

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CAMPUS BACABAL
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL BACHARELADO

FLAVIO MIRANDA SANTOS FILHO

**ANÁLISE DE ESTRUTURAS METÁLICAS SUJEITAS A AÇÃO DO VENTO:
Estudo comparativo no dimensionamento de galpões em regiões distintas do
estado do Maranhão**

BACABAL – MA
2024

FLAVIO MIRANDA SANTOS FILHO

**ANÁLISE DE ESTRUTURAS METÁLICAS SUJEITAS A AÇÃO DO VENTO:
Estudo comparativo no dimensionamento de galpões em regiões distintas do
estado do Maranhão**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil, da Universidade
Estadual do Maranhão (UEMA), como requisito
para obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Esp. Igor Borges Cipriano
Saraiva.

BACABAL – MA

2024

S194a Santos Filho, Flávio Miranda.

Análise de estruturas metálicas sujeitas à ação do vento: Estudo comparativo no dimensionamento de galpões em regiões distintas do Estado do Maranhão / Flávio Miranda Santos Filho – Bacabal - MA, 2024.

00 f: il.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil Bacharelado - Universidade Estadual do Maranhão-UEMA/ Campus Bacabal - MA, 2024.

Orientador: Profº Igor Borges Cipriano Saraiva

1. Vento 2. Galpão Industrial 3. Dimensionamento.

CDU: 624.01

Elaborada por Poliana de Oliveira Ferreira CRB/13-702 MA

FLAVIO MIRANDA SANTOS FILHO

**ANÁLISE DE ESTRUTURAS METÁLICAS SUJEITAS A AÇÃO DO VENTO:
Estudo comparativo no dimensionamento de galpões em regiões distintas
do estado do Maranhão**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Estadual do Maranhão
para o grau de bacharelado em Engenharia
Civil.

Aprovado em: 06/08/2024

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Esp. (Orientador): Igor Borges Cipriano Saraiva
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

Documento assinado digitalmente



NATALIA BARROS FALCAO CUTRIM
Data: 13/08/2024 11:56:30-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Profª. Esp. Natália Barros Falcão Cutrim
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

Prof. Esp. Nádia Isabelli Mesquita Lobo
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

Quero expressar minha gratidão a Deus, que tem sido a rocha sólida em minha jornada, conduzindo-me e guiando-me através das adversidades. Dedico este trabalho também à minha esposa, Cassianne, minha mãe, Josivania, meu pai, Flavio Miranda, e minha irmã, cujo apoio e amor têm sido fundamentais em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha sincera gratidão a Deus por nos conceder, por Sua infinita bondade e misericórdia, a oportunidade e o potencial para alcançar mais uma conquista em nossa vida. Agradeço também a todos que contribuíram para a realização deste trabalho e para o meu desenvolvimento acadêmico ao longo da jornada na Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).

Ao meu orientador, Professor Igor Borges, gostaria de expressar minha profunda gratidão pela dedicação, paciência e orientação ao longo deste projeto. Seu comprometimento e expertise foram fundamentais para sua conclusão.

Por fim, dedico este trabalho às pessoas que amo, especialmente à minha família, que me ofereceu apoio incondicional. Agradeço à minha esposa e aos meus pais pelo incentivo constante, apoio emocional e pela fé inabalável em mim, mesmo nos momentos mais difíceis. Sua confiança foi o alicerce que me sustentou durante todo o processo.

“Nossa maior fraqueza é a desistência. O caminho mais certoiro para o sucesso é sempre tentar apenas uma vez mais”.

Thomas Edison.

RESUMO

O estudo realizado investigou de forma comparativa o dimensionamento de estruturas metálicas de galpões em diferentes regiões do estado do Maranhão sob a influência da ação do vento. Por meio de uma abordagem que envolveu análises detalhadas das cargas exercidas pelo vento, considerando variações regionais como topografia, direção e velocidade do vento, o trabalho buscou atender às normas de segurança estabelecidas pela NBR 6123 (ABNT, 2023). A pesquisa, embasada em estudos bibliográficos e simulações computacionais, teve como objetivo fornecer uma compreensão aprofundada para o dimensionamento de estruturas metálicas, visando à construção de edificações seguras e duráveis capazes de resistir eficazmente às forças ambientais. Os resultados obtidos revelaram que os deslocamentos verticais em Bacabal - MA e Balsas - MA foram de 42,57 mm e 21,37 mm, respectivamente, dentro do limite permitido de 60 mm, valor máximo adotado por norma. Já em São Luís - MA, o deslocamento foi de 82,63 mm, ultrapassando o limite devido às altas cargas de vento. Esses resultados destacam a necessidade de adaptações específicas para garantir a segurança e estabilidade das estruturas conforme as particularidades regionais. Estudos futuros devem investigar métodos de reforço e adaptação para áreas com altas cargas de vento, além de explorar materiais e técnicas de construção que melhorem a resistência e rigidez das estruturas. Isso pode levar a edificações mais seguras e resilientes no Maranhão.

Palavras-chave: Vento; Galpão industrial; Dimensionamento; Cargas; Aço.

ABSTRACT

The study carried out comparatively investigated the design of metallic structures of warehouses in different regions of the state of Maranhão under the influence of Wind action. Through a meticulous approach that involved detailed analyzes of the loads exerted by the Wind, considering regional variations such as topography, Wind direction and speed, the work sought to meet the safety Standards established by NBR 6123 (ABNT, 2023). The research, based on bibliographical studies and computer simulations, aimed to provide an in-depth understanding for the design of metallic structures, aiming to construct safe and durable buildings capable of effectively resisting environmental forces. The results showed that the vertical displacements in Bacabal - MA and Balsas - MA were 42.57 mm and 21.37 mm, respectively, within the allowed limit of 60 mm set by the standard. However, in São Luís - MA, the displacement was 82.63 mm, exceeding the limit due to high wind loads. These results highlight the need for specific adaptations to ensure the safety and stability of structures according to regional characteristics. Future studies should investigate reinforcement and adaptation methods for areas with high wind loads, as well as explore materials and construction techniques that improve the strength and rigidity of structures. This can lead to safer and more resilient buildings in Maranhão.

Keywords: Wind; Industrial warehouse; Sizing; Loads; Steel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Vento derruba estrutura metálica de galpão e interrompe trânsito na BA-120, entre Castro Alves e Santa Terezinha no Estado da Bahia.....	22
Figura 02 - Parte da estrutura metálica do supermercado Mateus – Após desabar..	23
Figura 03 - Ventania causa destruição em dois pontos de Bacabal, MA.	23
Figura 04 - Ação externa do vento em edificações.	24
Figura 05 - Dispositivo para redução da sustentação	25
Figura 06 - Tipos de perfis laminados	31
Figura 07 - Ação combinada do Vento.....	34
Figura 08 - Influência da inclinação do telhado na forma de fluxo.....	36
Figura 09 - Isopleta de velocidade básica	38
Figura 10 - Esquema para adotar os coeficientes obtidos na tabela 10.....	43
Figura 11 - Localização das três cidades analisadas no Maranhão	46
Figura 12 - Velocidade Média do vento em Bacabal - MA	47
Figura 13 - Direção do vento em Bacabal - MA.....	48
Figura 14 - Velocidade média do vento em Balsas - MA.....	50
Figura 15 - Direção do vento em Balsas - MA.....	50
Figura 16 - Velocidade média do vento em São Luís - MA	52
Figura 17 - Direção do vento em São Luís - MA	52
Figura 18 - Interface do Programa CYPE 3D	54
Figura 19 - Interface do Programa Visual Ventos.....	55
Figura 20 - Imagem em 3D da estrutura do galpão.....	56
Figura 21 - Pilares de alma cheia - Vigas treliçadas (articulada ou pórticos)	57
Figura 22 - Caminhamento de forças no interior de uma viga de aço	57
Figura 23 - Incidência do vento no galpão a 0° e 90	62
Figura 24 - Projeção z/x do galpão.....	63
Figura 25 - Contraventamentos laterais	64
Figura 26 - Esquema de uma viga tipo Pratt.	64
Figura 27 - Banzos superiores e inferiores.....	65
Figura 28 - Contraventamentos do telhado	65
Figura 29 - Terças do galpão	66
Figura 30 - Diagonal e montante	66

Figura 31 - Correntes	67
Figura 33 - Sd/Rd - Pórtico treliçado	69
Figura 34 - Coeficientes de pressão externos nas laterais do galpão	74
Figura 35 - Coeficientes de pressão externa – telhado	75
Figura 36 - Deslocamento do galpão com vento 0°	76
Figura 37 - Deslocamento do galpão com vento 0°	77
Figura 38 - Deslocamento do galpão com vento 0°	77
Figura 39 - Forças devido ao vento	79
Figura 40 - Forças devido ao vento	79
Figura 41 - Forças devido ao vento	80
Figura 42 - Forças devido ao vento	80
Figura 43 - Forças devido ao vento	81
Figura 44 - Forças devido ao vento	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Velocidade do vento e seus efeitos.....	35
Tabela 2 - Parâmetros Meteorológica	39
Tabela 3 - Valores mínimos dos fatores estatísticos <i>S3</i>	39
Tabela 4 - Coeficientes de pessão e de forma, externos, para paredes de edificações de planta retangular.	40
Tabela 5 - Coeficientes de projetos.....	42
Tabela 6 - Dimensões gerais para o galpão tipo	58
Tabela 7 - Velocidade básica do vento registrado a adotado.....	60
Tabela 8 - Tabela resumo dos perfis das barras do galpão tipo.....	68
Tabela 9 - Fator topográfico <i>S1</i>	70
Tabela 10 - Fator de rugosidade do terreno <i>S2</i>	71
Tabela 11 - Fator estatístico.....	72
Tabela 12 - Velocidade característica <i>VK</i>	72
Tabela 13 - Pressão dinâmica (q)	73
Tabela 14 - Resultados dos Objetivos específicos.....	85
Tabela 15 - Resultados dos Objetivos específicos.....	86

LISTA DE GRÁFICOS

Gráficos 1 - Comparaçāo dos resultados obtidos no projeto.....84

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – Sociedade Americana de testes de materiais
DIN – Instituto Alemão para normatização
Mpa – Mega Pascal
NBR – Norma Brasileira
TP – Telha de zinco trapezoidal
UEMA – Universidade Estadual do Maranhão

LISTA DE ABREVIATURAS

C_{p_e} – Coeficiente de pressão externa

C_{p_i} – Coeficiente de Pressão interna

C_e – Coeficiente de forma

S_1 – Fator topográfico

S_2 – Fator de rugosidade do terreno

S_3 – Fator estatístico

V_0 – Velocidade Básica

V_k – Velocidade característica

b – Base do galpão

BA – 120 – Via estadual da Bahia – BA

Fr – Parâmetro de cálculo

km/h – Quilômetro por hora

KN/m² – Quiloneutron por metro quadrado

m – Metros

m/s – Metros por segundo

MA – Maranhão

P – Parâmetro de cálculo

q – Pressão dinâmica

Tg – Tangente

z – Altura total do galpão

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	19
1.1 Historico e contextualização do problema.....	20
1.2 Justificativa.....	25
1.3 Objetivos	27
1.3.1 Objetivo geral	27
1.3.2 Objetivos específicos.....	27
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	28
2.1 Processos de obtenção do aço.....	28
2.2 Aços na construção civil	29
2.3 Classificações do aço estrutural	30
2.4 Perfis estruturais de aço.....	31
2.5 Cargas	32
2.5.1 Permanentes	32
2.5.2 Sobrecarga.....	33
2.5.3 Forças Devido ao Vento	33
2.5.3.1 Efeitos do vento.....	34
2.5.3.2 Inclinação do telhado.....	35
2.6 Formas e proporções do galpão.....	37
2.7 ABNT NBR 6123 (2023)	37
2.7.1 Coeficiente de pressão externa (Cpe) e de forma externa	40

2.7.2 Coeficientes de pressão e de forma, externos, para telhados com duas águas, simétricos, em edificações de planta retangular.....	42
2.7.3 Coeficiente de pressão interna (Cpi)	43
3. METODOLOGIA	45
3.1 Velocidades básicas para regiões em estudo	45
3.1.1 Bacabal – MA	46
3.1.2 Balsas – MA	48
3.1.3 São Luís – MA.....	51
3.2 Softwares para simulações computacionais	53
3.3 Caracterizações do galpão tipo	55
3.3.1 Concepção das estruturas.....	56
3.3.2 Espaçamento dos pórticos	58
3.4 Cargas adotadas	58
3.4.1 Carga Permanente	58
3.4.2 Carga accidental	59
3.4.3 Sobrecarga de Vento para as Regiões em Análise.....	59
3.4.3.1 Velocidade básica	59
3.4.3.2 Cálculos da Pressão Dinâmica do Vento e dos Coeficientes de Distribuição de Pressão do Vento Utilizando a NBR 6123 (ABNT, 2023).....	60
3.4.3.3 Análise do deslocamento da estrutura sob as cargas de vento nas três regiões utilizando o CYPE 3D	62
3.5 Processo e implementação de dados e conceituação dos elementos estruturais.....	62

3.5.1 Inserção dos Dados no Software	62
3.5.2 Definição dos Perfis das Barras	68
3.5.3 Inserção das Cargas	68
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1 Dimensionamento	69
4.1.1 Dimensionamento do Pórtico treliçado	69
4.2 Resultados dos cálculos da Pressão Dinâmica do Vento e dos Coeficientes de Distribuição de Pressão do Vento nas Regiões em Análise Utilizando a ABNT NBR 6123 (2023)	70
4.2.1 Pressão dinâmica	70
4.2.2 Resultados dos Coeficientes de Distribuição de Pressão Devido ao Vento utilizando o Visual Vento	73
4.3 Análises comparativas dos coeficientes de pressão nos telhados dos galpões das regiões em estudo	74
4.3.1 Coeficientes de Pressão no Telhado nas Regiões em estudo	75
4.4 Resultados das cargas de ventos no galpão de cada região – CYPE 3D	76
4.5 Esforços resultantes da carga de ventos ultilizando o Visual Ventos	78
5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
REFERÊNCIAS	87

1.0 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a Engenharia Civil tem sido desafiada por uma crescente demanda, impulsionada pela busca incessante por otimização e eficiência na execução de obras e projetos, visando minimizar custos e maximizar lucros em um contexto globalizado. No entanto, essa pressão por eficiência muitas vezes tem levado à negligência na análise minuciosa dos aspectos que regem a segurança das edificações, o que pode resultar em falhas futuras em elementos cruciais para a estabilidade dos edifícios. Assim, é imprescindível que os projetos sejam concebidos com foco na garantia da proteção da edificação em todas as circunstâncias, priorizando a segurança como critério primordial ao longo de todas as etapas do processo de projeto (Araújo L., 2022).

Nesse contexto, a consideração da ação do vento sobre as estruturas emerge como um aspecto particularmente relevante na elaboração de projetos. O vento se destaca como um dos principais agentes a serem analisados durante o projeto estrutural da construção, especialmente em casos que envolvem edifícios altos, pontes, coberturas, galpões e outras estruturas similares. A interação entre a velocidade e direção do vento e a geometria da estrutura pode resultar em cargas dinâmicas significativas, as quais devem ser cuidadosamente avaliadas para garantir a estabilidade e segurança da edificação ao longo de sua vida útil. (Blessmann, 1978)

No Brasil, as cargas de vento variam amplamente devido a diferenças na extensão geográfica, clima e características do terreno. Conforme citado por M. Mauricio (2007), é observado que os ventos desempenham um papel significativo na ocorrência de sinistros no Brasil, principalmente em áreas caracterizadas pela sua intensidade. Por exemplo, na região Sul do país, os vendavais são frequentes, com velocidades chegando à média de 50 a 80 km/h, e constantemente resultando em danos substanciais às estruturas.

Porém, baseado nos estudos acima, M. Mauricio (2007) deixa clara a importância de considerar os efeitos do vento em determinadas estruturas. No contexto do estudo, mais especificamente no estado do Maranhão, Não há evidências frequentes de terremoto, nevascas, furacões ou grandes tempestades, o que leva alguns construtores ou projetistas estruturais a não prestarem a devida

atenção a esses fenômenos naturais, que em certos casos de maiores intensidades torna-se de interesse na Engenharia estrutural. Contudo, a integridade estrutural e segurança em projetos de estruturas metálicas de galpões tornam-se inerente a certos riscos e danos em edificações, quando a ação do vento não é considerada devidamente.

Portanto, este trabalho visa não apenas investigar como as características específicas do vento influenciam o dimensionamento e a resposta estrutural, mas também realizar uma análise comparativa e detalhada das cargas exercidas pelo vento no dimensionamento de estruturas de galpões em três regiões distintas do estado do Maranhão. Essa abordagem permitirá considerar variações regionais, tais como topografia, efeitos urbanos, direção e velocidade do vento, atendendo às normas de segurança, conforme estabelecido pela Norma Brasileira NBR 6123 (ABNT, 2023). Através de estudos bibliográficos e análises conclusivas das verificações de segurança e estabilidade, este trabalho visa fornecer compreensão fundamental para o dimensionamento de estruturas metálicas sujeitas à ação do vento, contribuindo para a construção de edificações seguras e duráveis, capazes de resistir eficazmente às forças ambientais.

1.1 Historico e contextualização do problema

Ao longo da história, as guerras têm desempenhado um papel significativo no estímulo ao crescimento da ciência e tecnologia. A necessidade de suprir as demandas dos exércitos em campanha levou à solução de problemas logísticos complexos, impulsionando avanços em áreas como construção de estradas, canais, fortificações e desenvolvimento de novas técnicas de manufatura. No século XX, com o advento da Revolução Industrial e o aprimoramento da manufatura, as relações entre as diversas áreas da engenharia foram intensificadas, resultando em um rápido crescimento dos equipamentos e da produção. (Araújo 2022).

Nesse contexto, os processos de fabricação foram aprimorados, levando ao desenvolvimento de materiais com maior resistência mecânica e tenacidade. Com a entrada desses materiais no mercado, houve um interesse crescente pelas estruturas metálicas, impulsionando avanços significativos no campo da engenharia estrutural. O estudo das estruturas metálicas passou a ser uma área de interesse

para calculistas e engenheiros, à medida que novas técnicas de dimensionamento e análise eram desenvolvidas para lidar com esses materiais de alta resistência.

Dessa forma, baseado na utilização de elementos estruturais produzidos totalmente em material metálico, as estruturas metálicas, comumente destacadas por sua versatilidade, durabilidade e facilidade na montagem, tornaram essas estruturas uma escolha comum em projetos. Porém, a análise da ação do vento nessas estruturas se torna ainda mais complexa devido à natureza não determinística desse fenômeno natural. Segundo Aguilera e Rodrigues J. (2007), a representação matemática do carregamento do vento é uma tarefa desafiadora, exigindo estudos em laboratórios através de ensaios em "túneis de vento" e avaliações por métodos probabilísticos. Tais estudos permitem o reconhecimento de diversos fatores cruciais, os quais, se devidamente considerados, contribuem para uma análise mais segura da ação do vento. No entanto, é importante reconhecer que as condições em laboratório diferem das condições reais da estrutura em serviço, uma vez que esta está diretamente exposta aos fenômenos atmosféricos, como turbulências, rajadas de vento e tornados. Esses efeitos, especialmente as rajadas de vento, podem aumentar significativamente a resposta do sistema, tornando necessário considerar não apenas o caráter estático, mas também o dinâmico da situação, a fim de garantir a segurança e evitar danos ou colapsos estruturais.

As estruturas metálicas, notáveis por diversos fatores como mencionado anteriormente, possuem elementos metálicos estruturais que desafiam alturas e grandes vãos, o que despertou interesse para sua utilização em obras de grande porte, como os galpões, que têm sido construídos para diversos fins, destacando-se nas regiões do Maranhão. No entanto, a ação do vento, gerada por diferenças de temperatura e pressão entre massas de ar na atmosfera, tornou-se um desafio significativo para essas estruturas.

Esses ventos são geralmente provocados quando frentes frias encontram o ar quente, gerando rajadas de vento, destacando-se especialmente em situações prévias às chuvas, períodos em que essas ações se intensificam nas regiões em estudo. (Fuente V. et al., 2013)

A desconsideração para com os ventos intensos e intempéries tem recentemente provocado uma série de acidentes envolvendo estruturas metálicas em diversas regiões do Brasil. Na BA-120, entre Castro Alves e Santa Terezinha,

uma estrutura metálica de um galpão colapsou sobre a pista em virtude de ventos fortes, resultando na interdição da rodovia e causando um longo congestionamento, embora sem registro de feridos. Em São Luís, uma estrutura metálica lateral de um supermercado ruiu durante uma intensa precipitação pluviométrica, danificando cinco veículos estacionados. Não houve feridos, apenas danos materiais. Em Bacabal - MA, uma ventania de três minutos ocasionou a queda de uma coluna de concreto e parte da cobertura de um posto de combustível e uma fazenda, gerando danos significativos, mas sem vítimas. Em todos os casos, as condições climáticas adversas foram os principais fatores que contribuíram para os incidentes.

Figura 01 - Vento derruba estrutura metálica de galpão e interrompe trânsito na BA-120, entre Castro Alves e Santa Terezinha no Estado da Bahia.



Fonte: (Forte Noticia, 2024).

Figura 02 - Parte da estrutura metálica do supermercado Mateus – Após desabar



Fonte: (Imirante, 2024).

Figura 03 - Ventania causa destruição em dois pontos de Bacabal, MA.



Fonte: G1 MA, 2014.

Decorrente dos relatos de colapsos de estruturas metálicas provenientes das literaturas citadas é inegável a preocupação com esses determinados cenários. Torna-se evidente a importância vital de uma análise criteriosa das ações atmosféricas que afetam as estruturas metálicas. Com o aumento da frequência e intensidade desses eventos, em grande parte devido às mudanças climáticas

globais, a previsibilidade dessas ações tem se tornado cada vez mais crucial para garantir a segurança e a estabilidade das construções.

Ao analisar a interação entre as estruturas metálicas e a ação do vento, é fundamental compreender os conceitos de barlavento e sotavento, bem como os efeitos de sobrepressão e sucção resultantes desses fenômenos. Barlavento refere-se à região de onde o vento sopra em relação à edificação, enquanto sotavento representa a região oposta a essa direção. A sobrepressão ocorre quando a pressão efetiva (Δp), que é definida como a diferença entre a pressão efetiva externa e a pressão efetiva interna, que está acima da pressão atmosférica de referência é positiva, enquanto a sucção ocorre quando essa pressão efetiva é negativa, ou seja, abaixo da pressão atmosférica de referência. Esses conceitos são essenciais para uma análise precisa dos efeitos do vento nas estruturas metálicas, permitindo dimensionamentos adequados e medidas de segurança eficazes para garantir a estabilidade e integridade das edificações.

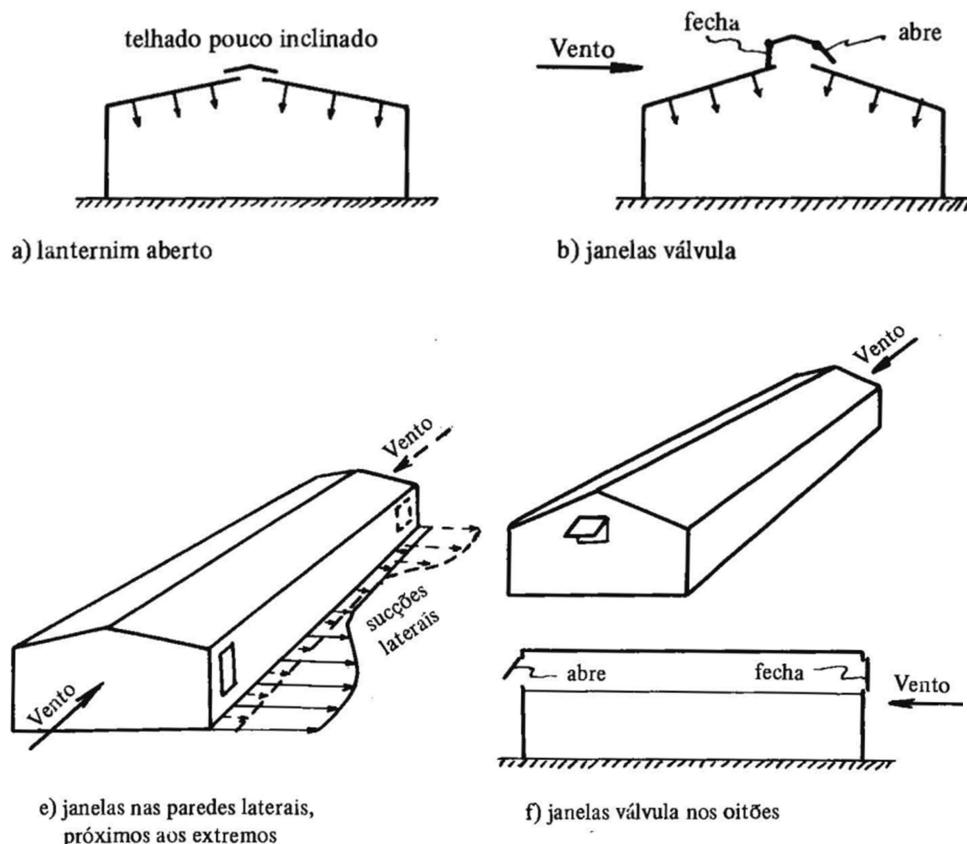
Figura 04 - Ação externa do vento em edificações.



Fonte: aquarius. ime.eb.br.

A segurança estrutural em edificações é essencial para prevenir acidentes decorrentes da ação do vento. Segundo Blessmann (1978), a criação de uma depressão controlada no interior das construções é uma medida eficaz para reduzir o esforço externo de sucção. Isso pode ser alcançado por meio da instalação de aberturas estratégicas, tanto de emergência quanto permanentes, como a abertura parcial do oitão, que são aberturas na parte mais elevada da cobertura do galpão, a construção de janelas basculantes tipo válvula, e o uso de cobogós, como estar representado na figura 6 abaixo.

Figura 05 - Dispositivo para redução da sustentação



Fonte: Blessmann, 1978.

Diante disso, a implantação de medidas de prevenção adequadas se torna essencial para garantir a segurança e a integridade das estruturas e de todos os envolvidos em seu entorno.

1.2 Justificativa

O aumento significativo na construção de galpões industriais, impulsionado pelo crescimento da produção industrial, expansão do comércio e a necessidade de redução dos custos de transporte, destaca a relevância das estruturas metálicas como um método construtivo fundamental. Essa abordagem oferece diversas vantagens, como flexibilidade operacional e um armazenamento mais eficiente e produtivo.

Nos últimos anos, o galpão comercial emergiu como uma fonte de renda lucrativa, representando um mercado viável para empresas que buscam armazenar

seus produtos de maneira segura e eficiente. Dessa forma, com o aumento exponencial da construção de galpões industriais no Brasil, a análise das estruturas metálicas tornou-se crucial quando sujeitas à ação do vento. Nas regiões em estudo, essa análise se revela primordial diante dos recorrentes incidentes registrados nos últimos anos. Estes eventos têm ocasionado significativos prejuízos às empresas responsáveis, em diversos seguimentos. Tais danos não apenas afetam diretamente as estruturas em si, mas também representam uma ameaça à integridade e segurança da sociedade, causando acidentes por objetos desprendidos (telhas, placas etc).

No entanto, como foi tratado anteriormente, esse crescimento vertiginoso também trouxe consigo uma série de desafios, incluindo falhas na análise, no projeto e na execução das estruturas, o que tem acarretado deficiência que pode levar a um dimensionamento inadequado das estruturas, resultando em sobrecargas e possíveis colapsos durante eventos extremos, como ventos fortes. Esses problemas não apenas representam perigos imediatos, mas também podem resultar em interrupções nas operações comerciais, perdas financeiras e danos à reputação da empresa responsável pela construção.

Sendo assim, fica clara a importância de desenvolver um trabalho que, com o aumento da necessidade de estruturas metálicas, principalmente para galpões industriais, e a constatação dos desafios enfrentados devido à variação das condições climáticas, aproveite a oportunidade de realizar um estudo comparativo sobre o dimensionamento dessas estruturas em diferentes regiões do estado do Maranhão. Nesse contexto, o presente trabalho científico busca explorar os fatores de dimensionamento (S1, S2 e S3) e as cargas de vento como elementos preponderantes. A proposta visa integrar os conhecimentos adquiridos ao longo da graduação com a eficiência dos softwares modernos, os quais auxiliam os projetistas na realização de cálculos estruturais. O objetivo principal é desenvolver um único projeto estrutural para cada uma das regiões em análise, como Balsas, Bacabal e São Luís, baseado em um projeto arquitetônico em comum. A expectativa é que essa pesquisa contribua para uma melhor compreensão das demandas específicas de cada localidade, possibilitando a elaboração de estruturas mais seguras e eficientes diante das condições climáticas variáveis enfrentadas no estado do Maranhão.

1.3 Objetivos

Os objetivos se subdividem em dois tipos: objetivos gerais, que fornecem uma visão ampla do propósito da pesquisa, e objetivos específicos, que delineiam as metas detalhadas desta investigação, como descritos a seguir:

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise comparativa do dimensionamento de estruturas metálicas de galpões em três regiões distintas do estado do Maranhão, levando em consideração a ação do vento, a fim de identificar as melhores práticas de projeto, execução e adaptações necessárias para garantir a segurança, estabilidade e a eficiência das estruturas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento das condições climáticas e topográficas nas regiões selecionadas do Maranhão, incluindo informações sobre velocidade e direção do vento, variações topográficas, efeitos urbanos e características geográficas que possam influenciar a ação do vento.

- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente para identificar as normas e diretrizes relacionadas ao dimensionamento de estruturas metálicas sujeitas à ação do vento, considerando as especificidades do Maranhão, bem como as boas práticas nacionais e internacionais.

- Desenvolver modelos de simulações e dimensionamentos computacionais de galpões, como especificado no objetivo geral, de acordo com a norma NBR 6123:2023, utilizando os softwares MULTIPLUS CYPECAD 3D, Visual ventos, Ftool e demais que forem necessários, a fim de analisar o comportamento das estruturas metálicas sujeitas à ação do vento, levando em conta as diferentes condições climáticas e topográficas das regiões em estudo.

- Comparar os resultados das simulações, identificando as diferenças significativas no dimensionamento das estruturas em função das variações do vento e das demais condições específicas das regiões em estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Processos de obtenção do aço

O aço é uma liga essencial na indústria moderna, sendo composto principalmente por ferro e carbono, além de outros elementos que podem ser adicionados para conferir propriedades específicas. A obtenção do aço é um processo complexo que envolve etapas distintas dentro da siderurgia. O processo inicia-se com a obtenção do ferro-gusa a partir do minério de ferro, carbono e calcário no alto-forno. Nesta etapa, ocorre a redução do minério de ferro, resultando no ferro-gusa líquido e na escória. O ferro-gusa possui alto teor de ferro (90-95%), carbono (3,5-4,5%) e traços de outros elementos como manganês, silício, enxofre e fósforo, que são provenientes dos minérios (Braga *et al.*, 2020).

Após a obtenção do ferro-gusa, ele é levado à aciaria para o processo de refino. Nesta fase, o ferro-gusa líquido é tratado para remover impurezas através da oxidação controlada com injeção de oxigênio. As impurezas reagem com o oxigênio e são transferidas para a escória, enquanto o teor de carbono é ajustado conforme necessário para produzir diferentes tipos de aço. O aço líquido, após o refino na aciaria, é direcionado ao lingotamento, onde é solidificado em formas semiacabadas como placas e blocos. Posteriormente, essas peças são processadas na laminação, onde ocorre a deformação para ajustar a espessura e o formato do material. Este processo é crucial para a fabricação de produtos finais como tubos, chapas e barras. (Braga *et al.*, 2020).

Além do processo tradicional com minérios de ferro, o aço também pode ser produzido pela reciclagem de sucata em fornos elétricos, conhecido como rota semi-integrada. Este método é dependente da disponibilidade de sucata metálica e é uma alternativa sustentável para a produção de aço.

Assim, conforme Braga *et al.* (2020), o aço pode ser categorizado com base no teor de carbono, o que impacta significativamente suas propriedades mecânicas e suas aplicações finais:

- **Aço de alto teor de carbono** (0,61-2% de carbono): utilizado em facas e ferramentas de corte devido à sua alta dureza.

- **Aço de médio teor de carbono** (0,2-0,6% de carbono): empregado em pregos, trilhos e vigas devido à sua resistência e ductilidade adequadas.
- **Aço de moderado teor de carbono** (0,15-0,25% de carbono): utilizado em cabos, pregos e ferraduras, equilibrando resistência e facilidade de conformação.
- **Aço de baixo teor de carbono** (menos de 0,15% de carbono): caracterizado por sua baixa dureza e alta maleabilidade, empregado em arames e peças que exigem facilidade de conformação.

2.2 Aços na construção civil

O uso crescente de estruturas metálicas na construção civil, conforme observado por fontes como a *WorldSteel Association*, reflete uma tendência global impulsionada pela estabilidade, versatilidade e resistência do aço. No contexto brasileiro, onde configura como o 8º maior produtor mundial de aço, conforme mencionado pela fonte citada anteriormente, é notável a proeminência de projetos de grande envergadura que se beneficiam do emprego dessas estruturas. Desde o século XVIII, o aço tem sido associado à inovação na construção civil, como exemplificado pela construção pioneira da ponte sobre o Rio Severn, na Inglaterra. Essa transição para o uso do aço representou não apenas uma mudança na escolha de materiais, mas também uma revolução na engenharia, permitindo a criação de estruturas mais eficientes e duráveis.

O histórico do uso do aço na construção, conforme relatado por Bellei (2003), remonta ao século XVIII, com suas primeiras aplicações na França e na Inglaterra. No Brasil, a utilização do ferro e do aço na construção teve início por volta de 1812, com destaque para a Ponte de Paraíba do Sul, no Rio de Janeiro. Desde então, o país testemunhou um crescimento significativo na demanda por estruturas metálicas, especialmente no setor industrial. Esse histórico demonstra a longa trajetória do aço como um elemento fundamental na construção civil, destacando sua importância contínua e sua adaptabilidade às necessidades modernas de projetos de construção.

A utilização do aço na construção civil representa uma prática inovadora e vantajosa, sendo evidenciada por diversos aspectos destacados na literatura. Conforme Bellei (2003), as estruturas de aço apresentam uma série de vantagens

que as tornam uma escolha atrativa para projetos diversos. Em primeiro lugar, a alta resistência do material em diferentes estados de tensão permite que os elementos estruturais suportem grandes esforços, mesmo com seções relativamente pequenas, o que resulta em estruturas mais leves em comparação com o concreto armado. Além disso, a homogeneidade e as propriedades bem definidas do aço proporcionam uma margem de segurança considerável no trabalho, contribuindo para a estabilidade das estruturas.

Porem é crucial reconhecer que, apesar das numerosas vantagens apresentadas por essas estruturas, também enfrentamos uma série de desafios, especialmente relacionados ao comportamento estrutural em diversas situações e a precisa avaliação das cargas. O dimensionamento inadequado pode resultar em deficiências estruturais significativas. Por conseguinte, é de extrema importância enfatizar a análise das cargas, sobretudo as provenientes de ventos, ao lidar com o dimensionamento de estruturas metálicas, como no caso específico dos galpões.

2.3 Classificações do aço estrutural

De acordo com Bellei (2010), é possível dividir os aços estruturais em duas classes distintas: os aços carbono e os aços de baixa-liga.

Aços Carbono

Ainda de acordo com Bellei (2010), os aços-carbono são os mais comuns, onde o carbono aumenta a resistência em relação ao ferro puro, complementado pela adição de manganês. Em estruturas usuais de aço, são preferidos aqueles com teor de carbono equivalente de até 0,45% para garantir boa soldabilidade. O aumento do carbono aumenta resistência e dureza, mas torna o aço mais quebradiço e reduz sua soldabilidade. Exemplos comuns incluem ASTM A36 e A570, além dos ABNT NBR 7007, 6648, 6649, 6650, e DIN S137.

Aços de baixa-liga

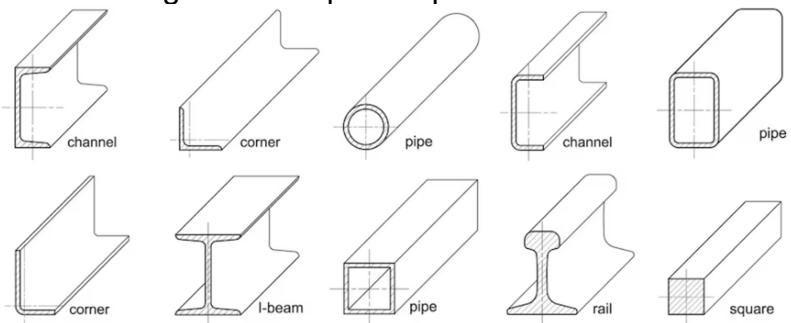
Os aços de baixa liga são essencialmente aços carbono com adição de pequenas quantidades de elementos de liga, como nióbio, cobre manganês e silício.

Esses elementos modificam a microestrutura para grãos finos, aumentando a resistência do aço. Assim, mesmo com um teor de carbono de aproximadamente 0,20%, é possível alcançar alta resistência mantendo a boa soldabilidade. Exemplos comuns incluem ASTM A572, A441, ABNT NBR 7007, 5000, 5004, e DIN ST52 (Bellei, 2010).

2.4 Perfis estruturais de aço

Os perfis estruturais de aço são elementos cruciais em estruturas metálicas, destacando-se por sua importância no projeto, fabricação e montagem. Com seções transversais que se assemelham a letras como I, H, U, Z e L, os perfis podem ser obtidos por lamação, conformação a frio ou soldagem, denominados, respectivamente, de perfis laminados, como ilustrado na figura 7, podendo ser formados a frio e soldados.

Figura 06 - Tipos de perfis laminados



Fonte: Google imagens, 2024.

Os perfis soldados oferecem grande versatilidade em termos de espessuras, alturas e larguras, reduzindo o peso da estrutura, embora com custo de fabricação maior em comparação aos perfis laminados. Estes últimos são os mais econômicos e dispensam processos "artesanais" de fabricação. Já os perfis formados a frio são preferíveis quando não há disponibilidade adequada de perfis laminados no mercado. Além disso, os perfis compostos são obtidos pela junção de chapas ou outros perfis, proporcionando maior flexibilidade de projeto (Silva, 2012).

2.5 Cargas

Os galpões industriais estão sujeitos a um conjunto de cargas que atuam ora isoladamente, ora em combinação umas com as outras. Essas cargas devem ser consideradas na elaboração do memorial de cálculo, conforme os princípios da estática das construções. Devem ser levadas em conta as seguintes influências de cargas, além de outras que possam surgir em casos especiais: cargas permanentes, sobrecargas e cargas devidas ao vento.

As cargas permanentes incluem o peso próprio da estrutura e elementos fixos, como telhas e revestimentos. As sobrecargas são cargas temporárias que podem variar, como o peso de equipamentos e materiais armazenados. Já as cargas devidas ao vento resultam da pressão e sucção exercidas pelo vento sobre a superfície do galpão, que variam conforme a localização geográfica e as condições climáticas. A consideração adequada dessas cargas é essencial para garantir a segurança e a estabilidade da estrutura (Bellei, 2010).

2.5.1 Permanentes

No estudo de estruturas metálicas para um galpão, as cargas permanentes desempenham um papel fundamental no dimensionamento e na segurança da edificação. De acordo com o trabalho de Araújo (2022), as cargas permanentes incluem o peso próprio da estrutura, materiais de construção, instalações fixas e outros elementos que atuam de forma constante ao longo da vida útil da edificação. A consideração precisa dessas cargas, conforme normas técnicas como a NBR 8681 (ABNT, 2003) e a NBR 8800 (ABNT, 2008), é essencial para garantir a estabilidade e o desempenho adequado da estrutura metálica. Ao analisar e dimensionar as cargas permanentes de forma adequada é possível assegurar a segurança estrutural e a durabilidade do galpão, contribuindo para a eficiência e a qualidade do projeto.

2.5.2 Sobrecarga

As sobrecargas em estruturas metálicas referem-se a situações em que essas estruturas suportam cargas superiores às que foram projetadas para manusear de forma segura. Sobrecargas consideradas incluem a sobrecarga accidental e a ação do vento, conforme preconizado pelas normas técnicas pertinentes.

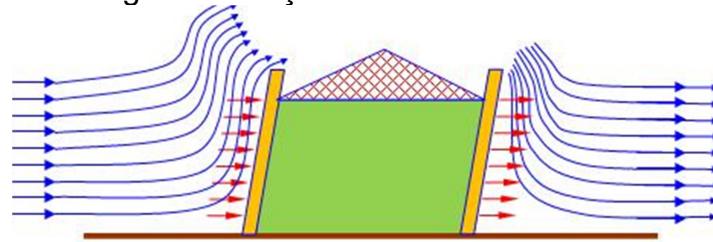
Assim, a ação do vento, determinada pelos critérios da NBR 6123/2023, é crucial para avaliar os esforços provocados por esse agente externo e garantir a estabilidade da estrutura metálica frente a essa ação. Ao analisar e dimensionar as sobrecargas de forma criteriosa é possível assegurar a integridade estrutural e a segurança do galpão em face das diversas solicitações a que a edificação estará sujeita ao longo de sua vida útil.

2.5.3 Forças Devido ao Vento

O movimento do ar, essencial para a dinâmica atmosférica e o deslocamento dos fenômenos meteorológicos, é impulsionado principalmente pela variação da pressão atmosférica. Quando ocorre uma variação na pressão atmosférica, uma força gradiente de pressão é gerada, dando origem ao vento. No entanto, em certas circunstâncias e em determinadas áreas, pode não haver uma variação significativa de pressão na superfície, resultando em um estado de "vento calmo". Caso contraria, a velocidade do vento pode variar amplamente, chegando a velocidades extremamente altas, capazes de causar grande destruição, como observado em tempestades violentas, furacões e tornados. Mesmo em escalas locais, como durante as trovoadas, podem ocorrer rajadas intensas (Nechet *et al.*).

Com isso, as construções enfrentam desafios provenientes das cargas horizontais geradas pelo vento, especialmente as estruturas altas e esbeltas, como é o caso dos galpões. Essas edificações estão mais susceptíveis a esses esforços, uma vez que podem gerar flexão e deslocamento lateral, devido o aumento das cargas laterais.

Figura 07 - Ação combinada do Vento.



Fonte: Google imagens, (2024).

Os principais impactos que o vento pode exercer sobre uma estrutura são as forças laterais que gera. Essas forças resultam da interação entre a pressão direta, a pressão negativa (ou sucção) e os esforços de fricção. A pressão direta surge quando o vento atua perpendicularmente à superfície da estrutura. Por outro lado, a sucção ocorre quando o vento exerce uma força de "puxar", especialmente prejudicial para coberturas e fachadas. A fricção se manifesta quando o ar em movimento contorna a edificação, distribuindo-se ao redor dela, sendo as forças de fricção longitudinal resultado da resistência ao movimento do ar (Ching, 2014 *apud* Nascimento, *et al.*, 2016).

2.5.3.1 Efeitos do vento

No dimensionamento de estruturas metálicas, especialmente galpões, é crucial considerar as diversas cargas que agem sobre elas. Entre essas cargas, destacam-se as rajadas de vento, cuja intensidade varia de 10 km/h a 40 km/h, ocasionando situações caóticas em determinadas regiões do Maranhão. Essas rajadas são resultado das diferenças de temperatura, evaporação da água, precipitação e rotação da Terra, que geram massas de ar em movimento na atmosfera. A variação na pressão e temperatura atmosférica, influenciada principalmente pela radiação ultravioleta do sol, aquece a superfície terrestre, desencadeando o movimento do ar, ou seja, o vento. O vento exerce forças dinâmicas sobre as estruturas, que podem causar deformações, efeitos nocivos, vibrações e até falhas. A Tabela 1 abaixo apresenta alguns desses efeitos que podem ocorrer quando as cargas de vento não são devidamente consideradas no projeto:

Tabela 1 - Velocidade do vento e seus efeitos

Grau	Velocidade do Vento		Descrição do Vento	Efeitos Devido ao Vento
	Intervalo (em m/s)	Média aprox. (em km/h)		
0	0, 0-0, 5	1	Calmaria	
1	0, 5-1, 7	4	Aura, sopro	A fumaça sobre praticamente na vertical
2	1, 7-3, 3	8	Brisa leve	Sente-se o vento nas faces
3	3, 3-5, 2	15	Brisa fraca	Movem-se pequenos ramos. O vento estende as bandeiras.
4	5, 2-7, 4	20	Brisa moderada	Movem-se pequenos ramos. O vento estende as bandeiras.
5	7, 4-9, 8	30	Brisa vida	Movem-se ramos maiores.
6	9, 8-12, 4	40	Brisa forte	Movem-se arbustos.
7	12, 4-15, 2	50	Ventania fraca	Flexionam-se galhos fortes. O vento é ouvido em edifícios.
8	15, 2-18, 2	60	Ventania moderada	Difícil caminhar. Galhos quebram-se, o tronco das árvores oscila.
9	18, 2-21, 5	70	Ventania	Objetos leves são deslocados, partem-se arbustos e galhos grossos, avarias em chaminés.
10	21, 5-25, 5	80	Ventania forte	Árvores são arrancadas, quebram-se os postes telegráficos.
11	25, 5-29	95	Ventania destrutiva	Avarias severas.
12	29 e mais	105	Furacões	Avarias desastrosas, calamidades.

Fonte: JÚNIOR, M.(2014).

Dessa forma, é nítida a importância do cálculo das forças estáticas resultantes da influência do vento na estrutura, que é determinado com base na velocidade fundamental apropriada para a localização específica da construção e isso inclui considerar a altura da estrutura, a velocidade média do vento na região e outros fatores locais para determinar a resistência necessária das paredes, telhados e fundações. (de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6123, 2023).

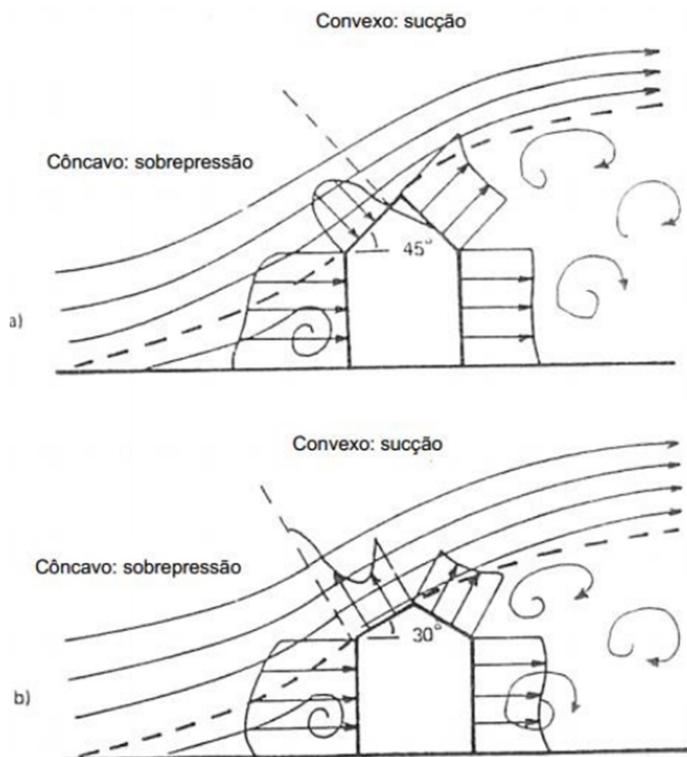
2.5.3.2 Inclinação do telhado

A inclinação inadequada do telhado influencia significativamente as ações locais nas coberturas de galpões. Porém, uma inclinação adequada pode reduzir a pressão do vento sobre a superfície da cobertura, minimizando as cargas laterais e evitando possíveis danos estruturais causados pela ação do vento. Além disso, a inclinação correta pode favorecer a dissipação da energia do vento, reduzindo a probabilidade de ocorrência de fenômenos como a sucção e a turbulência, que podem comprometer a estabilidade da estrutura.

No telhado, fortes sucções devem-se à formação dos dois vórtices de topo, quando o vento incide obliquamente, em torno de 45°. Estes vórtices iniciam-se na quina mais de barlavento, desenvolvendo-se em forma cônica ao longo das duas arestas do telhado. São estas sucções, só ou aliadas a uma sobrepressão interna, as responsáveis pelos casos cada vez mais freqüentes de arrancamentos parciais ou totais de coberturas planas ou de pequena inclinação e constituídas de materiais leves. O arrancamento começa no canto mais solicitado, o de barlavento; à sucção externa pode-se aliar uma sobrepressão interna, provocando o colapso parcial ou total do telhado (Blessmann, 2009, p. 33).

Na Figura 9, é mostrada a influência dessas características no fluxo de ar. Na região de barlavento, distinguem-se duas áreas: uma influenciada pela rugosidade e pela pressão na parede de barlavento, causando redemoinhos cônicos, e outra com linhas de corrente desviadas pela edificação e pelo vórtice de base. Entre essas áreas, existe uma "superfície de separação". A tangente no ponto de contato dessa superfície com o telhado indica se haverá sobrepressão ou sucção. Se a tangente for menor que a inclinação do telhado, haverá sobrepressão; se for maior, haverá sucção. Nas águas de sotavento, haverá apenas sucção.

Figura 08 - Influência da inclinação do telhado na forma de fluxo



Fonte: BLESSMANN, 2001.

2.6 Formas e proporções do galpão

De acordo com Blessmann (2009), a forma e a proporção da edificação podem gerar altas sucções nos telhados e nas paredes. Esse fenômeno ocorre quando o vento sopra paralelamente à cumeeira, resultando em elevadas sucções na zona a barlavento, afetando tanto o telhado quanto a parede. Segundo Blessmann (2009) também enfatiza que essas condições podem levar a uma pressão significativa sobre a estrutura, exigindo uma análise cuidadosa no projeto arquitetônico para garantir a resistência e a estabilidade da edificação diante dessas forças.

2.7 ABNT NBR 6123 (2023)

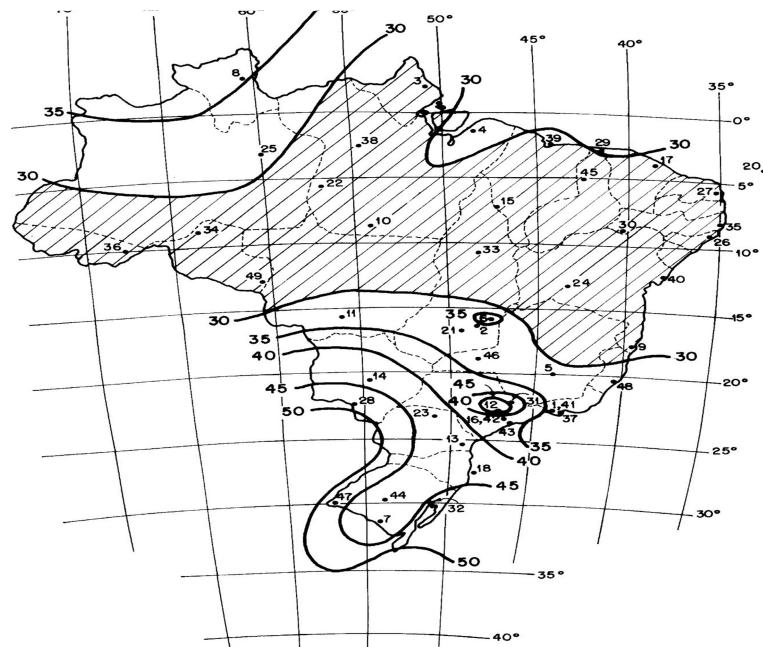
A NBR 6123 (ABNT, 2023) estabelece as condições exigíveis para a consideração das forças resultantes da ação estática e dinâmica do vento, visando ao cálculo estrutural de galpões metálicos.

Essa norma é fundamental para garantir a segurança e a estabilidade das construções metálicas, pois detalha os procedimentos necessários para avaliar corretamente as cargas de vento e seus impactos sobre as estruturas. Além disso, a norma proporciona diretrizes para a determinação das pressões de vento em diferentes partes da edificação, levando em conta fatores como a altura, a topografia do terreno e as características específicas de cada projeto.

a) VELOCIDADE BÁSICA (V_0)

Segundo NBR 6123 (ABNT, 2023), a velocidade básica do vento (V_0) é definida como a velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida em média uma vez em 50 anos a 10 metros acima do terreno em campo aberto e plano. A velocidade básica é obtida a partir das isopletas fornecidas por esta norma, como mostra a Figura 9 - Isopletas da velocidade básica no Brasil, com intervalos de 5 m/s.

Figura 9 - Isopleta de velocidade básica



Fonte: ABNT NBR 6123, (2023).

b) VELOCIADE CARACTERISTICA V_K

A velocidade básica do vento é multiplicada pelos fatores S_1 , S_2 e S_3 para ser obtida a velocidade característica do vento (V_K).

$$V_K = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$$

Fator topografico, S_1 :

O fator topográfico considera as diferentes variações do relevo do terreno.

Fator de rugosidade do terreno e dimensões da edificação, S_2 :

O fator S_2 está relacionado à forma e à geometria da superfície exposta ao vento. Considerando a influência da forma da estrutura na distribuição da pressão dinâmica do vento, levando em conta aspectos como a inclinação, a rugosidade e a exposição da superfície.

A obtenção do fator S_2 pode ser obtida pela formula:

$$S_2 = b \ x \ F_r \ x \left(\frac{z}{10}\right)^p$$

b – base do Galpão

z – Altura total do galpão

Os parametros b, F_r e P, sao encontrados na tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros Meteorológica

Categoria	Zg (m)	Parâmetros	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		Fr	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,940	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2023).

Fator estatístico, S_3 :

O fator estatístico S_3 é baseado em conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Sedo assim, o mesmo é obtido de acordo com a tabela 3.

Tabela 3 - Valores mínimos dos fatores estatísticos S_3

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiro e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas do Grupo 1 a 3 durante a construção.	0,83

Fonte: ABNT NBR 6123 (2023).

c) PRESSÃO DINÂMICA (q):

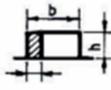
A pressão dinâmica depende da velocidade do vento e de fatores que a influenciam, e pode ser calculada da seguinte forma:

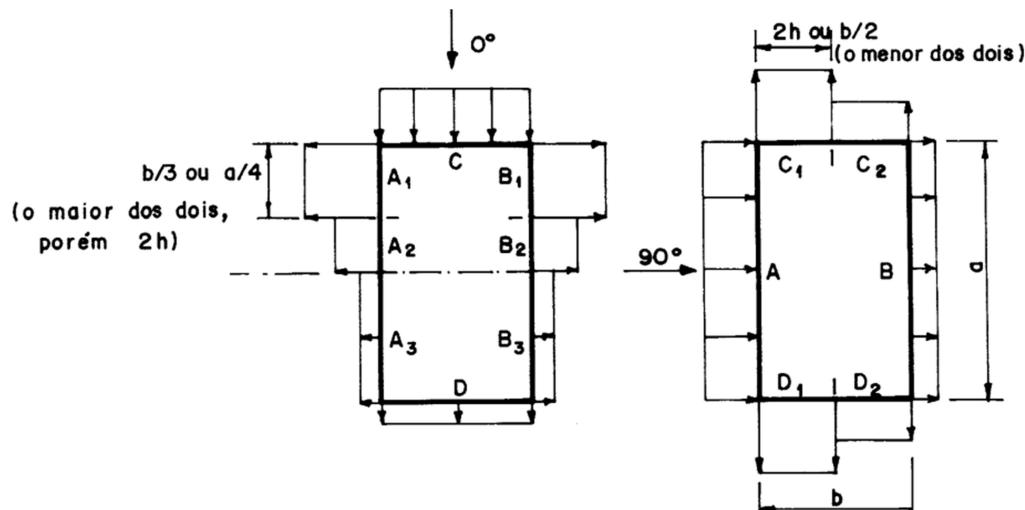
$$q = 0,613 \times (V_K)^2$$

2.7.1 Coeficiente de pressão externa (C_{pe}) e de forma externa

Os coeficientes de pressão e forma externos para edificações com planta retangular, assim como para as direções críticas, estão detalhados na Tabela 4. Esses valores variam conforme a altura da construção. Especificamente, os coeficientes de pressão externa são definidos da seguinte maneira para diferentes alturas:

Tabela 4 - Coeficientes de pressão e de forma, externos, para paredes de edificações de planta retangular.

Altura relativa	Valores de C _{pe} para								C _{pe} médio	
	α = 0°				α = 90°					
	A ₁ e B ₁	A ₂ e B ₂	C	D	A	B	C ₁ e D ₁	C ₂ e D ₂		
 0,2 b ou h (o menor dos dois) $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$ $2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 0,8	- 0,5	+ 0,7	- 0,4	+ 0,7	- 0,4	- 0,8	- 0,4	- 0,9
		- 0,8	- 0,4	+ 0,7	- 0,3	+ 0,7	- 0,5	- 0,9	- 0,5	- 1,0
 $\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$ $2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 0,9	- 0,5	+ 0,7	- 0,5	+ 0,7	- 0,5	- 0,9	- 0,5	- 1,1
		- 0,9	- 0,4	+ 0,7	- 0,3	+ 0,7	- 0,6	- 0,9	- 0,5	- 1,1
 $\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$ $2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 1,0	- 0,6	+ 0,8	- 0,6	+ 0,8	- 0,6	- 1,0	- 0,6	- 1,2
		- 1,0	- 0,5	+ 0,8	- 0,3	+ 0,8	- 0,6	- 1,0	- 0,6	- 1,2



Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2023).

Lembrando que, de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 2023):

- Para a/b entre $3/2$ e 2 , interpolar linearmente.
- Para vento a 0° , nas partes A_3 e B_3 o coeficiente de forma C_e tem os seguintes valores:
 - para $a/b = 1$ mesmo valor das partes A_2 e B_2 .
 - para $a/b \geq 2$; $C_e = -0,2$;
 - para $1 < a/b < 2$: interpolar linearmente.

Para edificações com planta retangular, a distribuição dos coeficientes de pressão externa é crucial para determinar as cargas atuantes nas superfícies expostas ao vento. Esses coeficientes são influenciados pela geometria da edificação e pela direção do vento. Na prática, valores mais altos de coeficientes de pressão podem indicar maiores forças de vento atuando sobre a estrutura, exigindo um reforço estrutural adequado para garantir a segurança e a integridade do edifício. Ao projetar estruturas, engenheiros utilizam esses coeficientes como parâmetros essenciais para cálculos de resistência e estabilidade, assegurando que a edificação possa suportar condições de vento extremas sem comprometer sua funcionalidade ou segurança. (Tullio F. 2019)

2.7.2 Coeficientes de pressão e de forma, externos, para telhados com duas águas, simétricos, em edificações de planta retangular.

De acordo com a norma NBR 6123 (ABNT, 2023), os coeficientes de pressão e de forma para telhados com duas águas simétricos em edificações de planta retangular são essenciais para o cálculo preciso das forças do vento atuantes nessas estruturas. A Tabela 5 apresenta valores médios desses coeficientes que devem ser aplicados no dimensionamento, verificação e ancoragem dos elementos de vedação e da estrutura secundária desses telhados. É fundamental considerar esses coeficientes para garantir a estabilidade e resistência adequadas contra as ações do vento, contribuindo assim para a segurança e durabilidade da edificação.

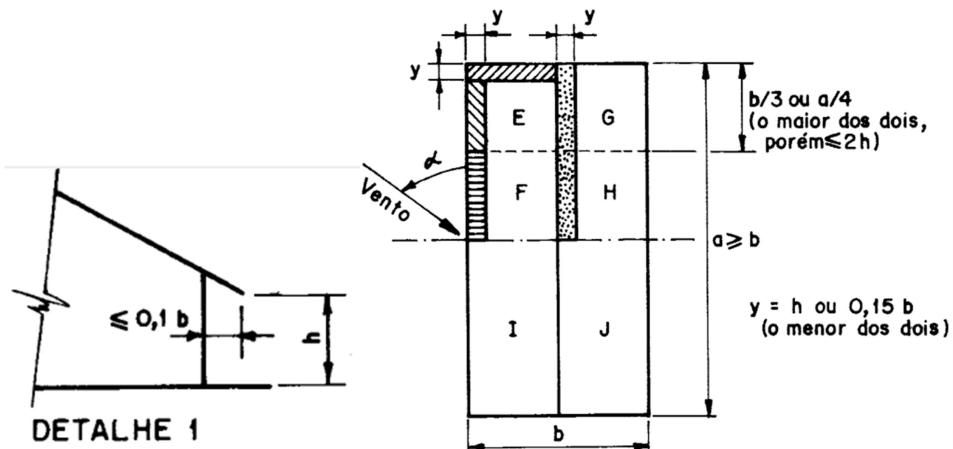
Tabela 5 - Coeficientes de projetos

Altura relativa	θ	Valores de C_e para				c_{pe} médio							
		$\alpha = 90^\circ$ (A)		$\alpha = 0^\circ$		EF	GH	EG	FH				
		$\alpha = 90^\circ$ (A)	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 90^\circ$ (A)	$\alpha = 0^\circ$								
$\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	0°	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0		-2,0		-2,0	--		
	5°	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4	-1,4		-1,2		-1,2	-1,0		
	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4		-1,4		-1,4	-1,2		
	15°	-1,0	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4		-1,2		-1,2			
	20°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-1,0				-1,2			
	30°	0	-0,4	-0,7	-0,6	-0,8				-1,2			
	45°	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6					-1,1			
	60°	+0,7	-0,6	-0,7	-0,6					-1,1			
$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	0°	-0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-2,0		-2,0		-2,0	--		
	5°	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6	-2,0		-2,0		-1,5	-1,0		
	10°	-1,1	-0,6	-0,8	-0,6	-2,0		-2,0		-1,5	-1,2		
	15°	-1,0	-0,6	-0,8	-0,6	-1,8		-1,5		-1,5	-1,2		
	20°	-0,7	-0,5	-0,8	-0,6	-1,5		-1,5		-1,5	-1,0		
	30°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-1,0					-1,0		
	45°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,8								
	60°	+0,6	-0,5	-0,8	-0,8								
$\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	0°	-0,8	-0,6	-0,9	-0,7	-2,0		-2,0		-2,0	--		
	5°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0		-2,0		-1,5	-1,0		
	10°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0		-2,0		-1,5	-1,2		
	15°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,8		-1,8		-1,5	-1,2		
	20°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,5		-1,5		-1,5	-1,2		
	30°	-1,0	-0,5	-0,8	-0,7	-1,5							
	40°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,7	-1,0							
	50°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,7								
	60°	+0,5	-0,5	-0,8	-0,7								

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2023).

Assim, os coeficientes que foram obtidos na tabela acima, são distribuídos na cobertura do galpão como descreve a figura 11.

Figura 10 - Esquema para adotar os coeficientes obtidos na tabela 10



Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2023).

Notas: a) O coeficiente de forma C_e na face inferior do beiral é igual ao da parede correspondente.

b) Nas zonas em torno de partes de edificações salientes ao telhado (chaminés, reservatórios, torres, etc.), deve ser considerado um coeficiente de forma $C_e = 1,2$ até uma distância igual à metade da dimensão da diagonal da saliência vista em planta.

c) Na cobertura de lanternins, C_{pe} médio = - 2,0.

d) Para vento a 0° deg nas partes I e J o coeficiente de forma C_e tem os seguintes valores:

$a/b = 1$: mesmo valor das partes F e H; $a/b \geq 2$: $C_p = -0,2$.

Interpolar linearmente para valores intermediários de a/b .

2.7.3 Coeficiente de pressão interna (Cpi)

O coeficiente de pressão interna (Cpi) está relacionado às aberturas nas paredes e coberturas das edificações, como portas, janelas e frestas, que permitem a entrada e saída de ar. Essas aberturas modificam as condições ideais consideradas nos ensaios, tornando o cálculo do Cpi complexo. Segundo Blessmann (1978), o Cpi é determinado pela permeabilidade de cada face da edificação, considerando as dimensões e os valores de sobrepressão e sucção externas, que variam conforme a localização das aberturas e a direção do vento. A

NBR 6123(ABNT, 2023) fornece valores de Cpi para diversas situações de abertura e índice de permeabilidade, facilitando o cálculo.

As proporções das edificações influenciam a força do vento sobre elas. Para estruturas aproximadamente paralelepípedicas, são definidos três parâmetros: alteamento (E), alargamento (A) e profundezas (Pr). O alteamento é a razão entre a altura e a largura, o alargamento é o inverso do alteamento, e a profundezas é a relação entre a profundidade e a menor dimensão da seção transversal. A largura considerada depende da fachada que recebe o vento. Esses parâmetros são fundamentais para entender a distribuição das forças do vento nas edificações.

A influência do alteamento e da profundezas na força do vento é notável. Em um fluxo de ar de velocidade uniforme, edificações com a mesma área de fachada exposta ao vento, mas com diferentes proporções, sofrem forças diferentes. Edificações mais alteadas enfrentam maior força do vento, o que deve ser considerado no projeto para garantir a segurança e a integridade da estrutura.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada baseia-se em pesquisas bibliográficas nacionais e internacionais, abrangendo artigos, livros, manuais, normas e relatórios que abordam a área das estruturas metálicas sujeitas à ação do vento e a análise dessa ação em diferentes localidades, com foco nas regiões de Bacabal, Balsas e São Luís, no estado do Maranhão.

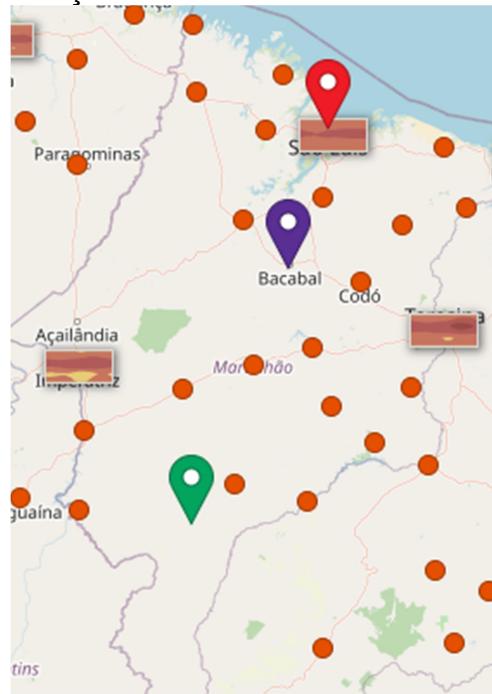
Posteriormente, foram coletados dados e especificações técnicas baseados na topografia e na velocidade do vento em cada uma das regiões analisadas, utilizando levantamento bibliográfico e a avaliação de gráficos meteorológicos. O objetivo é dimensionar um projeto utilizando Software como: CYPE 3D, Visual Ventos e Excel, que siga rigorosamente as normas vigentes e demonstre a importância de considerar as cargas de vento de maneira específica para cada cidade em estudo.

Adicionalmente, a pesquisa busca identificar as particularidades climáticas e topográficas de cada região, contribuindo para uma análise mais precisa e estabelecer soluções estruturais adequadas. A consideração das variáveis locais é essencial para garantir a segurança e a eficácia das estruturas metálicas, minimizando riscos e otimizando o desempenho das construções diante das condições climáticas adversas.

3.1 Velocidades básicas para regiões em estudo

A velocidade básica do vento é um dos parâmetros fundamentais no dimensionamento dos galpões metálicos. Diante disso, será realizado um estudo relacionado aos fatores mencionados, para cada região abordada neste trabalho, que são: Bacabal – MA, localizada na região do Médio Mearim; Balsas - MA, representando a Região Sul Maranhense; e, por fim, São Luís – MA, a capital do estado do Maranhão. É fundamental ressaltar que a escolha dessas localidades é estratégica, levando em consideração diversos aspectos geográficos, socioeconômicos e climáticos. A imagem de o mapa a seguir apresenta as cidades onde serão desenvolvidos os projetos do galpão, evidenciando a abrangência e a distribuição geográfica das intervenções propostas.

Figura 11 - Localização das três cidades analisadas no Maranhão



Fonte: Weather Spark, 2024.

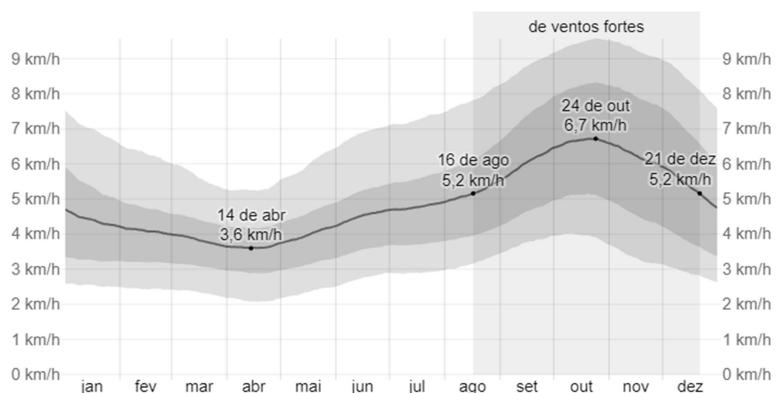
3.1.1 Bacabal – MA

A construção de galpões em estruturas metálicas em Bacabal – MA, desempenha um papel crucial no desenvolvimento econômico e na infraestrutura local. Essas estruturas proporcionam espaços versáteis e duráveis para armazenamento, produção e logística, contribuindo para impulsionar os setores industriais e comerciais da região.

Nesse contexto, considerando a relevância de apresentar projetos que estejam em conformidade com as normativas legais, será discutido sobre o valor médio do vento por hora, considerando tanto a velocidade quanto a direção, em uma área ampla a 10 metros de altura em relação ao solo. A percepção do vento em um determinado local é fortemente influenciada pela topografia local e outros fatores. Enquanto as médias horárias proporcionam uma visão geral, a velocidade e a direção do vento podem variar consideravelmente de um momento para outro. Em Bacabal, a velocidade média horária do vento sofre pequenas variações sazonais ao longo do ano. O período mais ventoso se estende por 4,1 meses, de 16 de agosto a 21 de dezembro, apresentando velocidades médias acima de 5,2 quilômetros por

hora, sendo outubro o mês com os ventos mais fortes, registrando uma média horária de 6,6 quilômetros por hora. Em contrapartida, o período em meses, onde o vento apresenta menor influência em Bacabal – MA, se estende por 7,9 meses, de 21 de dezembro a 16 de agosto, com abril sendo o mês de menor intensidade de ventos, com uma média horária de 3,6 quilômetros por hora. Os dados foram obtidos a partir do site Weather Spark, uma fonte confiável de informações meteorológicas, que fornece dados detalhados e precisos sobre condições climáticas, incluindo temperatura, umidade, vento e outras variáveis meteorológicas, baseando-se em uma ampla gama de fontes, como estações meteorológicas locais e modelos climáticos avançados.

Figura 12 - Velociade Média do vento em Bacabal - MA

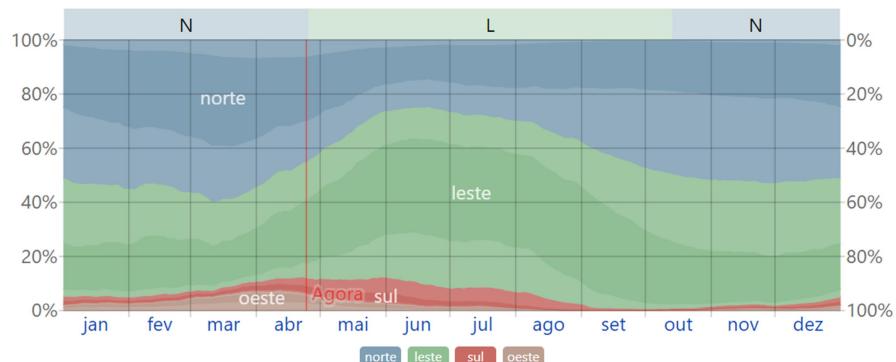


Velocidade média horária do vento (linha cinza escuro), com faixas do 25º ao 75º e do 10º ao 90º percentil.

Fonte: (weather spark, 2024).

De acordo com o site (*WEATHER SPARK*), a direção média horária predominante do vento em Bacabal varia durante o ano. O vento mais frequente vem do leste durante aproximadamente 6 meses, de 25 de abril a 13 de outubro, com porcentagem máxima de 66% em 20 de junho. O vento mais frequente vem do norte durante 6,4 meses, de 13 de outubro a 25 de abril, com porcentagem máxima de 51% em 1 de janeiro.

Figura 13 - Direção do vento em Bacabal - MA



Fonte: (Weather Spark, 2024).

A porcentagem de horas em que o vento tem direção média de cada uma das quatro direções cardeais de vento, exceto nas horas em que a velocidade média do vento é inferior a 1,6 km/h. As áreas mais esmaecidas nas interseções indicam a porcentagem de horas passadas nas direções intermediárias implícitas (nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste).

- TOPOGRAFIA

Na área circundante a Bacabal, dentro de um raio de 3 quilômetros, as variações de altitude são mínimas, com uma diferença máxima de 32 metros e uma média de altitude de 29 metros acima do nível do mar. Estas características topográficas se estendem para um perímetro maior, de 16 quilômetros, onde também se observam variações pouco significativas (145 metros). Mesmo em um raio de 80 quilômetros, as mudanças de altitude são pequenas (282 metros). Quanto à cobertura vegetal, a área mais próxima, dentro dos 3 quilômetros, é predominantemente composta por árvores (35%), arbustos (28%), pasto (24%) e terra fértil (13%). Essa composição muda um pouco nos 16 quilômetros, onde as árvores (40%) e arbustos (32%) predominam. Num raio de 80 quilômetros, a paisagem continua similar, com árvores (44%) e arbustos (26%) predominando, destacando a predominância da vegetação arbórea em toda a região. (WEATHER SPARK, 2024).

3.1.2 Balsas – MA

Balsas – MA é conhecida como uma importante área agrícola e agroindustrial no estado do Maranhão, e os galpões oferecem espaços essenciais

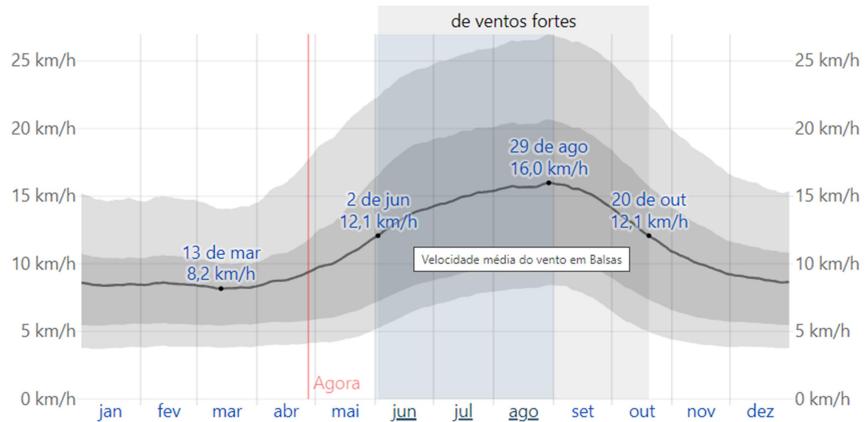
para o armazenamento seguro de produtos agrícolas, insumos e equipamentos. Além disso, essas edificações servem como centros de distribuição e logística, facilitando o transporte eficiente de mercadorias para outros mercados regionais e nacionais.

Diante disso, quando se trata de projetos de galpões, é importante abordar sobre o vetor médio horário de vento, considerando tanto a velocidade quanto a direção, a uma altura de 10 metros acima do solo em uma ampla área. A percepção do vento em uma determinada localidade é grandemente influenciada pela topografia local e por outros fatores. A velocidade e a direção do vento podem variar consideravelmente em um instante, em comparação com as médias horárias.

Em Balsas - MA, a velocidade horária média do vento apresenta variações sazonais significativas ao longo do ano, impactando diretamente diversas atividades, incluindo a construção de galpões. A temporada mais ventosa estende-se por aproximadamente 4,5 meses, de 2 de junho a 20 de outubro, com velocidades médias do vento superiores a 12,1 quilômetros por hora. Agosto destaca-se como o mês com os ventos mais intensos, alcançando uma média horária de 15,7 quilômetros por hora (*Weather Spark*, 2024).

Por outro lado, a época mais tranquila do ano abrange cerca de 7 meses, indo de 20 de outubro a 2 de junho. Em março, observa-se o período de menor intensidade de ventos em Balsas, com uma média horária de 8,3 quilômetros por hora. Considerando a construção de galpões na região, é crucial compreender essas variações sazonais e ajustar os projetos de acordo, garantindo estruturas resistentes e adaptadas às condições climáticas locais.

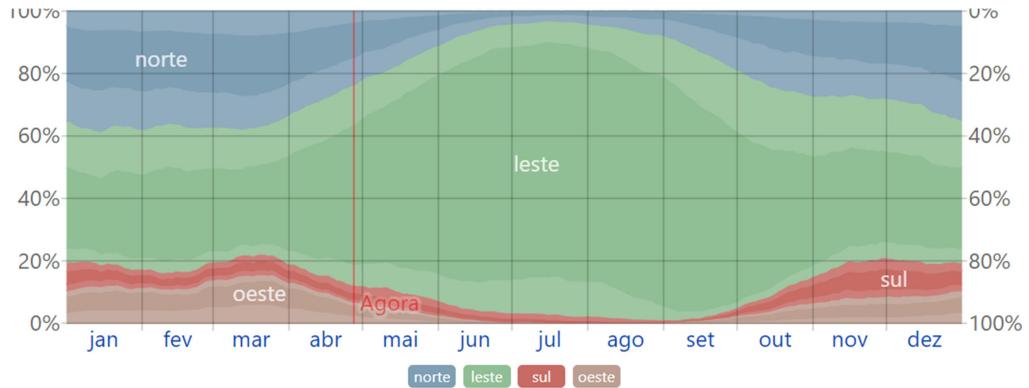
Figura 14 - Velocidade média do vento em Balsas - MA



Fonte: (WEATHER SPARK, 2024).

Ao tratar-se da direção do vento, o gráfico a seguir apresenta que durante todos os meses do ano, a direção média horária predominante do vento em Balsas é proveniente do leste.

Figura 15 - Direção do vento em Balsas - MA



Fonte: (WEATHER SPARK, 2024).

A porcentagem de horas em que o vento tem direção média de cada uma das quatro direções cardeais de vento, exceto nas horas em que a velocidade média do vento é inferior a 1,6 km/h. As áreas mais esmaecidas nas interseções indicam a porcentagem de horas passadas nas direções intermediárias implícitas (nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste).

- TOPOGRAFIA

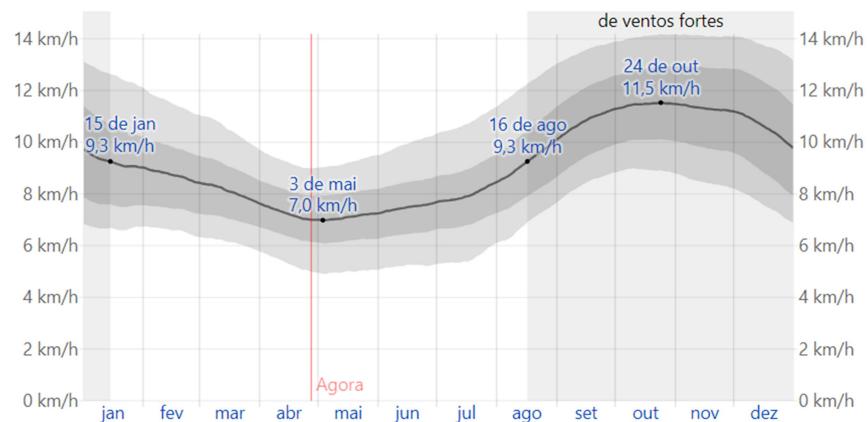
De acordo com as informações encontradas no site da *Weather Spark* (2024), as coordenadas geográficas de Balsas são: latitude -7,532°, longitude -46,036° e altitude de 254 metros. Por conseguinte, o mesmo revela a topografia dentro de uma área num raio de 3 quilômetros de Balsas, na qual apresenta variações de altitude mínimas, com uma diferença máxima de 60 metros e uma média de 260 metros acima do nível do mar. Essas características topográficas permanecem semelhantes em um perímetro maior de 16 quilômetros, onde as variações de altitude são pequenas, com apenas 101 metros. Mesmo dentro de um raio de 80 quilômetros, as mudanças de altitude são mínimas, totalizando 456 metros. Em relação à cobertura vegetal, a área mais próxima, dentro dos 3 quilômetros, é predominantemente composta por arbustos (25%), árvores (24%), pasto (20%) e terra fértil (18%). Esta composição muda um pouco nos 16 quilômetros, onde os arbustos (47%) predominam seguidos pelas árvores (32%). Num raio de 80 quilômetros, a paisagem continua similar, com arbustos (48%) e árvores (32%) predominando, destacando a predominância da vegetação arbustiva em toda a região.

3.1.3 São Luís – MA

Neste tópico, são abordados os padrões do vento em São Luís, considerando sua velocidade e direção a uma altura de 10 metros acima do solo. A percepção do vento em locais específicos é influenciada pela topografia local e outros fatores. É importante notar que a velocidade e direção do vento podem variar significativamente em momentos específicos, em comparação com as médias horárias. Em São Luís, a velocidade média horária do vento apresenta variações sazonais pequenas ao longo do ano. A temporada mais ventosa estende-se por cerca de 5,0 meses, de 16 de agosto a 15 de janeiro, com velocidades médias do vento acima de 9,3 quilômetros por hora. O mês de outubro é destacado como o período com os ventos mais intensos, atingindo uma média horária de 11,5 quilômetros por hora. Por outro lado, a época mais tranquila perdura por aproximadamente 7,0 meses, de 15 de janeiro a 16 de agosto. O mês de maio é reconhecido como o período com os ventos mais calmos em São Luís, registrando uma média horária de 7,1 quilômetros por hora. Essas informações são

fundamentais para diversas atividades, incluindo planejamento urbano, agricultura e construção civil (*Weather Spark*, 2024).

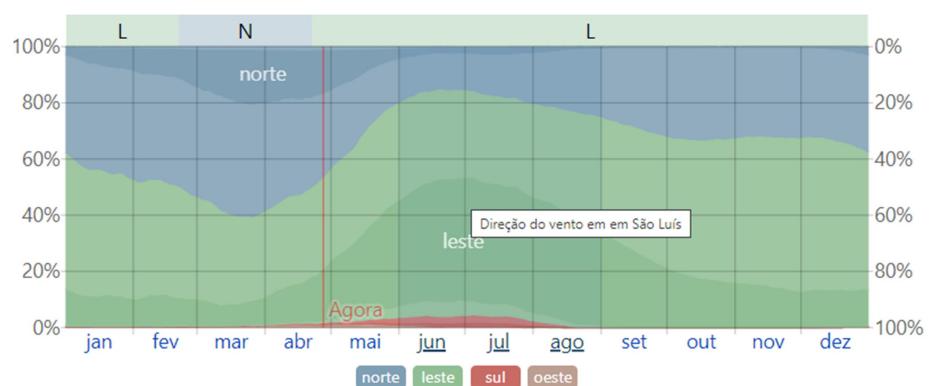
Figura 16 - Velocidade média do vento em São Luís - MA



Fonte: (*weather spark*, 2024).

Velocidade média horária do vento (linha cinza escuro), com faixas do 25º ao 75º e do 10º ao 90º percentil. Ao longo do ano, a direção média horária do vento em São Luís é variável. Predominantemente, o vento sopra do norte por cerca de 2 meses, de 21 de fevereiro a 22 de abril, atingindo uma porcentagem máxima de 60% em 26 de março. Em contrapartida, o vento mais comum é proveniente do leste, persistindo por aproximadamente 10 meses, de 22 de abril a 21 de fevereiro, com um pico de 62% registrado em 1 de janeiro. Essa oscilação na direção do vento ao longo do ano é um fator crucial a ser considerado em diversas atividades, como navegação, atividades agrícolas e construção civil.

Figura 17 - Direção do vento em São Luís - MA



Fonte: (*Weather Spark*, 2024).

A porcentagem de horas em que o vento tem direção média de cada uma das quatro direções cardeais de vento, exceto nas horas em que a velocidade média do vento é inferior a 1,6 km/h. As áreas mais esmaecidas nas interseções indicam a porcentagem de horas passadas nas direções intermediárias implícitas (nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste).

- **TOPOGRAFIA**

Para este trabalho, é importante ressaltar que as coordenadas geográficas de São Luís são: latitude -2,530°, longitude -44,303° e altitude de 29 metros. A topografia na área dentro de um raio de 3 quilômetros de São Luís revela variações de altitude mínimas, com uma diferença máxima de 46 metros e uma altitude média de 8 metros acima do nível do mar. Essas características permanecem consistentes em um raio maior de 16 quilômetros, onde as variações de altitude são pequenas, totalizando 74 metros. Mesmo em um raio de 80 quilômetros, as mudanças de altitude são mínimas, totalizando 134 metros. Em relação à cobertura do solo, a área mais próxima, dentro dos 3 quilômetros, é predominantemente composta por superfícies artificiais (45%), água (35%) e arbustos (11%). Essa composição muda para predominância de água (69%) nos 16 quilômetros. Num raio de 80 quilômetros, a paisagem é caracterizada por uma predominância de água (51%) e árvores (17%). Esses dados ressaltam a significativa presença de recursos hídricos na região de São Luís, indicando a importância de considerar esses fatores na gestão ambiental e no planejamento urbano (*Weather Spark, 2024*).

3.2 Softwares para simulações computacionais

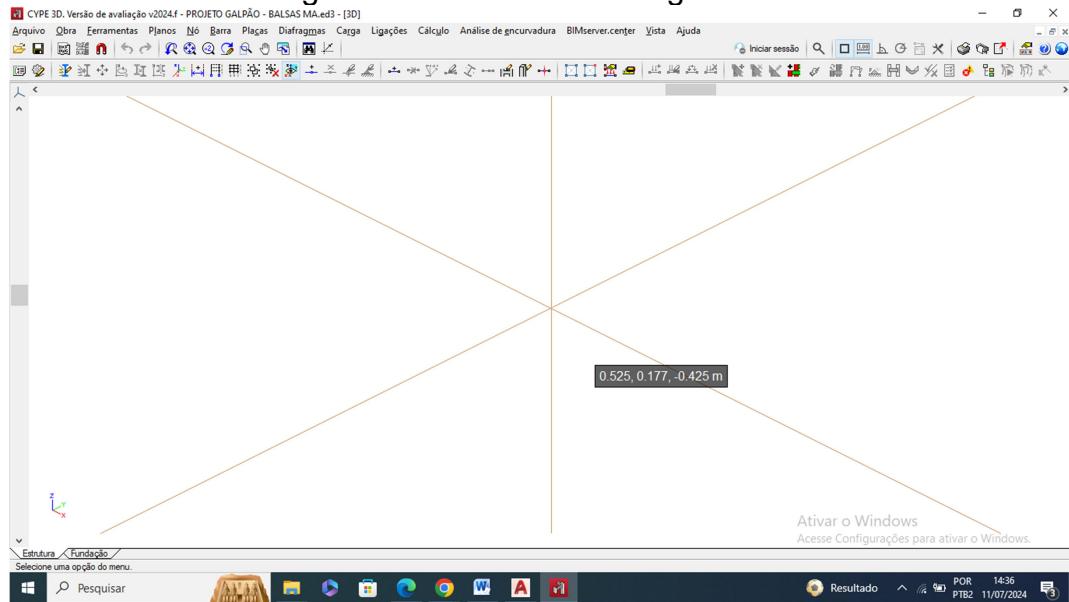
Para a execução deste trabalho, foram empregados diversos programas fundamentais para a coleta, análise e apresentação dos dados, tais como são expostos abaixo:

a) **CYPE 3D**

Software CYPE 3D, parte do conjunto de ferramentas da CYPECAD, foi utilizado para modelagem tridimensional e análise de estruturas metálicas, proporcionando uma compreensão detalhada das estruturas estudadas e suas propriedades mecânicas. Este programa é amplamente reconhecido por sua capacidade de realizar cálculos precisos e detalhados, integrando diversas normas

nacionais e internacionais de construção, o que garante a conformidade dos projetos com os padrões de segurança e qualidade. Além disso, o CYPE 3D oferece recursos avançados para a simulação de cargas e a análise de esforços, facilitando a identificação de pontos críticos e a otimização das estruturas. A interface intuitiva do *software* e suas ferramentas de visualização 3D permitem aos engenheiros e projetistas realizar ajustes e melhorias com maior eficiência, resultando em projetos mais robustos e confiáveis. O uso do CYPE 3D (CYPECAD), foi crucial para assegurar a precisão e a integridade das análises estruturais realizadas neste trabalho.

Figura 18 - Interface do Programa CYPE 3D

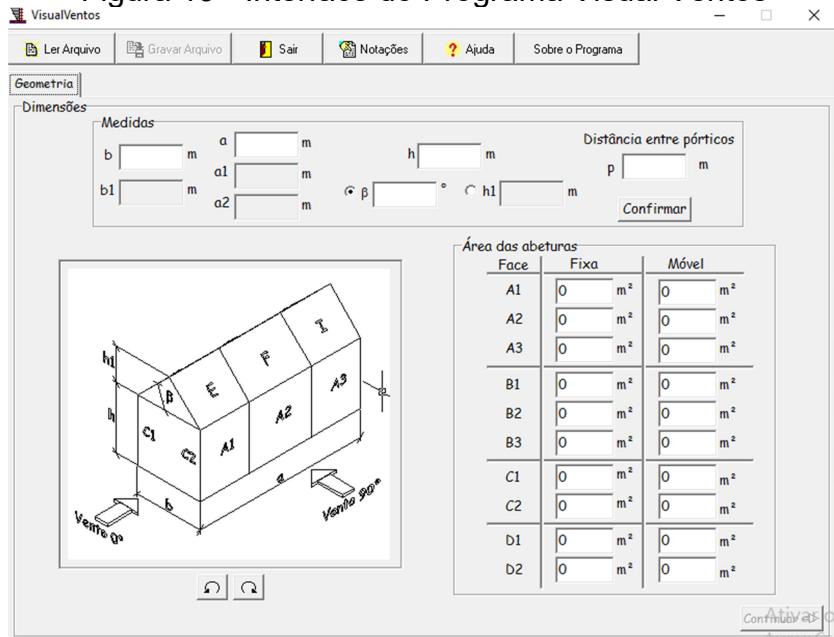


Fonte: Captura da tela do programa CYPE 3D (2024).

b) VISUAL VENTO

O Visual Vento foi fundamental para a simulação e análise de dados relacionados a fenômenos atmosféricos, permitindo a visualização e interpretação precisa dos padrões de vento e suas implicações. Este *software* é amplamente utilizado em estudos de climatologia e engenharia ambiental por sua capacidade de modelar correntes de ar e prever suas interações com diferentes tipos de terrenos e edificações. Com uma interface intuitiva e ferramentas avançadas de simulação, o Visual Vento facilita a análise detalhada de dados meteorológicos, contribuindo significativamente para a tomada de decisões em projetos (Visual vento, 2008).

Figura 19 - Interface do Programa Visual Ventos



Fonte: Visual ventos, (2024).

c) Microsoft Excel

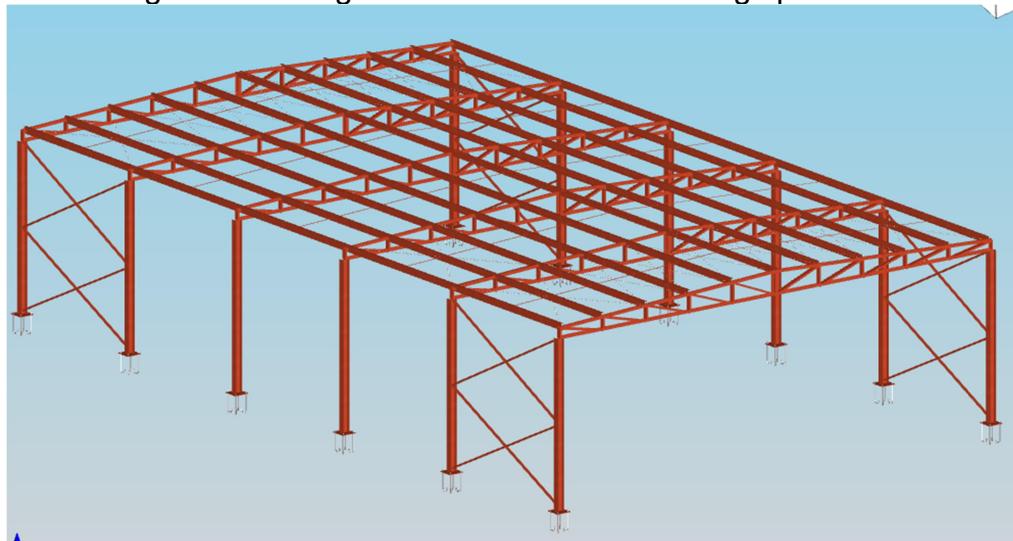
O Excel, uma ferramenta desenvolvida pela Microsoft, permite a criação de planilhas para a análise de dados e a elaboração de gráficos de maneira intuitiva. Neste trabalho, as tabelas 6, 7 e 9 a 13 foram desenvolvidas e usadas para organizar os dados, tornando-os mais claros e objetivos.

3.3 Caracterizações do galpão tipo

Neste estudo, será realizado o dimensionamento de um galpão de estrutura metálica com dimensões de 15 metros de largura por 25 metros de comprimento, onde os pórticos serão posicionados a cada 5 metros. O mesmo será dimensionado para regiões diferentes e com as mesmas características e dimensões, visando apenas o comportamento comparativo em relação às cargas de vento atuantes. A escolha pela utilização de uma estrutura metálica visa assegurar a resistência e durabilidade necessárias para suportar as cargas permanentes e sobrecargas, incluindo as ações dinâmicas do vento, conforme estabelecidas pelas seguintes normas: NBR 6123 (ABNT, 2023) – Forças Devido ao Vento em Edificações; NBR 6120 (ABNT, 1980) – Cargas para Cálculo de Estruturas; NBR

8800 (ABNT, 2008) – Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios; NBR 14762 (ABNT, 2010) – Dimensionamento de perfis dobrado a frio.

Figura 20 - Imagem em 3D da estrutura do galpão



Fonte: CYPE 3D, (2024).

O galpão em estudo apresenta as seguintes características.

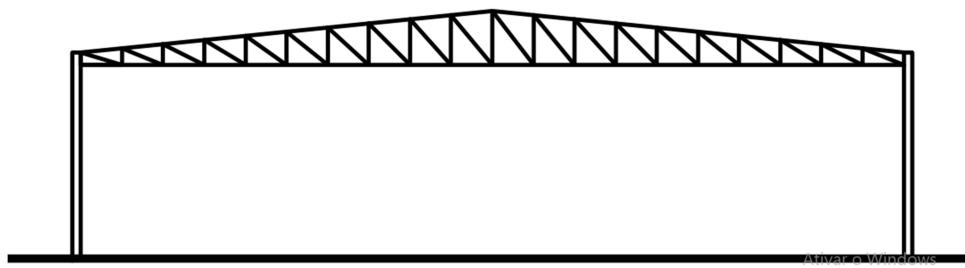
- Estrutura metálica;
- A estrutura apresentará alguns elementos em aço dobrado ASTM A36 e outros em aço laminado A - 572 345 Mpa;
- Ligações parafusadas e soldadas;
- Fechamento lateral com telha trapezoidal TP-40;
- COBERTURA: Telhado em duas águas com telhas de aço galvanizado padrão trapezoidal TP 40 25 / 1020, com inclinação mínima de 5%.

Sabendo que o aço ASTM A-36, a ASTM que desenvolve e publica normas de uma ampla gama de produtos, serviços, sistemas e materiais, inclusive quando se trata de tubos de aço, foi escolhido por suas boas propriedades mecânicas e por ser amplamente utilizado (Castro M. 2012).

3.3.1 Concepção das estruturas

Para a realização deste estudo, foi concebido um modelo de galpão para análise. A figura 21 mostra o modelo do galpão adotado.

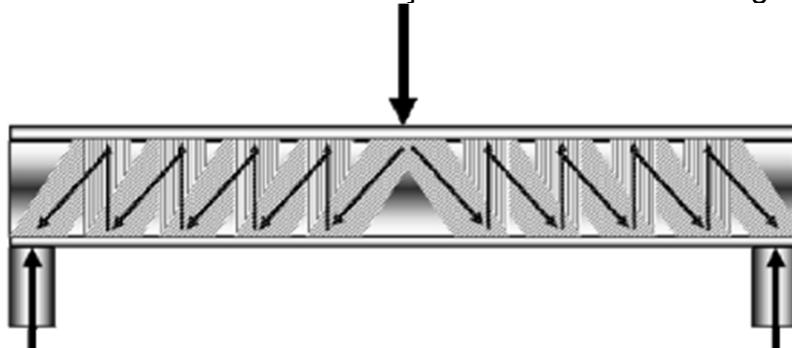
Figura 21 - Pilares de alma cheia - Vigas treliçadas (articulada ou pórticos)



Fonte: Autor, 2024.

O projeto adotou um galpão com cobertura plana trapezoidal treliçada e pilares metálicos de alma cheia. O pórtico com treliça trapezoidal apresentou os menores deslocamentos verticais e horizontais. Isso se deve à grande inércia equivalente da viga treliçada trapezoidal, que pode ser interpretada como uma viga equivalente com seção variável, proporcionando também maior rigidez e estabilidade, enquanto os pilares metálicos de alma cheia garantem resistência e durabilidade (Silva R., 2017, *apud* Chaves, 2007). Esta configuração estrutural foi escolhida por sua eficiência e permitir uma distribuição uniforme das forças ao longo da estrutura, onde as forças são transmitidas para os apoios por meio de bielas de compressão e tração. A figura 22 ilustra o caminhamento das forças no interior da treliça aos pilares. Vale destacar que o método utilizado no projeto fundamenta-se na teoria de Ritter-Mörsch.

Figura 22 - Caminhamento de forças no interior de uma viga de aço



Fonte: Silva, (2012).

3.3.2 Espaçamento dos pórticos

Para a concepção das coberturas, inicialmente foi realizada a divisão do espaçamento entre os pórticos. Considerando que o vão longitudinal do galpão é de 35 metros, ele se enquadra como um galpão de médio porte, conforme a classificação apresentada por Bellei (1998). Deste modo, de acordo com o mesmo, para galpões de médio porte, recomenda-se que o espaçamento entre os pórticos seja mantido entre 4 e 7 metros. Essa recomendação leva em consideração aspectos como a distribuição adequada das cargas e a estabilidade estrutural do galpão. No estudo de caso sobre estruturas metálicas para um galpão em Rio Verde, o espaçamento entre os pórticos foi definido com base nessa orientação, visando garantir a eficiência e a segurança da estrutura. Assim, as dimensões e espaçamento do galpão tipo se deu conforme explicitado na Tabela 6.

Tabela 6 - Dimensões gerais para o galpão tipo

CIDADES	COMPRIMENTO (M)	LARGURA (M)	PÉ - DIREITO (M)	ESPAÇAMENTO ENTRE PÓRTICOS
BACABAL - MA	25 m	15 m	5 m	5 m
BALSAS - MA	25 m	15 m	5 m	5 m
SÃO LUIZ - MA	25 m	15 m	5 m	5 m

Fonte: Autor (2024).

3.4 Cargas adotadas

No projeto, foram consideradas as cargas atuantes na estrutura conforme estabelecido pela NBR 8800 (ABNT, 2008). Isso inclui cargas permanentes, variáveis, e acidentais, abrangendo pesos próprios, sobrecargas de uso, ações do vento e outras influências ambientais.

3.4.1 Carga Permanente

Nessa lógica, pode-se destacar como conhecimento que a carga permanente, ou peso próprio dos elementos da estrutura, foi determinado diretamente pelo software CYPE 3D.

3.4.2 Carga accidental

Para a carga accidental, também conhecida como sobrecarga, foi seguido o anexo B da NBR 8800 (ABNT, 2008), onde é estabelecido uma carga mínima de 0,25 kN/m² em coberturas comuns, sendo essencial considerar essa carga decorrente do uso da edificação para garantir a resistência adequada da estrutura. Para as terças, foi adotada a mesma sobrecarga de 0,25 kN/m². A consideração dessas cargas é crucial para garantir a segurança e o equilíbrio da estrutura, prevenindo falhas durante situações de uso intenso ou condições extraordinárias.

3.4.3 Sobre carga de Vento para as Regiões em Análise

A sobre carga do vento é um fator crucial no projeto estrutural de um galpão, independentemente da localidade. As variações sazonais na velocidade e direção do vento podem impactar significativamente as atividades de construção, exigindo ajustes nos projetos para atender às condições climáticas locais. Em regiões como Bacabal, Balsas e São Luís, o vento apresenta variações ao longo do ano, com períodos de maior e menor intensidade, o que deve ser considerado no planejamento.

Além disso, a topografia local influencia a percepção e o comportamento do vento, ressaltando a importância de uma análise detalhada das condições específicas de cada local. Essa abordagem é essencial para garantir a durabilidade e a segurança das estruturas, em conformidade com as normativas legais e as melhores práticas de engenharia civil.

3.4.3.1 Velocidade básica

Com base nos resultados das simulações e comparações realizadas, é recomendado adotar a maior velocidade registrada como a sobre carga de vento a ser considerada no dimensionamento das estruturas.

Dessa forma, de acordo com os dados coletados e os gráficos meteorológicos analisados para as cidades em estudo, a maior velocidade do vento registrado nas regiões examinadas varia entre 6,7 km/h e 16 km/h. No entanto, a velocidade básica é obtida a partir das isopletas fornecidas pela norma NBR 6123

(ABNT, 2023). Essa velocidade deve ser considerada como a sobrecarga de vento máxima a ser adotada para o dimensionamento das estruturas metálicas na região.

Tabela 7 - Velocidade básica do vento registrado a adotado

VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO			
CIDADES	VELOCIDADE BÁSICA MÁXIMA (WEATHER SPARK, 2024)	VELOCIDADE BÁSICA MÁXIMA ISO/PETAS, NORMA 6123/2023(m/s).	VELOCIDA BÁSICA A SER ADOTADA
BACABAL - MA	6,7 km/h	30 m/s	30 m/s
BALSAS - MA	16 km/h	15 m/s	15 m/s
SÃO LUIZ - MA	11,5 km/h	39 m/s	39 m/s

Fonte: Autor (2024).

3.4.3.2 Cálculos da Pressão Dinâmica do Vento e dos Coeficientes de Distribuição de Pressão do Vento Utilizando a NBR 6123 (ABNT, 2023)

Considera-se que os galpões em análise estão localizados nas cidades de Bacabal, Balsas e São Luís, no estado do Maranhão. Estes galpões estão situados em terreno plano e serão utilizados para fins comerciais e industriais. O ângulo de incidência do vento será paralelo à cumeeira dos galpões, ou seja, $\alpha = 0^\circ$. Para a análise, será assumido que os galpões não possuem beirais nem platibanda. A metodologia inclui a simulação das condições de vento conforme a NBR 6123 (2023), utilizando softwares de modelagem estrutural para garantir a precisão dos resultados.

Pressão dinâmica

- Velocidade Basica V_0

De acordo com a Figura 01, a velocidade básica a ser adotado está descrita na Tabela 08.

- Velocidade característica V_K

- **Fator topográfico, S_1 :**

De acordo com o item 5.2.a da NBR 6123 (ABNT, 2023), o S_1 será igual a 1,00, como apresenta a Tabela 06.

- **Fator de rugosidade do terreno e dimensões da edificação, S_2 .**

Obtenção do fator S_2 pode ser obtida pela fórmula:

$$S_2 = b \times F_r \times \left(\frac{z}{10}\right)^P$$

b – base do galpão;

z – Altura total do galpão;

Os parâmetros b, F_r e P, são encontrados na Tabela 2.

- **Fator estatístico, S_3**

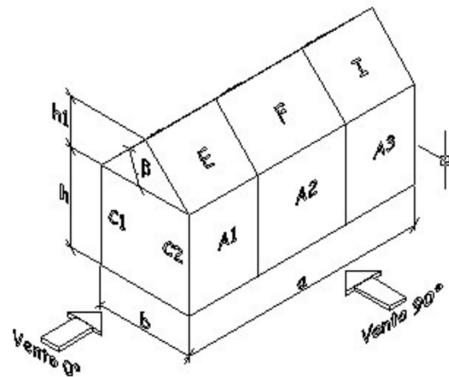
O fator S_3 é obtido de acordo com a Tabela 02.

- **Pressão dinâmica, q;**

Utilizando a fórmula, $q = 0,613 \times (V_K)^2$, obtém-se os valores da pressão dinâmica, demonstrado na Tabela 09.

- **Área de incidência das cargas de vento**

Figura 23 - Incidência do vento no galpão a 0° e 90°



Fonte: Visual Vento, (2024).

3.4.3.3 Análise do deslocamento da estrutura sob as cargas de vento nas três regiões utilizando o CYPE 3D

O estudo examina como as cargas de vento afetam o deslocamento estrutural em galpões localizados nas cidades de Bacabal, Balsas e São Luís, no estado do Maranhão. Utilizando o software CYPE 3D, modelamos a resposta das estruturas a diferentes condições de vento, conforme as diretrizes da NBR 6123 (ABNT, 2023). Esta análise é crucial para garantir que as edificações possam suportar as forças de vento predominantes na região, assegurando a estabilidade e a segurança das construções. A metodologia inclui simulações detalhadas que consideram variáveis como a geometria da edificação, o tipo de terreno e a ausência de beirais e platibandas, proporcionando uma compreensão abrangente do comportamento estrutural sob diferentes cenários de vento.

3.5 Processo e implementação de dados e conceituação dos elementos estruturais

3.5.1 Inserção dos Dados no Software

Para a modelagem do galpão metálico, foi utilizado o software CYPE 3D. Inicialmente, foram inseridos os elementos estruturais de aço, especificando-se o

uso de aço ASTM A-572 com resistência de 345 MPa e aço ASTM A-36. As ligações foram definidas como parafusadas com parafusos pré-tensionados, garantindo maior resistência e estabilidade. As telhas utilizadas são do tipo zipadas, conhecidas por sua durabilidade e resistência a intempéries.

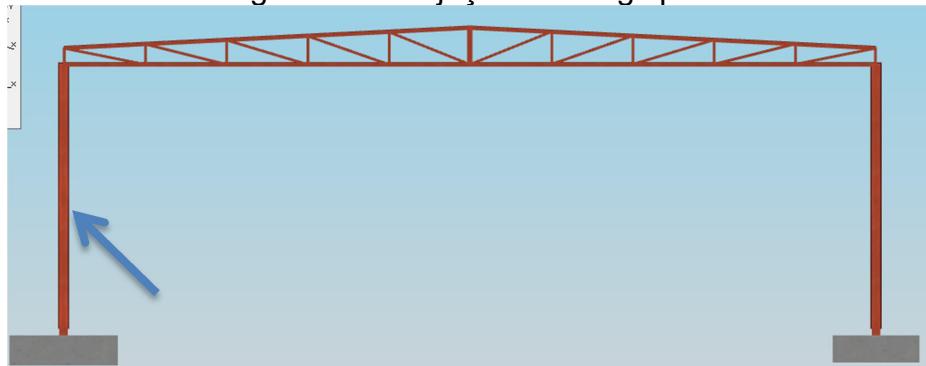
Para a fundação, foi empregado concreto usinado C25, que proporciona a robustez necessária para suportar as cargas da estrutura. Os perfis utilizados basearam-se nos mais comerciais na região, incluindo U, C e W, conforme especificado na Tabela 10. A modelagem dos nós considerou articulados entre as peças, permitindo a distribuição eficiente das cargas e a flexibilidade estrutural necessária. Posteriormente serão apresentados os perfis inseridos para cada um dos elementos estruturais do galpão (D'Alambert F. 2005).

• PILARES

O galpão é estruturado com um total de 10 pilares, distribuídos em cada lateral, onde a cada dois pilares forma-se um pórtico, totalizando 5 pórticos. Para os pilares laterais, serão utilizados perfis W150 x 29,8, com uma altura de 5 metros.

Esses pilares laterais serão reforçados com travamentos laterais na altura de 5 metros, ou seja, no topo, além de contraventamentos, garantindo maior estabilidade à estrutura.

Figura 24 - Projeção z/x do galpão



Fonte: Autor, (2024).

• CONTRAVENTAMENTOS LATERAIS

Serão utilizados contraventamentos compostos por cantoneiras simétricas, com perfil de duplo T soldado, sendo L4 x 1/4", formando uma geometria em X. Essa configuração proporcionará maior rigidez e estabilidade à estrutura, ajudando a resistir a forças laterais e minimizando o risco de deformações.

Figura 25 - Contraventamentos laterais



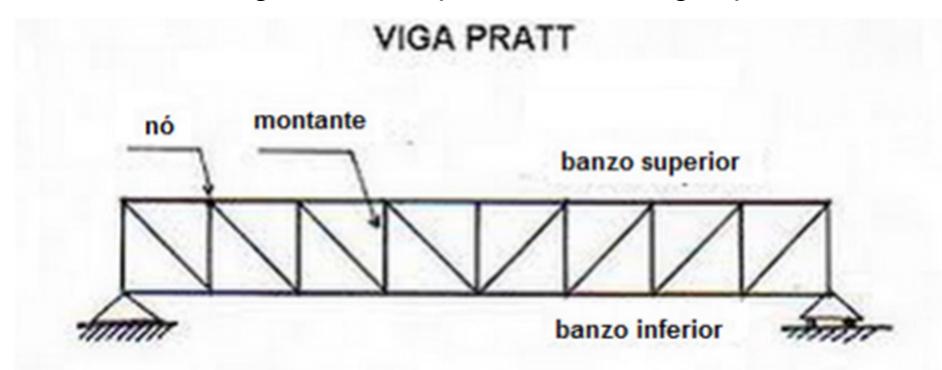
Fonte: CYPE 3D, (2024).

- **TELHADO**

- ✓ **TRELIÇAS**

As treliças são formadas por segmentos de hastes conectados em pontos conhecidos como nós. As partes superiores e inferiores são chamadas de banzos, enquanto as barras verticais são designadas montantes. As diagonais que compõem a estrutura completam a treliça. Para vãos como os do galpão em análise, a treliça metálica se revela uma solução extremamente eficaz. A configuração geométrica escolhida foi do tipo Pratt, que é ideal para suportar cargas e proporcionar uma distribuição eficiente das forças. Essa estrutura não apenas garante a estabilidade, mas também aperfeiçoa o uso de materiais.

Figura 26 - Esquema de uma viga tipo Pratt.

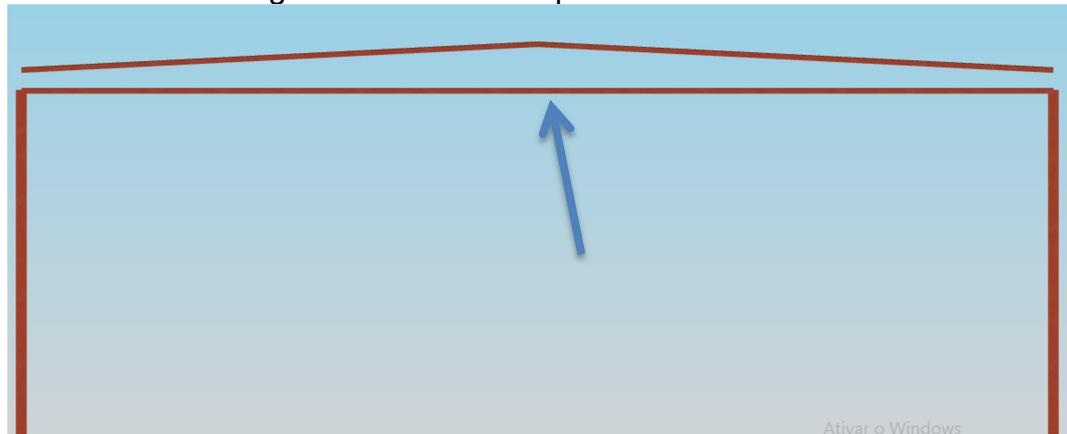


Fonte: Castro (2012).

✓ BANZO SUPERIOR E INFERIOR

Para os banzos inferior e superior, será utilizado o perfil U 100 x 80 x 6,30. A escolha desse tipo de perfil garante uma distribuição eficiente das cargas, permitindo que a estrutura suporte as tensões e forças aplicadas de maneira eficaz.

Figura 27 - Banzos superiores e inferiores



Fonte: CYPE 3D, (2024).

✓ CONTRAVENTAMENTOS DO TELHADO

São utilizados contraventamentos compostos por peças de tração tipo tirantes, com perfil de barra redonda de 3/8", formando uma geometria em X, similar ao contraventamento lateral. Essa configuração proporciona maior rigidez e estabilidade à estrutura do telhado.

Figura 28 - Contraventamentos do telhado

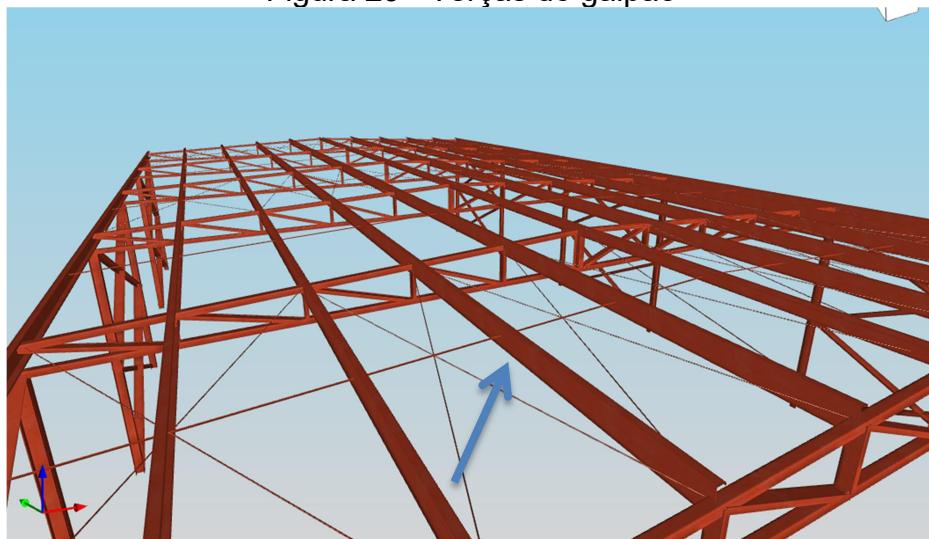


Fonte: Autor, (2024).

✓ TERÇAS

As terças são vigas instaladas na cobertura, entre as vigas principais ou secundárias de pórticos ou tesouras, com a função de suportar as chapas de cobertura. Elas geralmente enfrentam flexão dupla devido às cargas das telhas. Neste projeto, foram utilizados perfis C 127 x 50 x 17 x 1,52 dobrados e enrijecidos, dispostos em dupla união genérica para a terça central. Para as demais terças, que possuem o mesmo formato geométrico, foi utilizado o perfil C 250 x 85 x 25 x 2,66, de aço A-36.

Figura 29 - Terças do galpão

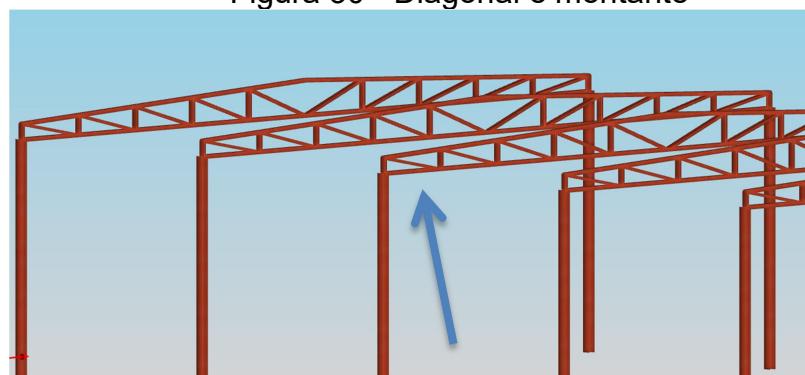


Fonte: Autor, (2024).

✓ DIAGONAIS E MONTANTE

Nos montantes, foi utilizado o perfil U 127 x 50 x 3,04, os mesmos perfis que também foram empregados nas diagonais, que atuam em tração. Essa escolha contribui para a robustez e a eficiência estrutural da treliça.

Figura 30 - Diagonal e montante

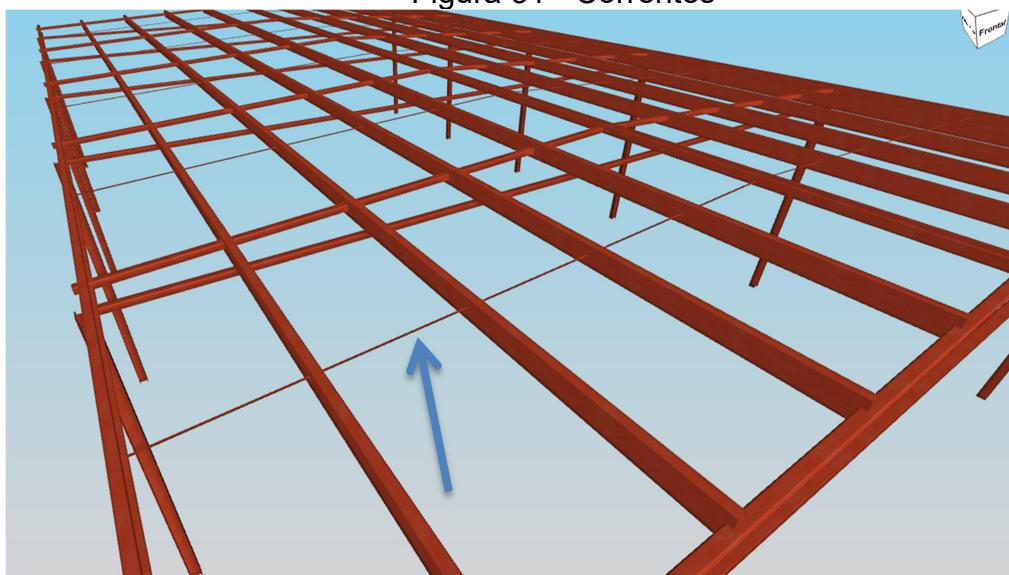


Fonte: Autor, (2024).

✓ CORRENTES

As correntes em coberturas de estruturas metálicas são elementos estruturais que têm a função de distribuir cargas e proporcionar estabilidade ao sistema de cobertura. Elas são dispostas na direção longitudinal da estrutura e são conectadas entre as terças, ajudando a suportar as cargas de vento, neve e outros pesos, além de fornecer rigidez adicional ao conjunto estrutural.

Figura 31 - Correntes



Fonte: Autor, (2024).

✓ TELHAS ZIPADAS

No sistema de cobertura zipada, as telhas são fabricadas diretamente no canteiro de obras utilizando uma perfiladeira portátil. Como não há necessidade de transporte, é possível produzir telhas em grandes comprimentos, permitindo a montagem de uma única peça que se estende do ponto mais alto do telhado (cumeeira) até o mais baixo (beiral), sem emendas ou sobreposições.

Além disso, as telhas adjacentes são unidas ao longo do seu comprimento por meio de uma "costura" mecânica, ou zipagem, nas abas de sobreposição lateral, sem o uso de parafusos, o que evita perfurações na chapa de aço.

Essas telhas zipadas são projetadas para grandes coberturas, com extensões de captação de água a partir de 40 m, e há casos em que telhas de até 60 ou 120 m de comprimento são fabricadas como uma única peça. Elas são

especialmente adequadas para coberturas planas com pequenas inclinações, de até 2%.

3.5.2 Definição dos Perfis das Barras

A definição dos perfis das barras do galpão é uma etapa crucial no projeto estrutural, pois determina a capacidade de carga e a estabilidade da construção. Foram selecionados perfis U, C e W, conforme a Tabela 8, devido à sua eficiência em suportar diferentes tipos de esforços e à compatibilidade com a estrutura metálica.

Tabela 8 - Tabela resumo dos perfis das barras do galpão tipo

Material		Série	Perfil	Comprimento			Volume			Peso		
Perfil (m)	Série (m)			Perfil (m)	Série (m)	Material (m)	Perfil (m³)	Série (m³)	Material (m³)	Perfil (kg)	Série (kg)	Material (kg)
Aço laminado	A-572 345MPa	Barra redonda	3/8"	257.329			0.018	0.018		144.09		
			L 1/2 x 1/8"	74.094	257.329		0.005			40.71	144.09	
		Cantoneira	L 4 x 1/4", Duplo T união soldada	133.636			0.334			2624.71		
			W 150 x 29.8	60.000	207.730		0.231	0.340		1813.35	2665.42	
		H			60.000		0.231	0.231	0.589		1813.35	4622.86
						525.059						
		U	U100X80X6.30	180.112			0.271			2129.75		
			U127X50X3.04	121.160			0.080			627.18		
Aço dobrado	A-36	C	U150X50X2.28, Duplo I união soldada	4.050			0.004	0.356		35.15		
			C127X50X17X1.52, Caixa dupla união genérica	25.000	305.323		0.019			149.70	2792.08	
			C250X85X25X2.66	250.000	275.000		0.301	0.320		2361.38	2511.07	
						580.323			0.676			5303.15

Fonte: CYPE 3D, (2024).

3.5.3 Inserção das Cargas

Na inserção das cargas, foram consideradas todas as variáveis que impactam a estrutura. As cargas permanentes incluem o peso próprio dos materiais e acabamentos utilizados no galpão. Sobre as cargas permanentes, adicionaram-se as sobrecargas, que representam o uso operacional do galpão para comércio e indústria.

Além disso, foram aplicadas cargas de vento em duas direções principais: 0° e 90°. Estas cargas foram calculadas de acordo com as diretrizes da NBR 6123 (ABNT, 2023) para garantir a precisão e a segurança estrutural. A consideração de diferentes ângulos de incidência do vento permite avaliar a resposta do galpão a diversas condições ambientais, assegurando que a estrutura possa resistir a ventos fortes de diferentes direções.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

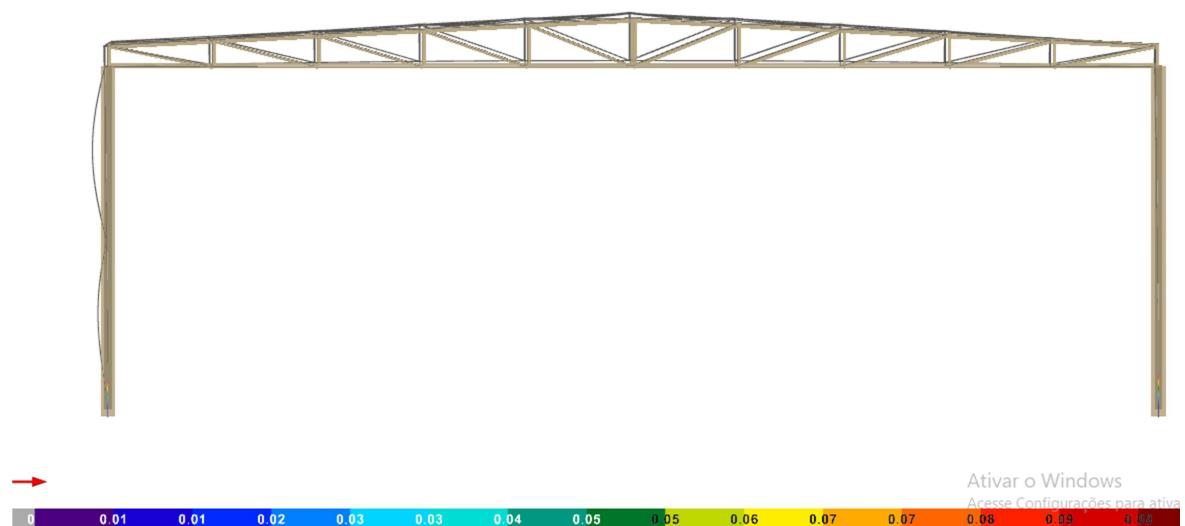
4.1 Dimensionamento

A partir dos resultados obtidos na análise estrutural, foi realizado o dimensionamento dos perfis que compõem o pórtico utilizando o *software CYPE 3D*. Esse *software* calcula as resistências dos perfis selecionados e compara com as solicitações de cálculo obtidas, verificando a adequação de cada barra da estrutura. O dimensionamento dos perfis laminados ou soldados para o pórtico de alma cheia seguiu a NBR 8800 (ABNT, 2008), enquanto os perfis formados a frio utilizados no pórtico treliçado foram dimensionados conforme a NBR 14762 (ABNT, 2001).

4.1.1 Dimensionamento do Pórtico treliçado

Para o pórtico treliçado, os resultados da verificação das seções transversais serão mostrados na Figura 33. Esses resultados indicam a relação S_d/R_d para a combinação crítica em cada barra do pórtico transversal (Fonseca, 2019). O exemplo de resultado a seguir está relacionado às características de Bacabal – MA.

Figura 32 - S_d/R_d - Pórtico treliçado



Fonte: CYPE 3D, (2024).

4.2 Resultados dos cálculos da Pressão Dinâmica do Vento e dos Coeficientes de Distribuição de Pressão do Vento nas Regiões em Análise Utilizando a ABNT NBR 6123 (2023)

4.2.1 Pressão dinâmica

Velocidade característica V_K :

$$V_K = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$$

Fator topográfico, S_1 :

De acordo com o item 5.2.a da NBR 6123 (ABNT, 2023), o S_1 será igual a 1,00, como descrito na tabela a seguir:

Tabela 9 - Fator topográfico S_1

Cidades	Fator topográfico S_1
BACABAL - MA	1,00
BALSAS - MA	1,00
SÃO LUIZ - MA	1,00

Fonte: Autor, 2024.

Fator rugosidade do terreno e dimensões da edificação, S_2 :

Fazendo as seguintes considerações:

- Rugosidade do Terreno: Considerando terreno com poucos obstáculos Categoria III - (Item 5.3.1). - NBR 6123 (ABNT, 2023).
- Dimensões da Edificação: Nenhuma dimensão horizontal ou vertical excede 25 m.

Classe A (Item 5.3.2 - NBR 6123 (ABNT, 2023)).

Obtenção do fator S_2 pode ser obtida pela fórmula:

$$S_2 = b \times F_r \times \left(\frac{z}{10}\right)^p$$

z – altura total do galpão:

A altura do telhado, c , de $2,86^\circ = 5\%$ serão:

$$c = \frac{15}{2} \times \operatorname{tg}(2,86) = 0,375 \text{ m}$$

Logo, a altura total do galpão será:

$$z = h + c = 5,3 + 0,375 = 5,67 \text{ m}$$

Os parâmetros b , F_r e P , são encontrados na tabela 2.

O fator da rajada F_r é sempre o correspondente à categoria II, logo, aplicando os valores na formulação do S_2 , temos:

$$S_2 = 0,85 \times 0,98 \times \left(\frac{5,67}{10}\right)^{0,13} = 0,78$$

Assim, seguindo a ordem de cálculo para o fator S_2 , constatam-se os seguintes valores para as regiões.

Tabela 10 - Fator de rugosidade do terreno S_2

CIDADES	FATOR DE RUGOSIDADE DO TERRENO	MAIOR DIMENSÃO DA EDIFICAÇÃO (m)	FATOR S_2
BACABAL - MA	IV - Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados em zona florestal, industrial ou urbanizados. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m.	25	0,78
BALSAS-MA	Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores; cidades pequenas e seus arredores; subúrbios densamente construídos de grandes cidades; áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.	25	0,78
SÃO LUIZ - MA		25	0,78

Fonte: Autor, 2024.

Fator estatístico, S_3 :

Considerando que o galpão é industrial e comercial e apresenta um alto fator de oclusão, o S_3 terá um valor de:

Tabela 11 - Fator estatístico

FATOR ESTATÍSTICO S_3		
CIDADES	DESCRIÇÃO	S_3
BACABAL - MA	GRUPO 2: Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
BALSAS- MA		1,00
SÃO LUIZ - MA		1,00

Fonte: Autor, 2024.

➤ **Velocidade característica V_K ,**

Dessa forma, nota-se que a velocidade característica V_K , para as regiões investigadas, pode ser apresentada na tabela 07.

Utilizando a fórmula, $V_K = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$ obtém-se:

Tabela 12 - Velocidade característica V_K

CIDADES	EQUAÇÃO DA VELOCIDADE CARACTERÍSTICA	V_K
BACABAL - MA	$V_K = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$	23, 28 m/s
BALSAS - MA	$V_K = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$	11,64 m/s
SÃO LUIZ - MA	$V_K = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$	30,27 m/s

Fonte: Autor, 2024.

➤ **Pressão dinâmica do vento, q :**

Utilizando a fórmula, $q = 0,613 \times (V_K)^2$, prescrita pela NBR 6123 (2023), pode-se obter os seguintes resultados;

Tabela 13 - Pressão dinâmica (q)

CIDADES	EQUAÇÃO DA PRESSÃO DINÂMICA(q)	(q) KN/m ²
BACABAL - MA	$q = 0,613 \times (V_K)^2,$	0,33
BALSAS - MA	$q = 0,613 \times (V_K)^2,$	0,08
SÃO LUIZ - MA	$q = 0,613 \times (V_K)^2,$	0,56

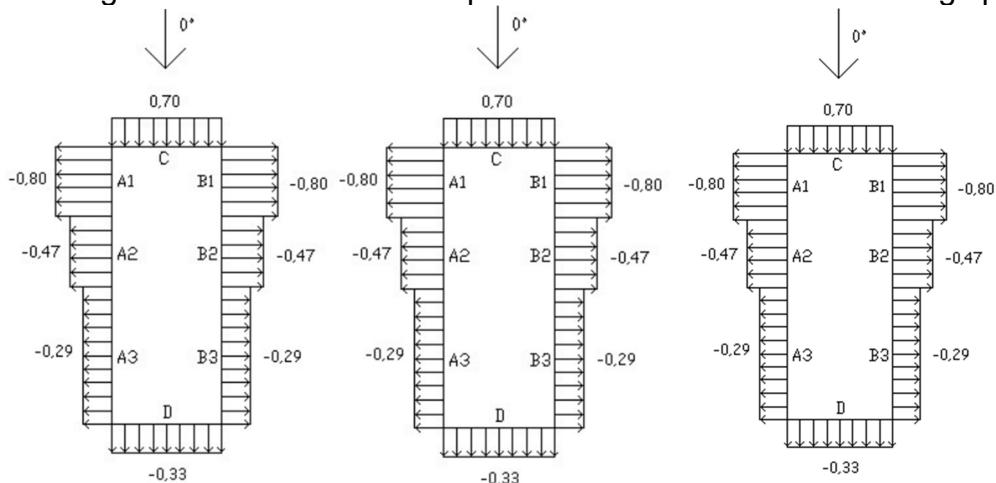
Fonte: Autor, 2024.

4.2.2 Resultados dos Coeficientes de Distribuição de Pressão Devido ao Vento utilizando o Visual Vento

Os resultados da distribuição dos coeficientes de pressão para a influência do vento frontal a 0° nas paredes laterais e frontais são apresentados nas figuras abaixo.

Entretanto, mesmo que a velocidade básica do vento seja diferente, os coeficientes de pressão podem permanecer semelhantes, pois as normas consideram condições padrão e estudos históricos de vento para determinar esses valores. Além disso, as características aerodinâmicas das estruturas (como geometria e detalhes construtivos) e a metodologia de cálculo utilizada nas normas são projetadas para proporcionar um nível de segurança e confiabilidade adequado para uma ampla gama de situações climáticas.

Figura 33 - Coeficientes de pressão externos nas laterais do galpão



Bacabal – MA

São Luís – MA

Balsas - MA

Fonte: Visual vento, 2024.

4.3 Análises comparativas dos coeficientes de pressão nos telhados dos galpões das regiões em estudo

De acordo com Blessmann (2009), ensaios em túneis de vento e normas atualizadas mostram que o máximo de sucção média, apresentado como coeficiente de forma, ocorre em coberturas com inclinação entre 8° e 12°. Essas inclinações são comuns na arquitetura atual, presentes em muitas construções modernas. Além disso, é comum o arrancamento parcial de telhados com telhas metálicas onduladas devido a fortes sucções locais. A solução recomendada é reforçar a fixação das telhas nas terças. No entanto, os picos de sucção obtidos em ensaios de túneis aerodinâmicos devem ser interpretados com cautela, pois foram realizados em condições de corrente de ar uniforme.

Estudos comparativos dos coeficientes de pressão em telhados de galpões, realizados pelo programa CYPE 3D e pela NBR 6123 (ABNT, 2023) através do Visual Ventos, evidenciam diferenças significativas nas regiões analisadas. Essas análises são essenciais para entender como diferentes métodos de avaliação podem influenciar o design estrutural e a resistência dos telhados, garantindo maior segurança e durabilidade das construções frente às variações de pressão do vento.

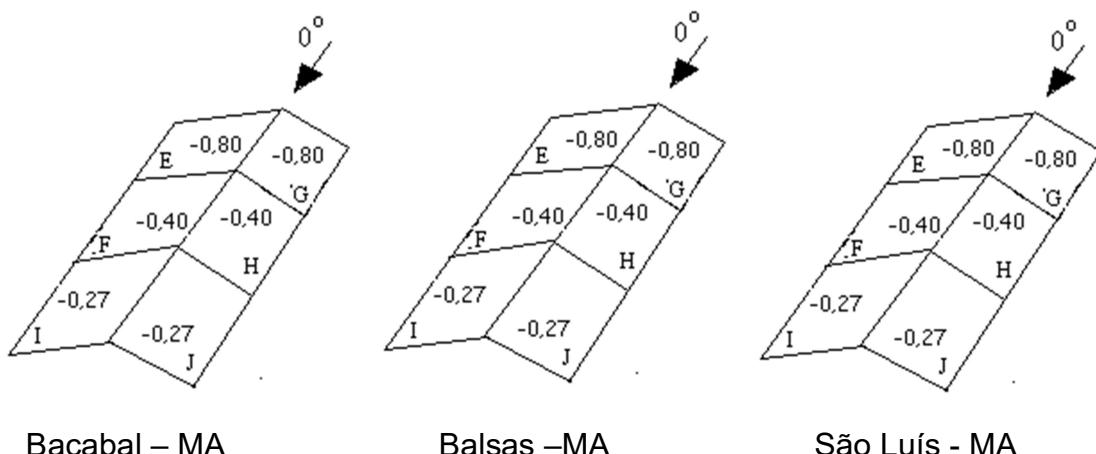
4.3.1 Coeficientes de Pressão no Telhado nas Regiões em estudo

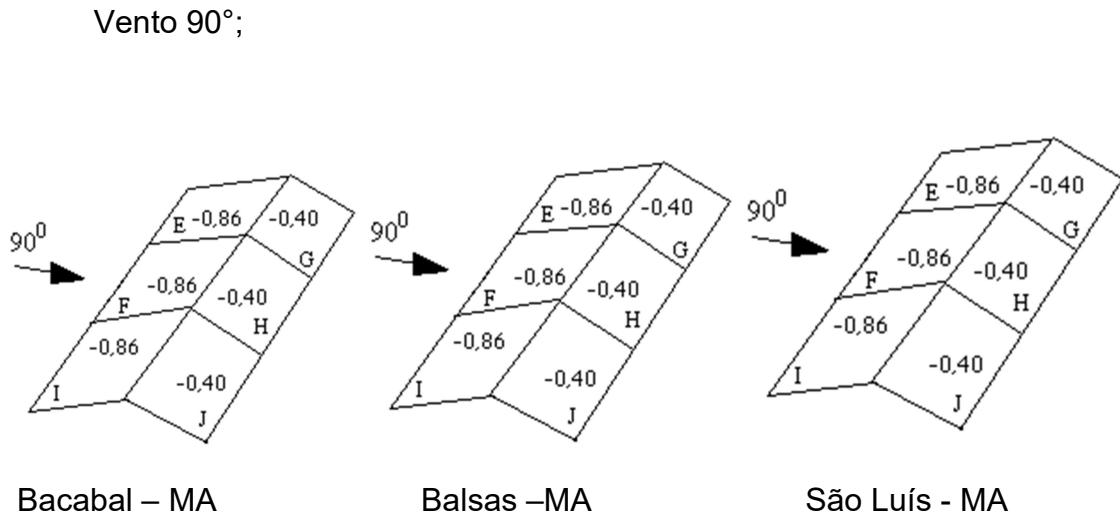
Os resultados dos coeficientes de pressão no telhado baseados nas normas não mudam com a velocidade básica do vento devido à forma como esses coeficientes são determinados e padronizados pelas normas técnicas, como a NBR 6123 (ABNT, 2023).

As normas são projetadas para serem aplicáveis em situações diversas e fornecer diretrizes claras e estáveis para projetistas e engenheiros. Isso permite uma abordagem consistente no projeto e na construção de estruturas, garantindo que elas sejam projetadas para suportar adequadamente as pressões do vento esperadas, independentemente das variações na velocidade básica do vento.

Pode-se observar nas figuras abaixo que os coeficientes de pressão no telhado são iguais para as três regiões estudadas. Isso ocorre porque os cálculos são baseados nas variáveis a (comprimento do galpão), b (largura do galpão) e h (altura do galpão), que são idênticas para todas as três regiões. Como essas dimensões são as mesmas, os coeficientes de pressão externa também são iguais, independentemente da localização geográfica. Isso ocorre porque as normas de engenharia consideram que, para estruturas geometricamente semelhantes e expostas às mesmas condições de vento, os coeficientes de pressão tendem a ser equivalentes.

Figura 34 - Coeficientes de pressão externa – telhado
Vento 0°;





Fonte: Autor, (2024).

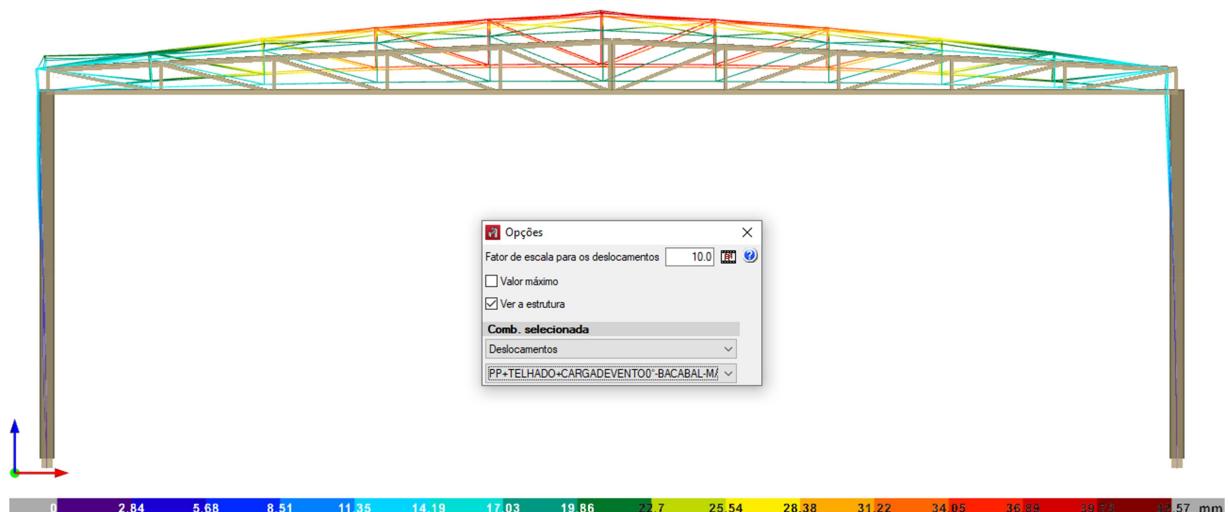
4.4 Resultados das cargas de ventos no galpão de cada região – CYPE 3D

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos por meio do programa CYPE 3D, que mostram a incidência do vento a 0° no galpão proposto para cada região específica. Juntamente com a carga de vento, foram adotadas as cargas de peso próprio, variando apenas a carga de vento. O programa se baseou na pressão dinâmica obtida em cada cidade e nos coeficientes de pressão no telhado, determinados pelo programa Visual Ventos.

- BACABAL

VENTO 0°

Figura 35 - Deslocamento do galpão com vento 0°

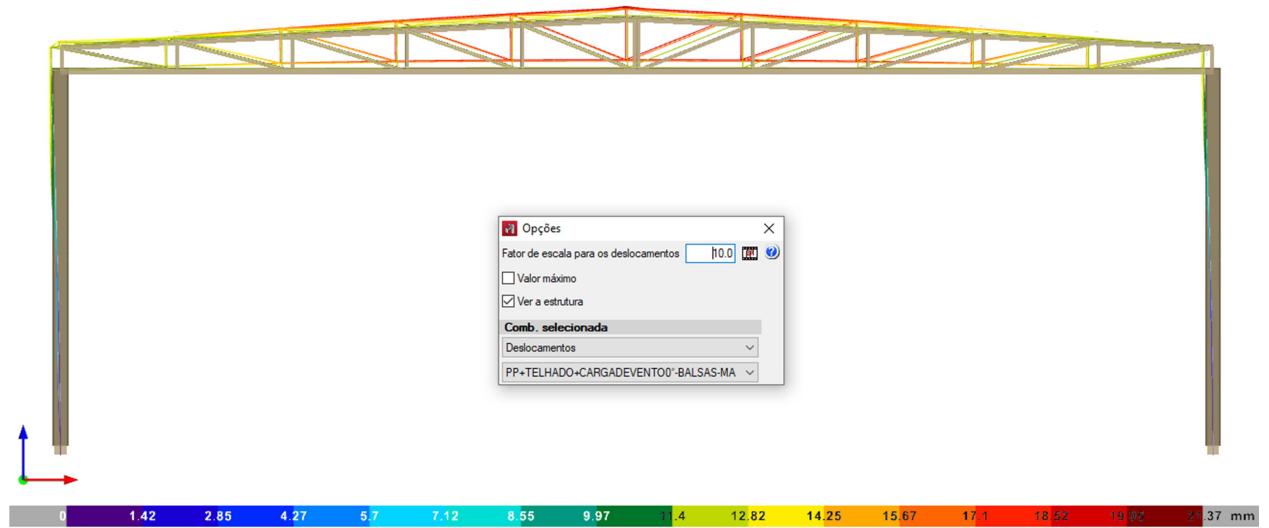


Fonte: Autor, (2024).

- BALSAS

VENTO 0°

Figura 36 - Deslocamento do galpão com vento 0°

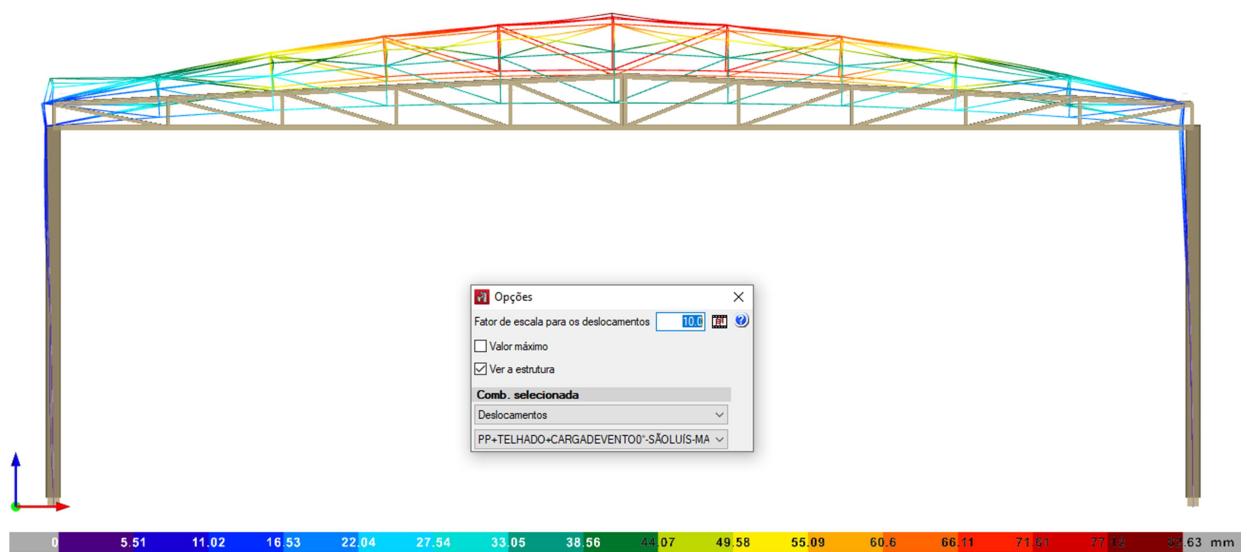


Fonte: Autor, (2024).

- SÃO LUIS

VENTO 0°

Figura 37 - Deslocamento do galpão com vento 0°



Fonte: Autor, (2024).

Em relação aos deslocamentos, ao analisar os resultados (figuras 36, 37 e 38) após o processamento da estrutura do galpão, observa-se que o efeito do vento na estrutura é predominante na direção + ou - X, ou seja, a direção em que o vento atua sobre a fachada de maior área. No entanto, o deslocamento a ser

analisado nesta situação está na direção + ou - Y, considerando o peso próprio, o telhado e, principalmente, os efeitos do vento, que é a variável principal.

O deslocamento vertical do pórtico foi determinado computacionalmente pelo programa utilizado. Segundo o Anexo C da NBR 8800 (ABNT, 2008), Tabela C.1, o limite para vigas de cobertura é de L/250. Assim, o valor máximo de deslocamento obtido foi de 42,57 mm para Bacabal - MA e 21,37 mm para Balsas - MA, enquanto o limite de projeto permitido é 60 mm (15000 mm/250). Portanto, os deslocamentos verticais estão em conformidade com os perfis utilizados.

Para São Luís - MA, o deslocamento foi de 82,63 mm, ultrapassando o limite permitido pela norma devido às altas cargas de vento na região. A análise dos resultados ressalta a importância de considerar adequadamente as cargas de vento para cada localidade e redimensionar os perfis utilizados no galpão em questão.

Já para o estado limite de deformação horizontal em galpões, geralmente é adotado 1/300 da altura da coluna em relação à base, conforme o Anexo C da NBR 8800 (ABNT, 2008), Tabela C.1.

4.5 Esforços resultantes da carga de ventos utilizando o Visual Ventos

Os esforços resultantes da carga de ventos em uma estrutura são críticos para garantir sua segurança e estabilidade. Utilizando o software Visual Ventos, é possível calcular com precisão esses esforços a partir dos coeficientes de pressão interna. Esses coeficientes, que representam a pressão exercida pelo vento dentro da edificação, são aplicados no programa para simular as condições reais que a estrutura enfrentará.

O Visual Vento combina essas pressões internas com as pressões externas, resultando em uma análise abrangente dos esforços atuantes sobre os elementos estruturais, como vigas, colunas e lajes. Esta abordagem permite identificar áreas críticas e ajustar o projeto para resistir adequadamente às cargas de vento.

A seguir, serão apresentadas as combinações das pressões do vento na estrutura do galpão. Sabendo, que quando o valor de Cpi é positivo, significa que a força atua para o interior da edificação, e quando o valor é negativo, a força atua para o exterior. Conforme previsto neste projeto e baseado na norma, a pressão interna é considerada uniformemente distribuída no interior da edificação. Vale destacar que os coeficientes mais elevados serão encontrados na cidade de São

Luís-MA, devido à alta velocidade do vento, com valores como: -2,97 kN/m para sucção no telhado e 2,81 kN/m² de pressão na lateral, de acordo com os coeficientes de pressão adotados.

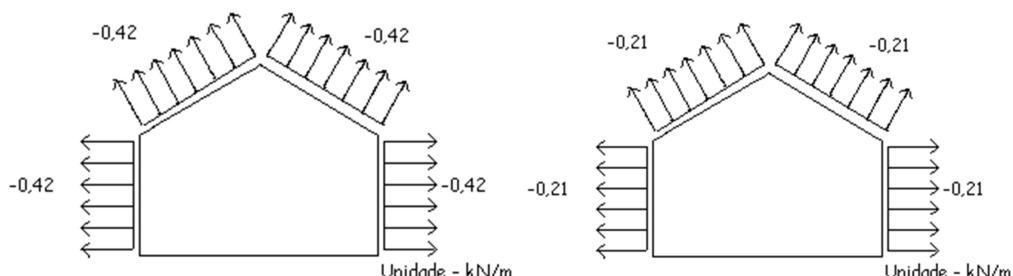
BALSAS – MA

VENTO 0°

Figura 38 - Forças devido ao vento

$$C_{P_i} \gg 0,20$$

$$C_{P_i} \gg -0,30$$



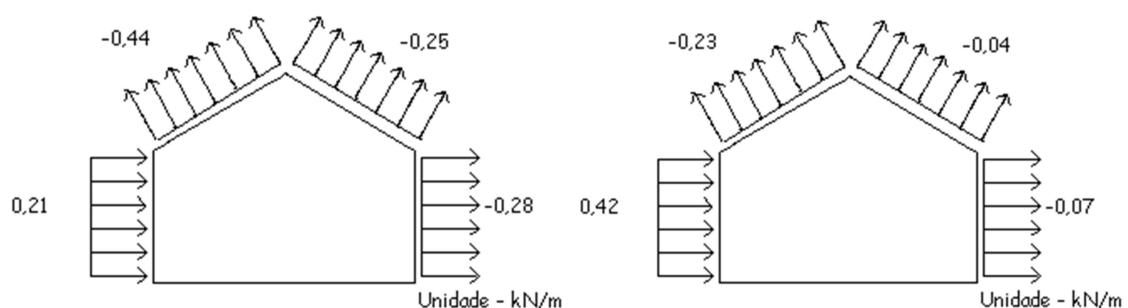
Fonte: Autor, (2024).

VENTO 90°

Figura 39 - Forças devido ao vento

$$C_{P_i} \gg 0,20$$

$$C_{P_i} \gg -0,30$$



Fonte: Autor, 2024.

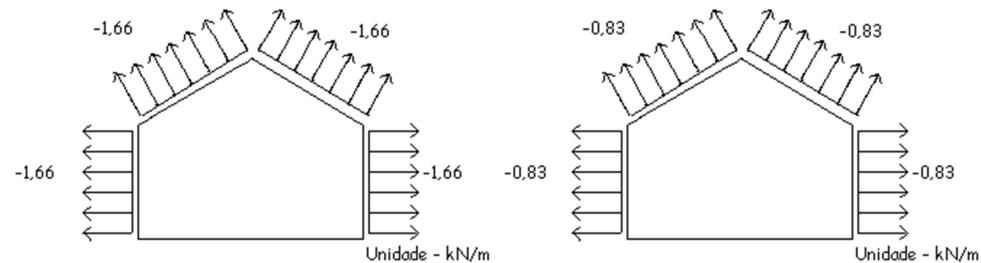
BACABAL – MA

VENTO 0°

Figura 40 - Forças devido ao vento

$$C_{P_i} \gg 0,20$$

$$C_{P_i} \gg -0,30$$



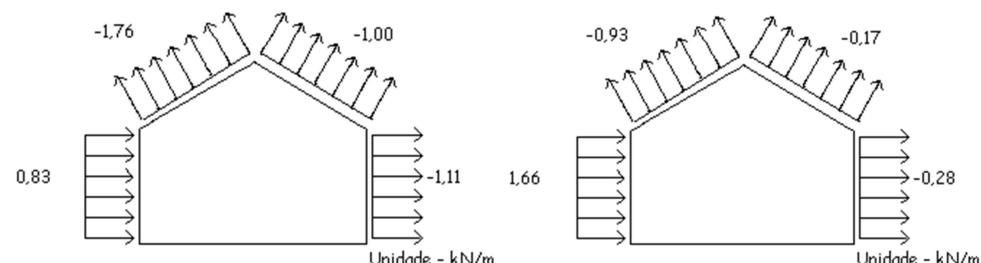
Fonte: Autor, 2024.

VENTO 90°

Figura 41 - Forças devido ao vento

$$C_{P_i} \gg 0,20$$

$$C_{P_j} \gg -0,30$$



Fonte: Autor, 2024.

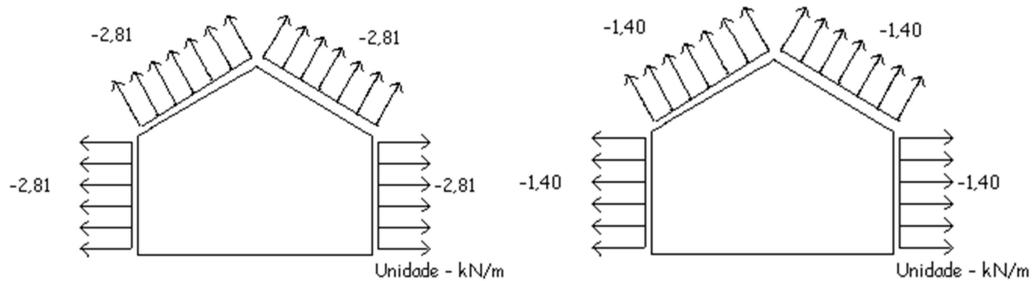
SÃO LUÍS – MA

VENTO 0°

Figura 42 - Forças devido ao vento

$$C_{P_i} \gg 0,20$$

$$C_{P_i} \gg -0,30$$



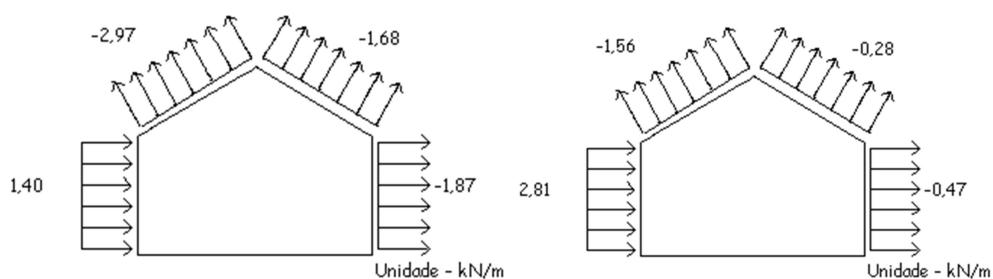
Fonte: Autor, 2024.

VENTO 90°

Figura 43 - Forças devido ao vento

$$C_{P_i} \gg 0,20$$

$$C_{P_i} \gg -0,30$$



Fonte: Autor, 2024.

Os valores dos coeficientes e os locais onde atuam são fornecidos pela Tabela 5 da NBR 6123, diferenciando-os de acordo com as características da estrutura. Utilizando as informações do galpão empregado no estudo, obtém-se os esforços resultantes na estrutura, conforme ilustrado nas figuras 39 a 34.

Embora os valores extremos ocorram apenas em parte da cobertura, o dimensionamento é realizado para evitar qualquer tipo de dano, considerando esses valores para a estrutura como um todo.

Com os valores de C_e e C_i , calcula-se a carga distribuída a ser lançada sobre as terças (F), levando em conta a largura efetiva de influência, a distância entre os pórticos (L_i) e (q), que representa a pressão dinâmica calculada. Dessa forma, para fins de cálculo, adota-se a situação menos favorável.

5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

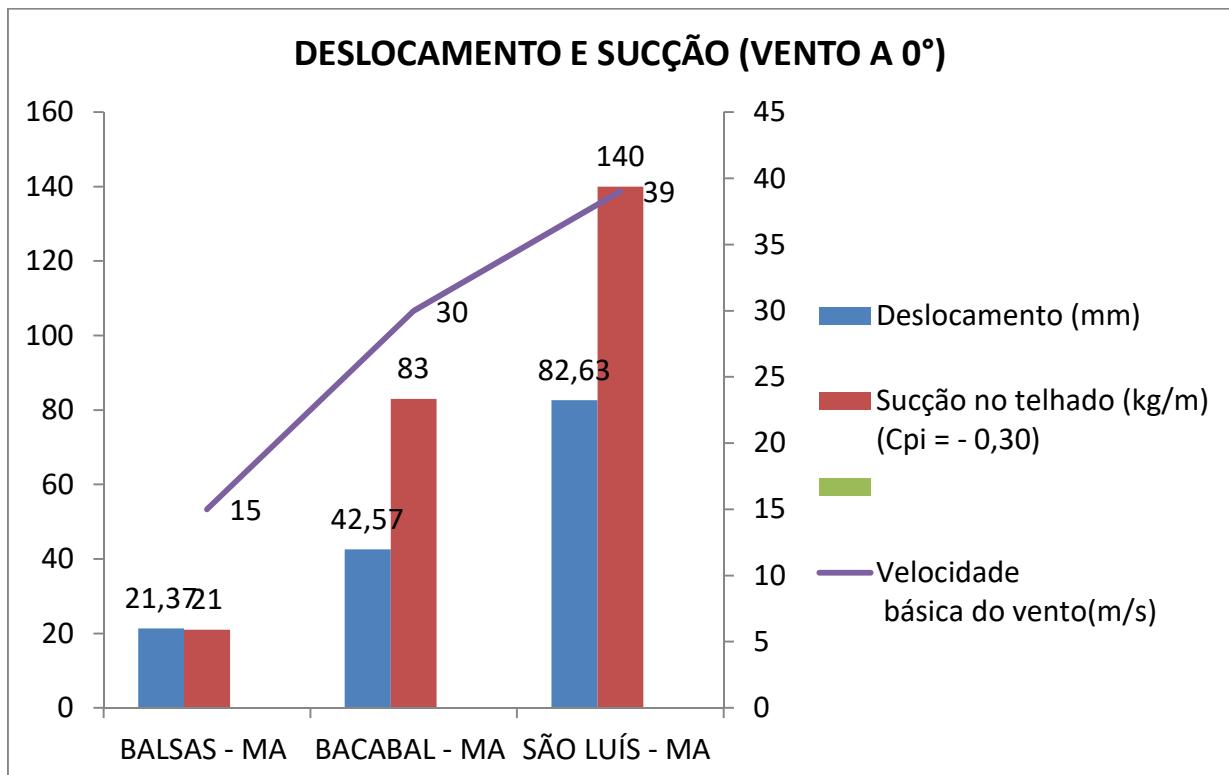
Após uma análise aprofundada sobre o dimensionamento de estruturas metálicas de galpões em diferentes regiões do estado do Maranhão, levando em consideração a ação do vento, é possível destacar diversos pontos relevantes que merecem ser ressaltados.

Inicialmente, a pesquisa demonstrou a importância de considerar as condições climáticas e topográficas específicas de cada região, como Bacabal, Balsas e São Luís, ao projetar estruturas metálicas sujeitas à ação do vento. A variação na velocidade e direção do vento, bem como as características geográficas locais, influência significativamente no dimensionamento e na resposta estrutural das edificações.

Ao longo do estudo, foi possível identificar as melhores práticas de projeto, execução e adaptações necessárias para garantir a segurança, estabilidade e eficiência das estruturas metálicas. A utilização de softwares especializados, como CYPE 3D e Visual Vento, permitiu realizar simulações e dimensionamentos computacionais precisos, conforme as normas vigentes.

A comparação dos resultados das simulações realizadas nas diferentes regiões evidenciou as diferenças significativas no dimensionamento das estruturas, ilustrados no grafico 1, em função das variações do vento.

Gráficos 1 - Comparaçao dos resultados obtidos no projeto



Fonte: Autor, (2024).

Essa abordagem comparativa contribui não apenas para a segurança das edificações, mas também para a otimização do desempenho das estruturas diante de condições climáticas adversas.

É importante ressaltar que a consideração das particularidades climáticas e topográficas de cada região é essencial para garantir a eficácia e durabilidade das estruturas metálicas, minimizando riscos e prevenindo possíveis falhas estruturais. A integração dos conhecimentos adquiridos ao longo da pesquisa com a utilização de softwares modernos representa um avanço significativo no campo do dimensionamento de estruturas metálicas sujeitas à ação do vento.

Portanto, este estudo oferece uma compreensão mais aprofundada das particularidades climáticas locais e sua importância no projeto e execução de galpões industriais. A pesquisa também destaca a criação de uma depressão controlada no interior das edificações como uma solução eficaz para reduzir o esforço externo de sucção, por meio da execução de aberturas estratégicas, tanto de emergência quanto permanentes. Exemplos dessas aberturas incluem a abertura parcial do oitão e a construção de janelas basculantes tipo válvula vista na Figura 5,

além do uso de elementos vazados, como cobogós. Medidas projetadas para mitigar os efeitos adversos da pressão do vento em estruturas metálicas.

Essas medidas não apenas aumentam a estabilidade das estruturas metálicas, mas também previnem falhas estruturais e colapsos durante eventos extremos, como ventos fortes. Ao final, além dessas medidas e objetivos específicos apresentados anteriormente, será apresentado posteriormente alguns resultados obtidos no decorrer do trabalho, delineados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Resultados dos Objetivos específicos

CIDADES	OBJETIVO ESPECÍFICO 1	
	CONDIÇÕES CLIMÁTICAS	FATOR TOPOGRÁFICO
BACABAL - MA	Velocidades médias acima de 5,2 km/h e um pico de 6,6 km/h em outubro. (WEATHER SPARK, 2024).	
BALSAS - MA	A velocidade média do vento é mais alta entre junho e outubro, com velocidades superiores a 12,1 km/h, e agosto sendo o mês com os ventos mais intensos, alcançando uma média de 15,7 km/h. (WEATHER SPARK, 2024).	Segundo a NBR 6123 (ABNT, 2023), o fator topográfico S1 considera as variações do relevo definido como S1 = 1,0 para terrenos planos ou fracamente acidentados, sendo este fator usado nos cálculos para todas as cidades estudadas.
SÃO LUÍS - MA	Em São Luís - MA, a velocidade média do vento é mais intensa em outubro (11,5 km/h). (WEATHER SPARK, 2024).	

Fonte: Autor, (2024).

Tabela 15 - Resultados dos Objetivos específicos

OBJETIVO ESPECÍFICO 2	OBJETIVO ESPECÍFICO 3	OBJETIVO ESPECÍFICO 4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - NORMAS	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS
Foi realizado uma revisão bibliográfica baseado nas seguintes normas: NBR 6123 (ABNT, 2023) – Forças Devidas ao Vento em Edificações; NBR 6120 - Cargas para Cálculo de Estruturas; NBR 8800 (ABNT, 2008) – Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios; NBR 14762 (ABNT, 2001) – Dimensionamento de perfis dobrados a frio.	APRESENTADOS NAS FIGURAS 7 A 16.	A comparação dos resultados das simulações para identificar diferenças no deslocamento das estruturas quanto as cargas de vento estão descritas no gráfico 1.

Fonte: Autor, (2024).

O estudo reafirma a importância de um dimensionamento adequado e de estratégias preventivas na construção de galpões metálicos, especialmente em regiões sujeitas a fortes rajadas de vento. A adoção dessas práticas, fundamentadas em análises regionais detalhadas, é essencial para assegurar a durabilidade e a segurança das estruturas, bem como para minimizar os prejuízos e os riscos associados a desastres naturais.

Conclui-se, portanto, que a engenharia de estruturas metálicas deve continuar a evoluir, incorporando soluções inovadoras e eficazes para enfrentar os desafios impostos pelo ambiente. Espera-se que os resultados e conclusões deste trabalho contribuam para o desenvolvimento de estruturas mais seguras, eficientes e resilientes frente às condições climáticas variáveis enfrentadas no estado do Maranhão.

REFERÊNCIAS

AGUILERA, Jean Rodrigo F. **Estruturas treliçadas esbeltas sob ação do vento.** Tese de Doutorado. PUC-Rio. Rio de Janeiro – RJ, 2007.

ALBUQUERQUE, Hugo Henrique Silva et al. **Análise da influência do vento na estrutura metálica e na estrutura de concreto armado.** Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT- ALAGOAS, v. 7, n. 3, p. 51-58, 2022.

ALMEIDA, Eduardo Henrique Gomes et al. **Estrutura de tesoura em aço para galpão industrial:** comparação entre soluções de elementos treliçados e de alma cheia. Faculdade UNA Pouso Alegre.

ARAÚJO, Luis Henrique da Silva et al. **Estudo de caso:** concepção e dimensionamento de estruturas metálicas para um galpão na cidade de Rio Verde– GO. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123 (ABNT, 2023): Forças Devidas ao Vento em Edificações,** Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800 (ABNT, 2008): Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Rio de Janeiro, 2008.

BELLEI, I. H. **Edifícios Industriais em Aço.** 2^a. Ed. São Paulo: Pini, 2010.

BELLEI, I. H. **Edifícios industriais projeto e cálculo em aço.** Copyright, Editora Pini Ltda, 2010.

BLESSMANN, Joaquim. **Efeitos do vento em edificações.** Editora da URGs. Porto Alegre – RS, 1978.

BLESSMANN, Joaquim. **Ação do vento em edifícios.** Editora da Universidade/UFRGS, 1989.

CARVALHO LOYANE, N. M. **ANÁLISE DE GALPÃO EM ESTRUTURA METÁLICA:** Avaliação das ações do vento típicas para as diversas regiões Brasileiras. Centro Universitário de Brasília - UNICEUB, Brasília, DF, 2017.

CASTRO, Marília Frazão. **Projeto básico de um galpão em estrutura metálica.** Trabalho de Conclusão de Curso. Recife – PE, 2012.

D'ALAMBERT, Flávio. **Galpões em pórticos com perfis estruturais laminados.** Gerdau Açominas, 2004.

FARIA, Duarte Teodoro. **Projeto de um edifício em estrutura de aço.** 2015.

FONSECA, Laryssa Alves Feitosa. **Comparativo de custos totais de galpões em estrutura metálica com vigas de alma cheia e treliçada.** Goiânia – GO, 2019.

FUENTES, Eduardo Vetromilla; BITENCOURT, Daniel Pires; FUENTES, Márcia Vetromilla. **Análise da velocidade do vento e altura de onda em incidentes de naufrágio na costa brasileira entre os estados do Sergipe e do Rio Grande do Sul.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 28, p. 257-266, 2013.

GOMES, H. C; PAULETTI, R. M. O. **PEF 3522 – Ação do Vento das Edificações (Parte II).** Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2019.

GUARNIER, Christiane Roberta Fernandes. **Metodologias de detalhamento de estruturas metálicas.** Ouro Preto – MG, 2009.

LEITE DAVI F. **Análise dos esforços atuantes em um galpão metálico devido à ação do vento.** Universidade federal da Paraíba, João Pessoa - PB, 2017.

LOPES, Jefferson Campos; DO NASCIMENTO, Pedro Henrique Magalhães. **XIII simpósio internacional de ciências integradas da UNAERP Campus Guarujá.** Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Campus Guarujá.

MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras.** 1^a. Ed. São Paulo: Pini, 2007.

MAZON, Ana Amélia Oliveira. **Ventilação natural em galpões utilizando lanternins.** Programa de pós-graduação em engenharia civil. Ouro Preto – MG, 2005.

MIRANDA, Edson; CARDOSO, S. S. **MANUAL TÉCNICO DE TELHAS DE AÇO COBERTURAS E FECHAMENTOS.** Associação Brasileira da Construção Metálica - ABCEM, São Paulo, 2022.

NASCIMENTO, Breno Matias *et al.* **Abordagem didática e prática da ação do vento em edificações.** Construmetal 2016. São Paulo – SP, 2016.

NUNES, Pedro Emanuel Vinhas. **Acção do vento em coberturas metálicas Modelação de uma estrutura do tipo “sombreador”.** Dissertação de Mestrado. Universidade NOVA de Lisboa (Portugal). 2008.

OLIVEIRA JÚNIOR, Marcelo Alves de. **Análise da influência do vento em galpões industriais.** Trabalho de Conclusão de Curso. Caruaru – PE, 2014.

PALOMO, Gabriel M; JÚNIOR, Sérgio S. F. **Projeto estrutural de um galpão industrial de estrutura metálica com mezanino.** Campos dos goytacazes – RJ, 2016.

PEREIRA, Lívia Arantes *et al.* **Análise da Influência dos Esforços de Vento em Coberturas em Função da Variação da Inclinação.** Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE, v. 17, n. 2, p. 51-59, 2017.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço:** dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800: 2008. 8^a Edição. Rio de Janeiro, 2008.

PIGNATTA, Valdir; FRUCHTENGARTEN, Julio. **Dimensionamento de estruturas de aço**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 2012.

SILVA, Adrielle Batista *et al.* **Estruturas metálicas**. Seminário - Estruturas metálicas, Faculdade Tecnológica de São Paulo.

SILVA, R. E. R. **Projeto de galpão em estrutura metálica**: consumo de aço em soluções com perfis laminados e conformados a frio. Goiânia - GO, 2017.

SIMIM, Alexandre Inalbis; SILVA, Bruno Antônio de Almeida; MADUREIRA, Magno Victor bambá. **Dimensionamento de fundações relacionadas a galpão de estruturas metálicas**. Belo Horizonte – MG, 2021.

SOUZA, Dionei Heloi de. **Projeto de estrutura metálica em mezanino**. Engenharia Civil - Pedra Branca. Palhoça – SC, 2019.

TULLIO, Franciele B. M. **Engenharia da Construção Civil e Urbana**. Editora Antena, 2019.

WAHRHAFTIG, Alexandre de Macêdo. **Ação do vento segundo a NBR 6123/88. In: Ação do Vento**. Blucher Open Access, 2017. p. 163-184.

WEBER, Matheus S. **Estudo comparativo da influência da força devido à ação do vento no dimensionamento de uma estrutura metálica de grande porte**. Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, Santa Cruz do Sul, 2023.