definidas seguindo as diretrizes estabelecidas pela NBR 6123 (ABNT, 2023). Para os cálculos, foi considerada a cidade de Ilha Solteira ($V_0 = 40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), com terreno fracamente acidentado ($S_1 = 1$), categoria III e edificações não destinadas à ocupação humana ($S_3 = 0,95$).

A partir desses dados, foi realizado o cálculo do fator S_2 pela Equação (1):

$$S_2 = b_m * F_r * \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (1)$$

Com o fator S_2 obtido, foi feito o cálculo do valor da velocidade característica do vento (V_k) e a pressão dinâmica (q) pelas Equações (2) e (3) respectivamente.

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 \quad (2)$$

$$q = 0,613 * V_k^2 \quad (3)$$

Para o cálculo da pressão dinâmica do vento, foram considerados diferentes valores da altura de referência (z), de acordo com a região da edificação em que a ação do vento é aplicada. Para as ações atuantes na cobertura, adotou-se a altura média de 10,30 m, correspondente à cota da cumeeira. Já para os fechamentos laterais, considerou-se a altura de 10,00 m, referente ao topo dos pilares.

O cálculo das ações do vento foi realizado considerando quatro situações de carregamento, com incidência do vento nas direções de 0° e 90° em relação à geratriz do galpão, para as regiões de cobertura e de fechamento lateral, resultando em quatro valores distintos de pressão dinâmica. Os resultados são apresentados nas Tabelas 1 a 4.

Tabela 1 – Pressão dinâmica p/ vento 0° (Cobertura)

Classificação:		Categoria III
		Classe A
Parâmetros	b_m	0.94
	F_r	1
	p	0.1
	z	10.3
Coeficientes	S_1	1
	S_2	0.943
	S_3	0.95
V_k [m/s]		35.83
q [N/m ²]		786.96

Fonte: Produção do autor (2026)

Tabela 2 – Pressão dinâmica p/ vento 90° (Cobertura)

Classificação:		Categoria III
		Classe B
Parâmetros	b_m	0.94
	F_r	0.98
	p	0.105
	z	10.3
Coeficientes	S_1	1
	S_2	0.924
	S_3	0.95
V_k [m/s]		35.11
q [N/m ²]		755.65

Fonte: Produção do autor (2026)

Tabela 3 – Pressão dinâmica p/ vento 0° (Fechamento)

Classificação:		Categoria III
		Classe A
Parâmetros	b_m	0.94
	F_r	1
	p	0.1
	z	10
Coeficientes	S_1	1
	S_2	0.940
	S_3	0.95
V_k [m/s]		35.72
q [N/m ²]		782.14

Fonte: Produção do autor (2026)

Tabela 4 – Pressão dinâmica p/ vento 90° (Fechamento)

Classificação:		Categoria III
		Classe B
Parâmetros	b_m	0.94
	F_r	0.98
	p	0.105
	z	10
Coeficientes	S_1	1
	S_2	0.921
	S_3	0.95
V_k [m/s]		35.01
q [N/m ²]		751.35

Fonte: Produção do autor (2026)

Para a determinação do carregamento que o vento impõe sobre a estrutura, foram calculados os coeficientes de forma interno (C_i) e externo (C_e).

Para os coeficientes de pressão interna, a NBR 6123 (ABNT, 2023) considera a força da ação do vento distribuída uniformemente no interior da edificação. Dessa forma, admite-se que o coeficiente de forma interno (C_i) é igual ao coeficiente de pressão interno (c_{pi}).

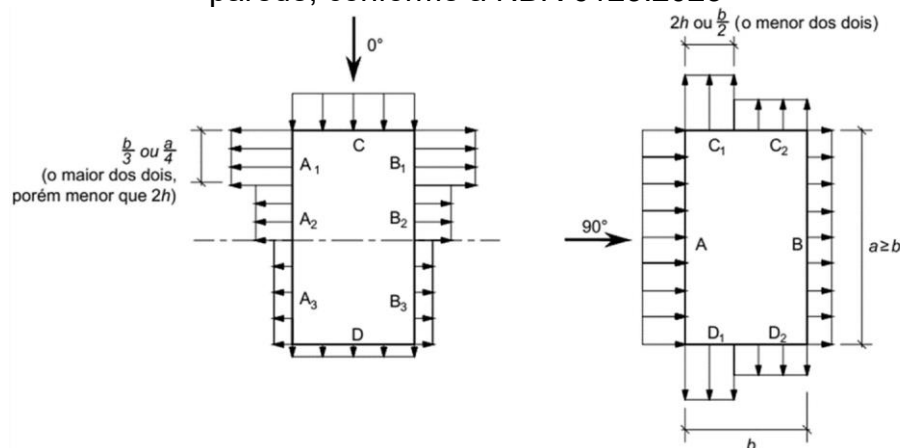
O modelo estrutural do galpão utilizado neste trabalho possui fechamento apenas nas laterais, permanecendo as faces frontal e posterior totalmente abertas para a circulação do ar. Com isso, utilizou-se os coeficientes de pressão interna (c_{pi}) obtidos do seguinte caso:

a) Duas faces opostas igualmente permeáveis; as outras faces impermeáveis:

- Vento perpendicular a uma face permeável: $c_{pi} = +0,2$
- Vento perpendicular a uma face impermeável: $c_{pi} = -0,3$

Para a determinação dos coeficientes de pressão e de forma externos, a NBR 6123 (ABNT, 2023) estabelece a divisão da cobertura e dos fechamentos laterais em diferentes regiões, nas quais as ações do vento podem apresentar variações significativas. Em função dessas diferenças, são atribuídos coeficientes específicos para cada região da edificação, conforme ilustrado nas Figuras 14 e 15.

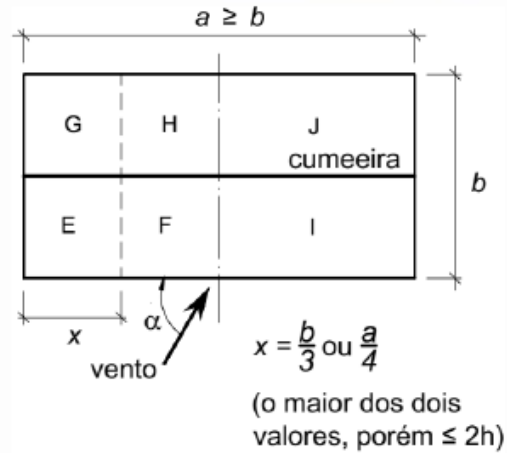
Figura 14 – Distribuição das regiões que apresentam variação da pressão para parede, conforme a NBR 6123:2023



Fonte: Adaptado da NBR 6123 (ABNT, 2023)

Legenda: Vista em planta de duas edificações retangulares de mesma dimensão, com flexa indicando o vento incidindo à 0° no desenho da esquerda, e vento incidindo à 90° na figura da direita. A representação apresenta as paredes subdivididas em áreas, com representação de carregamentos atuando externamente na parede, com diferentes graus de intensidade para região.

Figura 15 – Distribuição das regiões que apresentam variação da pressão para cobertura, conforme a NBR 6123:2023



Fonte: Adaptado da NBR 6123 (ABNT, 2023)

Legenda: Vista em planta de uma edificação retangular, com flexa indicando o vento incidindo à um ângulo variável na parede inferior. A figura apresenta a cobertura subdivididas em diferentes áreas de forma simétrica para cada água do telhado.

A obtenção desses valores foi feita com base em coeficientes tabelados da NBR 6123 (ABNT, 2023), a partir das dimensões da face analisadas. Os coeficientes obtidos estão apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Coeficientes de pressão e de forma externo para paredes

(continua)

Vão [m]	Espaçamento Longitudinal [m]	Direção de incidência do vento	A1 e B1	A2 e B2	A3 e B3	C	D	A	B	C1 e D1	C2 e D2
12	5	0°	-0.90	-0.40	-0.20	0.70	-0.30				
		90°						0.70	-0.60	-0.90	-0.50
	6	0°	-0.90	-0.40	-0.20	0.70	-0.30				
		90°						0.70	-0.60	-0.90	-0.50
	7	0°	-0.90	-0.40	-0.20	0.70	-0.30				
		90°						0.70	-0.60	-0.90	-0.50
14	8	0°	-0.90	-0.40	-0.20	0.70	-0.30				
		90°						0.70	-0.60	-0.90	-0.50
	5	0°	-0.90	-0.44	-0.26	0.70	-0.39				
		90°						0.70	-0.56	-0.90	-0.50
	6	0°	-0.90	-0.40	-0.20	0.70	-0.30				
		90°						0.70	-0.60	-0.90	-0.50
16	7	0°	-0.90	-0.40	-0.20	0.70	-0.30				
		90°						0.70	-0.60	-0.90	-0.50
	8	0°	-0.90	-0.40	-0.20	0.70	-0.30				
		90°						0.70	-0.60	-0.90	-0.50
	5	0°	-0.90	-0.49	-0.33	0.70	-0.48				
		90°						0.70	-0.51	-0.90	-0.50
18	6	0°	-0.90	-0.43	-0.24	0.70	-0.35				
		90°						0.70	-0.58	-0.90	-0.50
	7	0°	-0.90	-0.40	-0.20	0.70	-0.30				
		90°						0.70	-0.60	-0.90	-0.50
	8	0°	-0.90	-0.40	-0.20	0.70	-0.30				
		90°						0.70	-0.60	-0.90	-0.50

(conclusão)

Vão [m]	Espaçamento Longitudinal [m]	Direção de incidência do vento	A1 e B1	A2 e B2	A3 e B3	C	D	A	B	C1 e D1	C2 e D2
18	5	0°	-0.90	-0.50	-0.38	0.70	-0.50				
		90°						0.70	-0.50	-0.90	-0.50
	6	0°	-0.90	-0.47	-0.30	0.70	-0.43				
		90°						0.70	-0.53	-0.90	-0.50
	7	0°	-0.90	-0.41	-0.22	0.70	-0.32				
		90°						0.70	-0.59	-0.90	-0.50
	8	0°	-0.90	-0.40	-0.20	0.70	-0.30				
		90°						0.70	-0.60	-0.90	-0.50
	5	0°	-0.80	-0.50	-0.43	0.70	-0.40				
		90°						0.70	-0.40	-0.80	-0.40
20	6	0°	-0.80	-0.50	-0.35	0.70	-0.40				
		90°						0.70	-0.40	-0.80	-0.40
	7	0°	-0.80	-0.45	-0.28	0.70	-0.35				
		90°						0.70	-0.45	-0.85	-0.45
	8	0°	-0.80	-0.40	-0.20	0.70	-0.30				
		90°						0.70	-0.50	-0.90	-0.50
	5	0°	-0.80	-0.50	-0.46	0.70	-0.40				
		90°						0.70	-0.40	-0.80	-0.40
	6	0°	-0.80	-0.50	-0.39	0.70	-0.40				
		90°						0.70	-0.40	-0.80	-0.40
22	7	0°	-0.80	-0.48	-0.32	0.70	-0.38				
		90°						0.70	-0.42	-0.82	-0.42
	8	0°	-0.80	-0.44	-0.25	0.70	-0.34				
		90°						0.70	-0.46	-0.86	-0.46
	5	0°	-0.80	-0.50	-0.49	0.70	-0.40				
		90°						0.70	-0.40	-0.80	-0.40
	6	0°	-0.80	-0.50	-0.43	0.70	-0.40				
		90°						0.70	-0.40	-0.80	-0.40
	7	0°	-0.80	-0.50	-0.36	0.70	-0.40				
		90°						0.70	-0.40	-0.80	-0.40
24	8	0°	-0.80	-0.47	-0.30	0.70	-0.37				
		90°						0.70	-0.43	-0.83	-0.43

Fonte: Produção do autor (2026)

Tabela 6 – Coeficientes de pressão e de forma externo para cobertura

(continua)

Vão [m]	Espaçamento Longitudinal [m]	Direção do vento	EG	FH	IJ	EFI	GHJ
12	5	0°	-0.94	-0.60	-0.20		
		90°				-0.86	-0.60
	6	0°	-0.94	-0.60	-0.20		
		90°				-0.86	-0.60
	7	0°	-0.94	-0.60	-0.20		
		90°				-0.86	-0.60
	8	0°	-0.94	-0.60	-0.20		
		90°				-0.86	-0.60
	5	0°	-0.94	-0.60	-0.29		
		90°				-0.86	-0.60
14	6	0°	-0.94	-0.60	-0.20		
		90°				-0.86	-0.60
	7	0°	-0.94	-0.60	-0.20		
		90°				-0.86	-0.60
	8	0°	-0.94	-0.60	-0.20		
		90°				-0.86	-0.60

(conclusão)

Vão [m]	Espaçamento Longitudinal [m]	Direção do vento	EG	FH	IJ	EFI	GHJ
16	5	0°	-0.94	-0.60	-0.38		
		90°				-0.86	-0.60
	6	0°	-0.94	-0.60	-0.25		
		90°				-0.86	-0.60
	7	0°	-0.94	-0.60	-0.20		
		90°				-0.86	-0.60
18	8	0°	-0.94	-0.60	-0.20		
		90°				-0.86	-0.60
	5	0°	-0.94	-0.60	-0.44		
		90°				-0.86	-0.60
	6	0°	-0.94	-0.60	-0.33		
		90°				-0.86	-0.60
20	7	0°	-0.94	-0.60	-0.22		
		90°				-0.86	-0.60
	8	0°	-0.94	-0.60	-0.20		
		90°				-0.86	-0.60
22	5	0°	-0.80	-0.40	-0.35		
		90°				-0.86	-0.40
	6	0°	-0.80	-0.40	-0.30		
		90°				-0.86	-0.40
	7	0°	-0.80	-0.40	-0.25		
		90°				-0.86	-0.40
24	8	0°	-0.80	-0.40	-0.20		
		90°				-0.86	-0.40
	5	0°	-0.80	-0.40	-0.37		
		90°				-0.86	-0.40
	6	0°	-0.80	-0.40	-0.33		
		90°				-0.86	-0.40
26	7	0°	-0.80	-0.40	-0.28		
		90°				-0.86	-0.40
	8	0°	-0.80	-0.40	-0.24		
		90°				-0.86	-0.40
28	5	0°	-0.80	-0.40	-0.39		
		90°				-0.86	-0.40
	6	0°	-0.80	-0.40	-0.35		
		90°				-0.86	-0.40
	7	0°	-0.80	-0.40	-0.31		
		90°				-0.86	-0.40
30	8	0°	-0.80	-0.40	-0.27		
		90°				-0.86	-0.40

Fonte: Produção do autor (2026)

Com os valores de coeficientes obtidos, para cada caso, obteve-se os carregamentos atuantes pela Equação (4):

$$q_v = (C_e - C_i) * q \quad (4)$$

4.4.3 Combinações

Após a definição das ações atuantes, foram realizadas as combinações de carregamento necessárias para as verificações normativas, conforme recomendações de Bellei (2024). Para as verificações no Estado Limite Último (ELU), foram adotadas as combinações últimas normais (CUN). Já para as verificações no Estado Limite de Serviço (ELS), foram consideradas as combinações quase permanentes (CQP), frequentes (CF) e raras (CR). As ações e combinações consideradas na análise foram numeradas e dispostas nos Quadros 2, 3 e 4.

Quadro 2 – Ações atuantes sobre os modelos

Ações atuantes		
Casos	Tipo de carregamento	Abreviação
1	Peso próprio	PP
2	Carga permanente	CP
3	Sobrecarga de cobertura	SCC
4	Ação do vento 0° (+)	V1 (+y)
5	Ação do vento 0° (-)	V1(-y)
6	Ação do vento 90° (+)	V2(+x)
7	Ação do vento 90° (-)	V2(-x)

Fonte: Produção do autor (2026)

Quadro 3 - Combinações das ações atuantes para avaliação de Estado Limite Último

Combinação Última Normal	
Casos	Ações majoradas
8	1,25PP+1,4CP+1,5SCC
9	1,25PP+1,4CP+1,5SCC+0,84V1(+y)
10	1,25PP+1,4CP+1,5SCC+0,84V1(-y)
11	1,25PP+1,4CP+1,5SCC+0,84V2(+x)
12	1,25PP+1,4CP+1,5SCC+0,84V2(x)
13	1,25PP+1,4CP+1,2SCC+1,4V1(+y)
14	1,25PP+1,4CP+1,2SCC+1,4V1(-y)
15	1,25PP+1,4CP+1,2SCC+1,4V2(+x)
16	1,25PP+1,4CP+1,2SCC+1,4V2(-x)
17	1,0PP+1,0CP+1,4V1(+y)
18	1,0PP+1,0CP+1,4V1(-y)
19	1,0PP+1,0CP+1,4V2(+x)
20	1,0PP+1,0CP+1,4V2(-x)

Fonte: Produção do autor (2026)

Quadro 4 - Combinações das ações atuantes para avaliação de Estado Limite de Serviço

Combinações para Estado Limite de Serviço		
Tipos de combinações	Casos	Ações majoradas
Combinação Quase-Permanente	21	$1,0PP+1,0CP+0,6SCC$
Combinação Frequente	22	$1,0PP+1,0CP+0,7SCC+0,3V1(+y)$
	23	$1,0PP+1,0CP+0,7SCC+0,3V1(-y)$
	24	$1,0PP+1,0CP+0,7SCC+0,3V2(+x)$
	25	$1,0PP+1,0CP+0,7SCC+0,3V2(-x)$
	26	$1,0PP+1,0CP+0,3V1(+y)$
	27	$1,0PP+1,0CP+0,3V1(-y)$
	28	$1,0PP+1,0CP+0,3V2(+x)$
	29	$1,0PP+1,0CP+0,3V2(-x)$
Combinação Rara	30	$1,0PP+1,0CP+1,0SCC$
	31	$1,0PP+1,0CP+1,0SCC+0,3V1(+y)$
	32	$1,0PP+1,0CP+1,0SCC+0,3V1(-y)$
	33	$1,0PP+1,0CP+1,0SCC+0,3V2(+x)$
	34	$1,0PP+1,0CP+1,0SCC+0,3V2(-x)$
	35	$1,0PP+1,0CP+0,7SCC+1,0V1(+y)$
	36	$1,0PP+1,0CP+0,7SCC+1,0V1(-y)$
	37	$1,0PP+1,0CP+0,7SCC+1,0V2(+x)$
	38	$1,0PP+1,0CP+0,7SCC+1,0V2(-x)$
	39	$1,0PP+1,0CP+1,0V1(+y)$
	40	$1,0PP+1,0CP+1,0V1(-y)$
	41	$1,0PP+1,0CP+1,0V2(+x)$
	42	$1,0PP+1,0CP+1,0V2(-x)$

Fonte: Produção do autor (2026)

4.5 MODELAGEM E ANÁLISE

Após a definição da geometria, dos carregamentos e do pré-dimensionamento dos elementos estruturais, os modelos foram desenvolvidos no *software* Autodesk Robot Structural Analysis (ARSA). Inicialmente, foram inseridos os pórticos transversais correspondentes a cada configuração analisada. Em seguida, foram inseridos os elementos secundários, como terças, longarinas, escoras e contraventamentos, de modo a representar adequadamente o comportamento estrutural do galpão.

Com a geometria do modelo lançada, foram aplicados os carregamentos permanentes, as sobrecargas de cobertura e as ações do vento, bem como suas

respectivas combinações de carregamento para verificação de Estado Limite Último (ELU) e Estados Limite de Serviço (ELS).

Após a análise estrutural, os resultados obtidos foram avaliados e os perfis foram redimensionados manualmente sempre que necessário, até que todos os elementos atendessem aos critérios de resistência e estabilidade pela NBR 8800 (ABNT, 2008), e aos limites de deslocamento em serviço definidos pela NBR 8800 (ABNT, 2024). Durante esse processo, buscou-se adotar a seção estrutural de menor peso capaz de atender às exigências de projeto, possibilitando a determinação do quantitativo de aço empregado em cada modelo analisado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MODELOS COM VIGA EM ALMA CHEIA

Após as etapas de pré-dimensionamento, modelagem e otimização estrutural, foi definida a composição final dos modelos de galpões com pórticos em vigas de alma cheia (Tabela 7).

Tabela 7 – Composição dos modelos de viga em alma cheia

(continua)

Vão [m]	Espaçamento Longitudinal [m]	Espaçamento entre longarinas [m]	Espaçamento entre terças [m]	Pilar	Terças e Longarinas	Viga de Alma Cheia
12	5	1,5	1,5	W 530 x 72,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 26,6
	6	1,5	1,5	W 530 x 85,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 26,6
	7	1,5	1,5	W 530 x 101,0	C 152,4 x 12,20	W 200 x 31,3
	8	1,5	1,5	W 530 x 109,00	C 152,4 x 12,20	W 200 x 31,3
14	5	1,5	1,75	W 530 x 72,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 31,3
	6	1,5	1,75	W 530 x 85,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 35,9
	7	1,5	1,75	W 530 x 101,0	C 152,4 x 12,20	W 200 x 41,7
	8	1,5	1,75	W 530 x 109,00	C 152,4 x 12,20	W 200 x 41,7

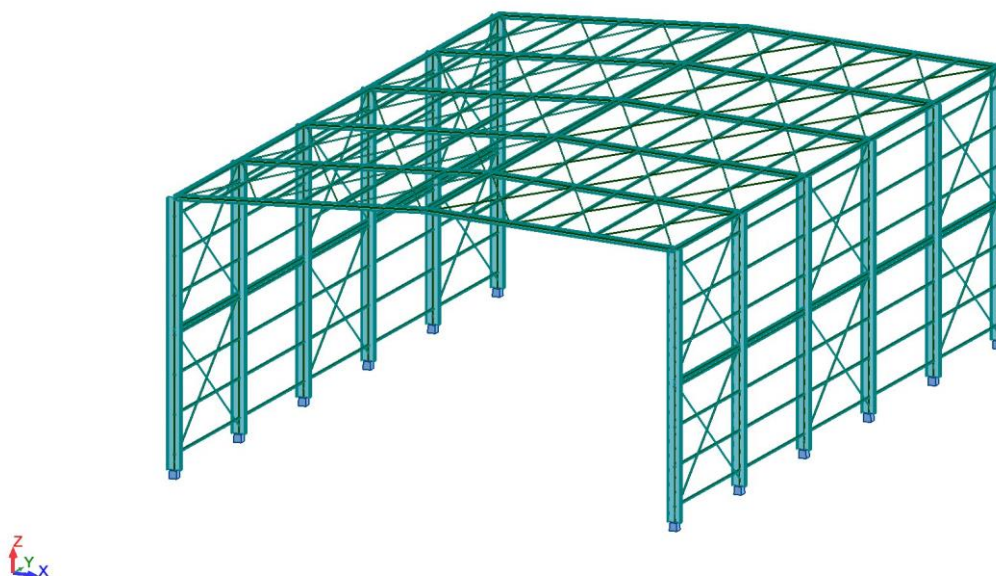
(conclusão)

Vão [m]	Espaçamento Longitudinal [m]	Espaçamento entre longarinas [m]	Espaçamento entre terças [m]	Pilar	Terças e Longarinas	Viga de Alma Cheia
16	5	1,5	2	W 530 x 72,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 35,9
	6	1,5	2	W 530 x 82,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 41,7
	7	1,5	2	W 530 x 101,0	C 152,4 x 12,20	W 200 x 41,7
	8	1,5	2	W 530 x 109,00	C 152,4 x 12,20	W 200 x 52,0
18	5	1,5	1,5	W 530 x 72,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 41,7
	6	1,5	1,5	W 530 x 85,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 46,1
	7	1,5	1,5	W 530 x 92,0	C 152,4 x 12,20	W 200 x 52,0
	8	1,5	1,5	W 530 x 109,00	C 152,4 x 12,20	W 200 x 59,0
20	5	1,5	1,65	W 530 x 66,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 46,1
	6	1,5	1,65	W 530 x 72,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 46,1
	7	1,5	1,65	W 530 x 82,0	C 152,4 x 12,20	W 200 x 52,0
	8	1,5	1,65	W 530 x 92,0	C 152,4 x 12,20	W 200 x 59,0
22	5	1,5	1,8	W 530 x 72,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 52,0
	6	1,5	1,8	W 530 x 72,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 52,0
	7	1,5	1,8	W 530 x 82,0	C 152,4 x 12,20	W 200 x 71,0
	8	1,5	1,8	W 530 x 82,0	C 152,4 x 12,20	W 200 x 86,0
24	5	1,5	2	W 530 x 72,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 59,0
	6	1,5	2	W 530 x 72,0	C 101,6 x 7,95	W 200 x 71,0
	7	1,5	2	W 530 x 92,0	C 152,4 x 12,20	W 200 x 86,0
	8	1,5	2	W 610 x 101,0	C 152,4 x 12,20	W 250 x 89,0

Fonte: Produção do autor (2026)

Os resultados obtidos para os galpões compostos por pórticos em vigas de alma cheia (Figura 16) demonstraram uma redução da taxa de consumo de aço conforme o aumento do vão e do espaçamento longitudinal entre os pórticos (Tabela 8).

Figura 16 – Modelo de viga em alma cheia intermediário (20 x 6)



Fonte: Produção do autor (2026)

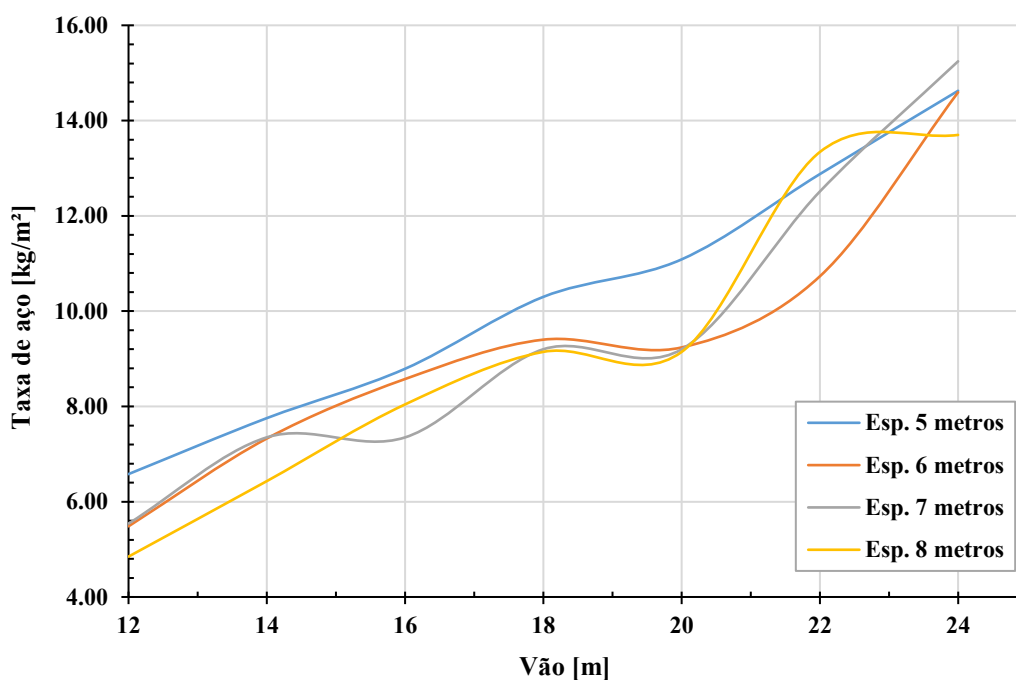
Legenda: Imagem de um ambiente virtual de análise estrutural apresentando a geometria 3D de uma edificação industrial em aço. A representação foca na disposição espacial dos elementos estruturais do modelo de galpão com pórtico em viga de alma cheia.

Tabela 8 – Taxa de aço em kg/m² dos modelos de viga em alma cheia

Vão [m]	Espaçamento [m]			
	5	6	7	8
12	6.58	5.48	5.54	4.85
14	7.75	7.33	7.35	6.43
16	8.79	8.58	7.35	8.04
18	10.30	9.40	9.20	9.15
20	11.09	9.24	9.20	9.14
22	12.88	10.73	12.51	13.34
24	14.63	14.59	15.24	13.70

Fonte: Produção do autor (2026)

Analisando graficamente os resultados (Gráfico 1), observa-se que os modelos com menores vãos apresentaram as menores taxas de consumo de aço, com crescimento progressivo conforme o vão livre aumenta. Esse comportamento está associado ao aumento do momento fletor solicitante conforme a carga atuante sobre a viga aumenta, exigindo seções cada vez mais robustas para atender aos estados limites últimos e de serviço.

Gráfico 1 - Taxa de aço em kg/m² dos modelos de viga em alma cheia

Fonte: Produção do autor (2026)

Analisando o consumo de aço em função da variação dos espaçamentos longitudinais entre pórticos, observa-se que os espaçamentos de 6, 7 e 8 metros apresentam comportamento semelhante, especialmente para os vãos de 18 e 20 metros, nos quais ocorre um patamar de estabilização do consumo antes de um novo crescimento mais acentuado. Esse comportamento está relacionado à descontinuidade existente no catálogo de perfis laminados. Quando uma determinada seção atinge seu limite resistente, torna-se necessária a adoção do próximo perfil disponível, que, em muitos casos, possui capacidade significativamente superior à necessária, resultando em um aumento abrupto na taxa de consumo de aço. Fenômeno semelhante foi identificado por Chaves (2007) na análise de pórticos com vigas treliçadas constituídas por perfis eletrosoldados, sendo denominado pelo autor como “salto de bitola”.

5.2 MODELOS COM VIGA TRELIÇADA DE BANZOS PARALELOS

Para os modelos com viga treliçada, seguiu-se o mesmo procedimento de otimização que para os modelos de alma cheia, chegando na composição final apresentada na Tabela 9.

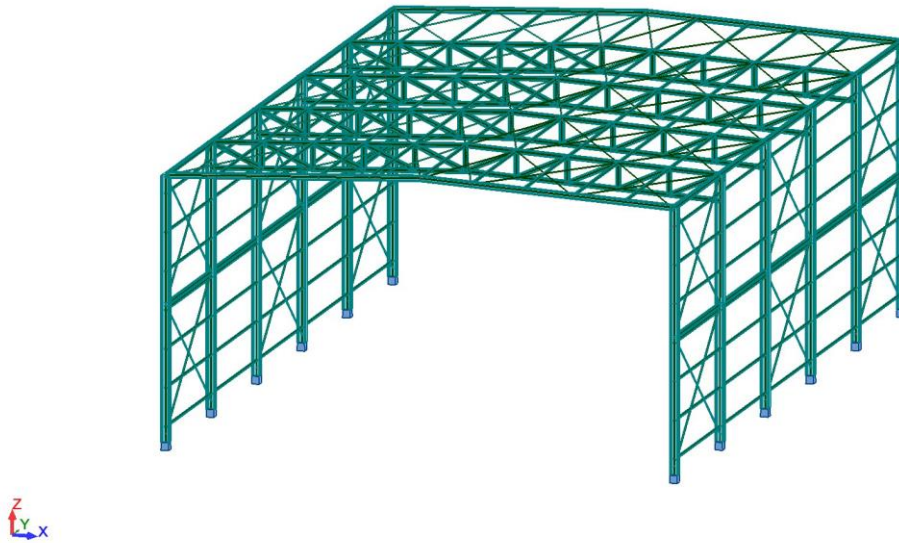
Tabela 9 – Composição dos modelos de viga treliçada com banzos paralelos

Vão [m]	Espaçamento Longitudinal [m]	Espaçamento entre longarinas [m]	Espaçamento entre terças/montantes [m]	Perfil das terças e longarinas	Perfil do Pilar	Perfil das cordas, diagonais e montantes
12	5	1,5	2	C 101,6 x 7,95	W 310 x 97	W 150 x 13
	6	1,5		C 101,6 x 7,95	W 310 x 117	W 150 x 13
	7	1,5		C 152,4 x 12,20	W 380 x 122	W 150 x 13
	8	1,5		C 152,4 x 12,20	W 380 x 122	W 150 x 13
14	5	1,5	1,75	C 101,6 x 7,95	W 310 x 97	W 150 x 13
	6	1,5		C 101,6 x 7,95	W 310 x 107	W 150 x 13
	7	1,5		C 152,4 x 12,20	W 380 x 101	W 150 x 13
	8	1,5		C 152,4 x 12,20	W 380 x 122	W 150 x 13
16	5	1,5	2	C 101,6 x 7,95	W 310 x 97	W 150 x 13
	6	1,5		C 101,6 x 7,95	W 310 x 107	W 150 x 13
	7	1,5		C 152,4 x 12,20	W 380 x 101	W 150 x 13
	8	1,5		C 152,4 x 12,20	W 380 x 122	W 150 x 13
18	5	1,5	1,8	C 101,6 x 7,95	W 310 x 97	W 150 x 22,5
	6	1,5		C 101,6 x 7,95	W 310 x 107	W 150 x 22,5
	7	1,5		C 152,4 x 12,20	W 310 x 107	W 150 x 22,5
	8	1,5		C 152,4 x 12,20	W 380 x 110	W 150 x 22,5
20	5	1,5	2	C 101,6 x 7,95	W 310 x 97	W 150 x 22,5
	6	1,5		C 101,6 x 7,95	W 310 x 107	W 150 x 22,5
	7	1,5		C 152,4 x 12,20	W 310 x 107	W 150 x 22,5
	8	1,5		C 152,4 x 12,20	W 310 x 107	W 150 x 22,5
22	5	1,5	1,8	C 101,6 x 7,95	W 310 x 107	W 150 x 22,5
	6	1,5		C 101,6 x 7,95	W 310 x 107	W 150 x 22,5
	7	1,5		C 152,4 x 12,20	W 310 x 107	W 150 x 22,5
	8	1,5		C 152,4 x 12,20	W 310 x 107	W 150 x 22,5
24	5	1,5	2	C 101,6 x 7,95	W 310 x 107	W 150 x 22,5
	6	1,5		C 101,6 x 7,95	W 310 x 107	W 150 x 22,5
	7	1,5		C 152,4 x 12,20	W 310 x 107	W 150 x 22,5
	8	1,5		C 152,4 x 12,20	W 310 x 107	W 150 x 22,5

Fonte: Produção do autor (2026)

Analisando o consumo de aço obtido, o qual está apresentado na Tabela 10, notou-se que os modelos compostos por pórticos em vigas treliçadas de banzos paralelos (Figura 17) apresentaram um consumo de aço maior nos modelos com menores vãos, quando comparados aos modelos compostos por pórticos de viga em alma cheia.

Figura 17 – Modelo de viga treliçada (20 x 6)



Fonte: Produção do autor (2026)

Legenda: Imagem de um ambiente virtual de análise estrutural apresentando a geometria 3D de uma edificação industrial em aço. A representação foca na disposição espacial dos elementos estruturais do modelo de galpão com pórtico treliçado de banzos paralelos.

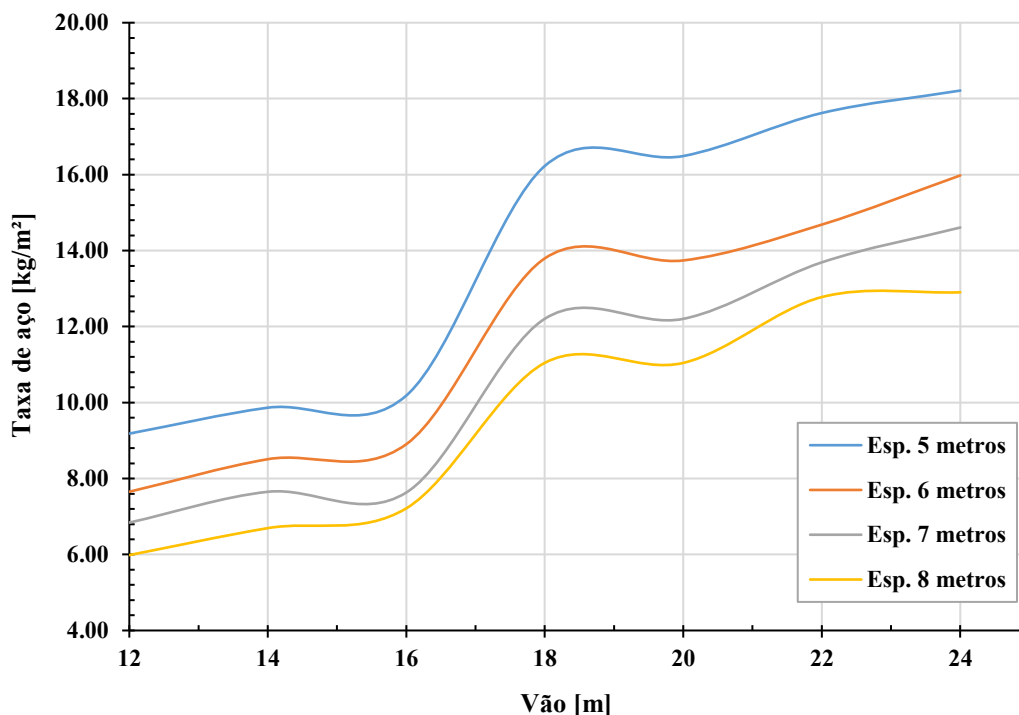
Tabela 10 – Taxa de aço em kg/m² dos modelos de viga treliçada com banzos paralelos

Vão	Espaçamento			
	5	6	7	8
12	9.18	7.65	6.84	5.99
14	9.87	8.51	7.65	6.69
16	10.19	8.90	7.63	7.22
18	16.23	13.80	12.21	11.05
20	16.49	13.74	12.20	11.04
22	17.62	14.68	13.69	12.78
24	18.21	15.98	14.61	12.90

Fonte: Produção do autor (2026)

Esse comportamento pode ser explicado pelo maior número de elementos presentes no sistema treliçado, o que gera um consumo maior de material sem que haja a efetiva utilização da capacidade resistente dos perfis. Analisando graficamente os resultados (Gráfico 2), é possível observar que conforme ocorre o aumento do espaçamento longitudinal, há uma queda na taxa de aço, comportamento condizente com o apontado por Nogueira (2009) para sistemas treliçados.

Gráfico 2 - Taxa de aço em kg/m^2 dos modelos de viga treliçada com banzos paralelos



Fonte: Produção do autor (2026)

Analisando o comportamento das curvas para os modelos com vãos de 16 e 18 metros, observa-se novamente a ocorrência do fenômeno descrito por Chaves (2007) como “salto de bitola”. Nesse caso, o comportamento decorre da substituição do perfil W 150 × 13, com massa linear de 13 kg/m , pelo perfil W 150 × 22,5, cuja massa linear é de 22,5 kg/m , valor significativamente superior ao da seção anterior.

A formação de um patamar de estabilização entre os modelos com vãos de 18 e 19 metros constitui uma evidência desse fenômeno, uma vez que demonstra que a nova seção adotada apresenta capacidade resistente superior à necessária para o vão de 18 metros. Como consequência, mesmo com o aumento das solicitações decorrente da ampliação do vão para 19 metros, não houve necessidade de alteração do dimensionamento, sendo possível manter a mesma seção estrutural. Esse comportamento evidencia que a mudança de bitola ocorreu para um perfil consideravelmente mais robusto do que o estritamente exigido pelas condições de projeto.

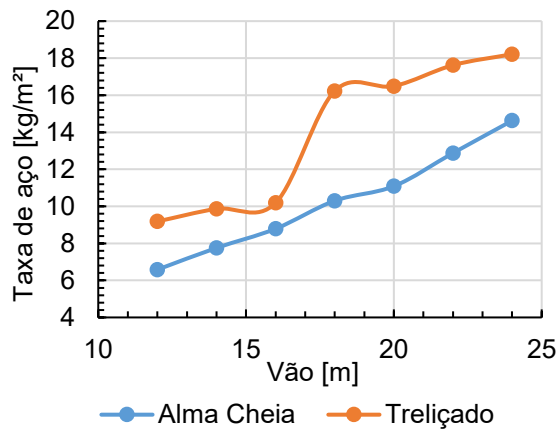
5.3 COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS COM DIFERENTES TIPOLOGIAS DE PÓRTICOS

Ao comparar os resultados dos modelos em alma cheia e os modelos treliçados, nota-se diferenças consideráveis no comportamento estrutural dos dois sistemas.

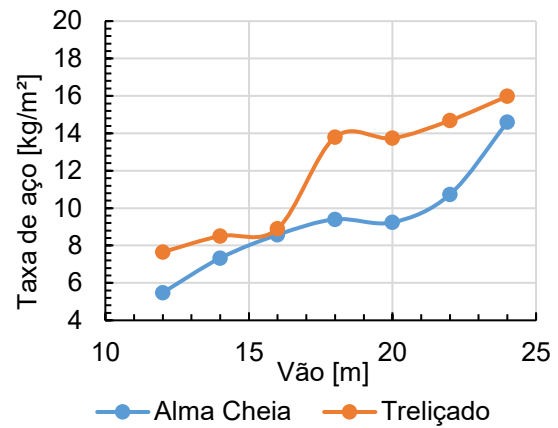
Nos modelos de menores vãos, os galpões compostos por pórticos em vigas de alma cheia apresentaram menores taxas de consumo de aço quando comparados aos modelos treliçados. Esse comportamento pode ser explicado pela simplicidade geométrica do sistema em alma cheia, que possui menor quantidade de elementos estruturais e melhor aproveitamento dos perfis utilizados em vãos menores e intermediários, conforme apontado por Bellei (2024). Já nos modelos treliçados, a presença de diagonais e montantes aumenta a quantidade total de barras presentes na estrutura, elevando o consumo de aço nos menores vãos. Dessa forma, embora as vigas treliçadas apresentem maior eficiência estrutural por transmitirem os esforços predominantemente por meio de forças axiais, explorando de forma mais eficiente a capacidade resistente do aço, diferentemente das vigas de alma cheia, cujo comportamento estrutural é caracterizado pela atuação combinada de esforços de flexão e forças axiais, essa vantagem não foi suficiente para compensar o maior consumo de aço observado nos modelos analisados. Tal comportamento é atribuído à maior quantidade de elementos que compõem as treliças em comparação às vigas de alma cheia, cuja configuração estrutural é mais simples.

Entretanto, conforme os vãos aumentam, observa-se uma redução gradual da diferença entre os dois sistemas estruturais (Figura 18).

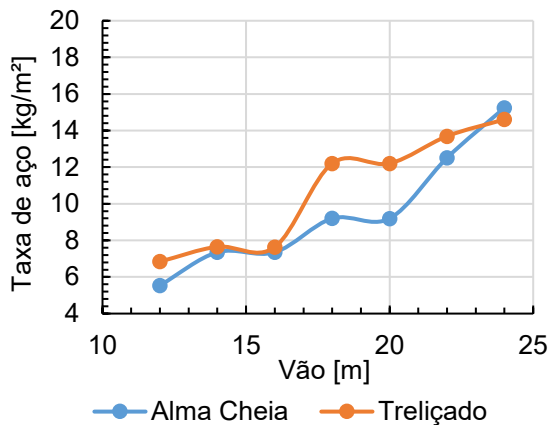
Figura 18 – Comparativo de taxa de aço entre modelos com viga de alma cheia e viga treliçada de banzos paralelos.



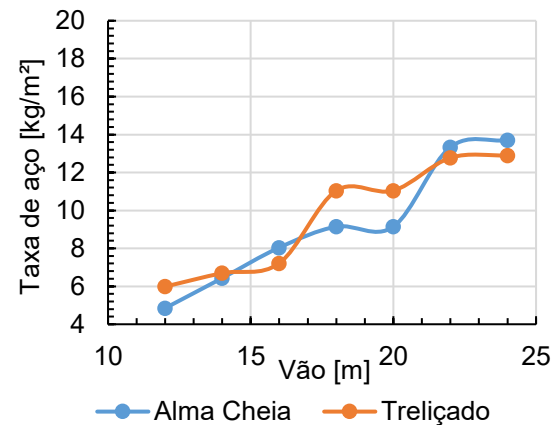
(a) Espaçamento longitudinal de 5 metros.



(b) Espaçamento longitudinal de 6 metros.



(c) Espaçamento longitudinal de 7 metros.



(d) Espaçamento longitudinal de 8 metros.

Fonte: Produção do autor (2026)

Legenda: Apresentação de quatro gráficos que fazem o comparativo dos diferentes sistemas estruturais de pórticos com viga de alma cheia (curva azul) e pórticos com viga treliçada de banzos paralelos (curva laranja), separados por (a) espaçamentos longitudinais de 5 metros, (b) espaçamentos longitudinais de 6 metros, (c) espaçamentos longitudinais de 7 metros e (d) espaçamentos longitudinais de 8 metros.

De acordo com Bellei (2024), sistemas treliçados passam a ser mais eficientes e econômicos para vãos a partir de 25 metros, indicando que, quanto maior o vão, mais eficientes os modelos treliçados tendem a se tornar em comparação com os modelos de alma cheia. Tal vantagem decorre da melhor distribuição dos esforços internos proporcionada pela configuração treliçada, que faz melhor utilização do aço, permitindo a redução do consumo de material e do peso próprio da estrutura para grandes vãos.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para os modelos com vigas de alma cheia demonstraram uma tendência de crescimento progressivo da taxa de consumo de aço à medida que o vão livre aumenta. Esse comportamento está dentro do esperado, uma vez que o acréscimo do vão implica maiores momentos fletores solicitantes, exigindo a adoção de seções cada vez mais robustas para o atendimento aos estados limites últimos e de serviço.

Conforme apontado por Chaves (2007) e Nogueira (2009), galpões constituídos por pórticos com vigas de alma cheia tendem a apresentar menores taxas de consumo de aço para vãos menores quando comparados a modelos com vigas treliçadas. Os resultados obtidos neste estudo corroboram essa tendência, uma vez que os modelos de alma cheia apresentaram melhor desempenho em termos de consumo específico de aço em todo o intervalo analisado. Apesar disso, verificou-se uma redução gradual da diferença de consumo entre os sistemas à medida que os vãos livres e os espaçamentos longitudinais aumentam. Esse comportamento sugere que a tendência indicada pela literatura, de maior competitividade dos sistemas treliçados para grandes vãos, tende a se confirmar para dimensões superiores às avaliadas neste trabalho.

Dessa forma, o trabalho mostrou resultados relevantes, indicando que os objetivos propostos pela pesquisa foram alcançados e que as tendências observadas estão em concordância com o referencial teórico adotado. Além disso, o trabalho permitiu avaliar outros comportamentos associados aos aspectos construtivos de galpões metálicos, como o “salto de bitola” comentado por Chaves (2007) que recai diretamente sobre o consumo de aço da estrutura, sendo também um fator a ser considerado quando se busca desempenho e consumo econômico dos materiais.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTIONAL. **ANSI/AISC 360: Specification for Structural Steel Buildings**. Chicago, EUA, 2022. 780 p.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Design Guide 7: Industrial Building Design**. 3ª ed. Chicago, EUA, 2019. 128 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças Devidas ao Vento em Edificações**. Rio de Janeiro, 2023. 107 p.
- 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, 2024. 293 p.
- 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: ABNT, 2008.
- ASSOCIATION FOR IRON AND STEEL TECHNOLOGY. **AIST TR 13: Guide for the Design and Construction of Mill Buildings**. Pennsylvania, 2021. 106 p.
- BELLEI, Ildony Hélio. **Edifícios industriais em aço: projeto e cálculo**. 7. ed. [S.l.]: Oficina de Textos, 2024. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- CHAVES, Michel Roque. **Avaliação do desempenho de soluções estruturais para galpões leves**. Orientador: Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2007.
- NOGUEIRA, G. S. **Avaliação de soluções estruturais para galpões compostos por perfis de aço formados a frio**. Orientador: Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.
- SOUZA, Flávio Teixeira de; SILVA, Sheila Bárbara Ferreira da; PAULA, Geraldo Donizetti de. **Otimização de treliças de cobertura utilizando o método dos elementos finitos**. Revista Técnico-Científica do Crea-PR, Curitiba, n. 18, p. 1-17, abr. 2019. ISSN 2358-5420.
- D'ALAMBERT, F. **Galpões em Pórticos com Perfis Estruturais Laminados (Coletânea do Uso do Aço)**. Belo Horizonte: GERDAU Açominas, 2018. 7. ed.
- PINHO, F. O. **Galpões em Pórticos de Aço. Construção Metálica**. n.70, Mai-Jun, 2005. p.21-27.
- GERDAU. **Perfis Gerdau: construção metálica — tabela de bitolas**. Porto Alegre: Gerdau, [20--]. 20 p.