



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
BAHIA (IFBA), CAMPUS JEQUIÉ**

Bárbara Keyla Gonçalves Oliveira Guimarães Soares

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO VENTO NA ESTABILIDADE ESTRUTURAL
DA COBERTURA METÁLICA DE UMA EDIFICAÇÃO NA CIDADE DE JEQUIÉ**

Jequié-BA
2024

Bárbara Keyla Gonçalves Oliveira Guimarães Soares

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO VENTO NA ESTABILIDADE ESTRUTURAL DA
COBERTURA METÁLICA DE UMA EDIFICAÇÃO NA CIDADE DE JEQUIÉ**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado à disciplina de TCC, como
requisito parcial para conclusão do curso de
Bacharelado em Engenharia Mecânica com
ênfase em Mecatrônica.

Orientadora: Dr^a Rita de Cássia Souza
de Queiroz.

Coorientador: Esp. Arthur Gomes Lima
França.

Comissão Examinadora

Dr^a Rita de Cássia Souza de Queiroz - IFBA
(Orientadora)

Prof^a. Larisse Lima de Sousa - IFBA
(Membro Interno)

Esp. Arthur Gomes Lima França - SENAI CIMATEC
(Coorientador - Membro Externo)

Jequié-BA
2024

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder a saúde, a força e a sabedoria necessárias para superar os desafios ao longo desta caminhada acadêmica. Sua presença em minha vida foi fundamental, iluminando meu caminho e me dando coragem para seguir em frente nos momentos mais difíceis.

À Nossa Senhora, por sua intercessão e proteção constantes. Agradeço por sua presença materna, conforto e inspiração nos momentos de aflição, e por me guiar com amor e esperança.

À minha mãe, Gisélia Gonçalves, por seu amor inabalável, seus sacrifícios e por acreditar em mim sempre. Agradeço imensamente ao meu esposo, Rayan Pinheiro, pelo amor, paciência e apoio incondicional. Você esteve ao meu lado em cada passo desta jornada, me incentivando a não desistir e a dar o meu melhor. À minha irmã, Kelly Guimarães, por sua companhia, compreensão e palavras de encorajamento. Seu carinho e apoio foram essenciais para que eu mantivesse o foco e a determinação.

Aos meus orientadores, Dr^a Rita Cássia e Arthur França cuja expertise, orientação e paciência foram cruciais para a concretização deste trabalho. Agradeço profundamente por compartilharem seu conhecimento e experiência, por me guiarem com conselhos preciosos e por acreditarem em meu potencial. Sem a dedicação e o comprometimento de vocês, este TCC não teria alcançado o mesmo nível de qualidade.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - Campus Jequié por proporcionar um ambiente acolhedor e estimulante, recursos essenciais e oportunidades de crescimento acadêmico e pessoal. Agradeço aos professores e funcionários, que sempre estiveram dispostos a ajudar e a oferecer suporte durante todo o curso.

A todos, meu mais sincero e profundo agradecimento. Cada um de vocês teve um papel fundamental na realização deste trabalho e na minha formação. Sou eternamente grata por todo o apoio, incentivo e dedicação recebidos ao longo desta jornada.

Resumo

As vantagens da utilização do aço na construção civil, como redução do tempo de construção e otimização de materiais, têm levado à ampla adoção de estruturas metálicas em edificações. No entanto, é crucial considerar a influência dos ventos desde as fases iniciais do projeto para garantir durabilidade e segurança. A norma brasileira ABNT NBR 6123:2023 oferece recomendações para considerar os efeitos dos ventos, sugerindo a realização de testes em túneis de vento. Apesar dos resultados destes testes serem considerados precisos, os túneis de vento demandam elevados investimentos e tempo de aplicação. Para suprir estas barreiras, torna-se viável a aplicação da fluidodinâmica computacional para analisar a influência dos ventos em estruturas metálicas. Assim, o presente trabalho possui como objetivo avaliar a influência do vento na estabilidade e segurança estruturais da cobertura metálica de um edifício utilizando a fluidodinâmica computacional para avaliar o comportamento das estruturas metálicas em diferentes intensidades do vento. Neste contexto, empregou-se a metodologia de pesquisa quantitativa experimental com o auxílio do *software* SolidWorks com o intuito de realizar simulações da cobertura metálica do prédio do Serviço Social da Indústria (SESI) na cidade de Jequié-BA, para avaliar a resposta estrutural sob duas diferentes condições de vento. A primeira considerou a velocidade do vento conforme estabelecido pela norma NBR 6123:2023, com uma média de 30 m/s para a região do prédio em estudo. A segunda baseou-se na velocidade do vento local, estimada em 10 m/s pelo CTPEC (Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos), para verificar o desempenho da estrutura em condições típicas. Constatou-se, através da simulação, que a estrutura metálica em questão demonstra efetiva resistência aos ventos típicos em Jequié-BA, tornando-a uma escolha segura. Do mesmo modo, a aplicação da norma NBR 6123:2023 mostrou-se válida, uma vez que a estrutura suportou a velocidade do vento estipulada pelo mapa das isopletras. Portanto, a utilização da simulação fluidodinâmica computacional valida a segurança da estrutura metálica conforme a norma NBR 6123:2023, demonstrando sua resistência a ventos normais e confirmando sua adequação para a construção civil. Além disso, os resultados satisfatórios das simulações sugerem que a realização de testes em túneis de vento pode ser evitada, oferecendo uma solução mais econômica e eficiente.

Palavras-chave: CFD; Estruturas Metálicas; Edificações; Segurança; Resistência Estrutural.

Abstract

The advantages of using steel in civil construction, such as reduced construction time and material optimization, have led to the widespread adoption of metal structures in buildings. However, it is crucial to consider the influence of wind from the early stages of the project to ensure durability and safety. The Brazilian standard ABNT NBR 6123:2023 offers recommendations for considering the effects of wind, suggesting the use of wind tunnel tests. Although the results of these tests are considered accurate, wind tunnels require significant investments and application time. To overcome these barriers, the application of computational fluid dynamics (CFD) becomes feasible for analyzing the influence of wind on metal structures. Thus, the present work aims to evaluate the influence of wind on the structural stability and safety of the metal roof of a building using CFD to assess the behavior of metal structures under different wind intensities. In this context, the experimental quantitative research methodology was employed with the aid of SolidWorks software to perform simulations of the metal roof of the Serviço Social da Indústria (SESI) building in the city of Jequié-BA, to evaluate the structural response under two different wind conditions. The first considered the wind speed as established by the NBR 6123:2023 standard, with an average of 30 m/s for the region of the building under study. The second was based on the local wind speed, estimated at 10 m/s by CTPEC (Weather Forecast and Climatic Studies Center), to verify the performance of the structure under typical conditions. It was found, through simulation, that the metal structure in question demonstrates effective resistance to the typical winds in Jequié-BA, making it a safe choice. Similarly, the application of the NBR 6123:2023 standard proved valid, as the structure withstood the wind speed stipulated by the isopleth map. Therefore, the use of CFD simulation validates the safety of the metal structure according to the NBR 6123:2023 standard, demonstrating its resistance to normal winds and confirming its suitability for civil construction. Furthermore, the satisfactory results of the simulations suggest that wind tunnel tests can be avoided, offering a more economical and efficient solution.

Keywords: CFD; Metal Structures; Buildings; Safety; Structural Resistance.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama tensão x deformação dos aços com patamar de escoamento. .	11
Figura 2 – Diagramas tensão-real de formação e tensão de engenharia de formação.	13
Figura 3 – Partes componentes de um galpão.	14
Figura 4 – Galpão metálico.	15
Figura 5 – Vistas do galpão metálico.	16
Figura 6 – Mapa de isopletas de vento, Velocidade Básica do vento.	18
Figura 7 – Etapas metodológicas.	24
Figura 8 – Vista isométrica do prédio.	25
Figura 9 – Domínio de cálculo.	26
Figura 10 – Malha de viga.	27
Figura 11 – Domínio.	30
Figura 12 – Simulação da velocidade do vento de acordo com a NBR 6123.	30
Figura 13 – Simulação da velocidade do vento real.	31
Figura 14 – Escoamento de ar bidimensional sobre uma edificação com arestas vivas.	32
Figura 15 – Análise da formação de vórtices de acordo com a velocidade da NBR6123.	32
Figura 16 – Análise da formação de vórtices de acordo com a velocidade de real. . .	33
Figura 17 – Análise dos efeitos da turbulência na velocidade do vento conforme a NBR 6123.	33
Figura 18 – Análise dos efeitos da turbulência na velocidade do vento real.	34
Figura 19 – Tensões estruturais sob condições de velocidade real do vento	35
Figura 20 – Análise de tensão na estrutura de acordo com a NBR6123	36
Figura 21 – Deslocamento da estrutura sob condições de velocidade Real	37
Figura 22 – Deslocamento da estrutura de acordo com a NBR6123	37

Lista de tabelas

Tabela 1 – Definição de categorias de terreno.	19
Tabela 2 – Definição de categorias de terreno.	19
Tabela 3 – Parâmetros Meteorológicos	20
Tabela 4 – Valores mínimos para coeficiente de S_3	21
Tabela 5 – Parâmetros utilizados para a geração do domínio	29
Tabela 6 – Valores da Velocidade Característica e Coeficiente de Arrasto	35

Sumário

1	INTRODUÇÃO	8
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1	Tensões e Deformações	10
2.2	Ensaio de Tração Simples	10
2.3	Propriedades mecânica do aço	12
2.3.1	Ductilidade	12
2.3.2	Fragilidade	12
2.3.3	Resiliência, tenacidade e dureza	12
2.4	Estruturas Aporticadas para edificações	13
2.5	Galpões Industriais Simples.	14
2.6	NBR: 6123 - 2023: Forças devidas ao vento em edificações	16
2.6.1	Influência do vento nas estruturas	16
2.6.2	Velocidade do vento	17
2.7	Teorema de Bernoulli	21
2.8	Determinação das forças estáticas devido ao vento	22
2.9	Coefficientes de Pressão e Forma Aerodinâmicos	22
2.10	Efeitos Dinâmicos do vento	23
3	METODOLOGIA	24
4	RESULTADOS	29
4.1	Simulação fluidodinâmica	29
4.2	Simulação da Estabilidade Estrutural	34
4.2.1	Resultado analítico	34
4.2.2	Resultados obtidos pela análise da estabilidade estrutural	35
4.2.2.1	Análise de tensão	35
4.2.2.2	Análise do Deslocamento	36
5	CONCLUSÃO	39
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	39
	REFERÊNCIAS	40

1 Introdução

O uso da estrutura metálica como tecnologia construtiva teve início por volta do século XVIII e, no Brasil, começou na segunda metade do século XIX com o uso do ferro fundido, continuando até os dias atuais com o emprego de aço (SCHLICHTING, 2018). Castro (2008) afirma que o uso de estruturas de metal economiza tempo e permite a reciclagem de materiais, embora exija trabalhadores qualificados. A autora também assegura que estruturas de metal além de serem mais leves, resultam em economias significativas na construção das fundações de edifícios.

Em contrapartida, essas estruturas vêm se tornando cada vez mais leves e esbeltas, sendo mais suscetíveis a esforços como vibrações, flutuações de carga, impactos, e até mesmo eventos sísmicos, fenômenos dinâmicos e de instabilidade (AGUILERA, 2007), incluindo a influência dos ventos. De acordo com o estudo realizado por Vanin (2011) sobre edifícios altos, os carregamentos horizontais são causados principalmente pela ação do vento, e estes efeitos dinâmicos podem resultar em movimentos significativos devido à formação de vórtices, tanto na direção perpendicular ao fluxo de vento quanto em oscilações de torção. Isto pode afetar a estabilidade, incluindo elementos como vigas metálicas e outros pontos de sustentação, causando deslocamentos na estrutura. Entretanto, no Brasil o fator de carga de vento não é levado em consideração pelos projetistas por considerar que o país não sofre com este fenômeno de forma significativa (LIMA e SANTOS, 2019).

A Norma Brasileira NBR 6123:2023 disponibiliza de análises para calcular as forças do vento que atuam em edifícios. Conforme esta norma, em certos casos, é permitido simplificar a análise estrutural dinâmica, tratando os efeitos do vento em estruturas altas como se fossem forças estáticas equivalentes. Para fazer essa simplificação, é necessário calcular a frequência natural e o período fundamental da estrutura. De acordo com CARDOSO, BORCHARDT e MARQUES (2011), a frequência natural de vibração se caracteriza como a intensidade com que cada estrutura vibra quando não atingida por forças externas. Por outro lado, o período fundamental é o menor intervalo de tempo em que a estrutura completa um ciclo completo de vibração, refletindo a base temporal das oscilações inerentes à sua configuração física. Conforme a ABNT NBR 6123:2023, se o período fundamental for menor que um segundo, a análise dinâmica pode ser dispensada. Além disso, em determinadas situações a norma sugere a realização de testes em túneis de vento para verificar esses efeitos nas estruturas. Entretanto, estes testes são frequentemente demorados e dispendiosos, o que abre a oportunidade de buscar uma nova maneira de verificar as ações do vento em estruturas.

Em 2017, Carvalho conduziu uma pesquisa detalhada sobre as variações das velocidades básicas do vento no Brasil, conforme estabelecido pela NBR 6123/1988. O estudo analisou quatro tipos de galpões submetidos a cinco velocidades de vento: 30, 35, 40, 45

e 50 m/s. Os resultados indicaram que, para as velocidades de 30, 35 e 40 m/s, os comportamentos estruturais dos perfis analisados foram idênticos, cobrindo aproximadamente 90% do território brasileiro onde as velocidades médias dos ventos são predominantes. No entanto, para velocidades superiores a 40 m/s, comuns no sul do Brasil e em partes das regiões centro-oeste e sudeste, os esforços combinados das forças de vento se mostraram mais críticos do que os esforços combinados de sobrecarga, destacando a importância de considerar esses extremos na fase de projeto.

Lu et al. (2012) investigaram o desempenho de simulações computacionais em comparação com ensaios em túnel de vento de camada limite. Os resultados mostraram uma boa concordância entre as simulações e os ensaios físicos, particularmente na captura de gradientes de pressão em áreas pequenas. No entanto, os autores destacaram algumas limitações dos ensaios em túnel de vento: a redução da escala dos modelos (entre 1/100 e 1/500) resulta em números de Reynolds significativamente menores do que os reais, afetando os coeficientes de pressão local e de pressões máximas. Além disso, reproduzir condições de campo, como rugosidade superficial, turbulência atmosférica e características do terreno, apresenta desafios adicionais.

Makowski (2004) focou sua pesquisa na aplicabilidade da ABNT NBR 6123/1988 para determinar coeficientes de pressão e respostas estruturais de coberturas metálicas específicas e de médio porte. Os estudos compararam dados normativos com resultados de ensaios em túnel de vento, concluindo que a norma brasileira fornece uma base consistente para o cálculo das pressões de vento em coberturas metálicas. No entanto, ressaltou a necessidade de ajustes e considerações específicas para diferentes tipos de estruturas e condições de vento.

O objetivo deste estudo é avaliar a influência do vento em conformidade com a ABNT NBR 6123:2023 na estabilidade estrutural da cobertura de um edifício situado na cidade de Jequié (BA). Para alcançar esse propósito, pretende-se realizar simulações fluidodinâmicas computacionais, do termo em inglês *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, utilizando o *software* SolidWorks. Essas simulações serão fundamentadas em diferentes configurações de velocidades dos ventos. A intenção é capturar a variação destes elementos climáticos e entender como eles impactam a resposta estrutural da cobertura do edifício. Ao obter os dados provenientes das simulações CFD, a avaliação se concentrará em examinar cuidadosamente parâmetros críticos como tensões e deslocamentos da estrutura da cobertura. A análise dos resultados será realizada em consonância com os requisitos de segurança estrutural estabelecidos pela norma ABNT NBR 6123:2023, visando garantir a conformidade com os padrões de segurança estrutural exigidos.

2 Fundamentação Teórica

Nesta seção, serão apresentados tópicos essenciais para a compreensão da influência dos ventos sobre estruturas metálicas, os quais foram fundamentais para a realização deste trabalho. Esses assuntos são indispensáveis para uma análise completa e aprofundada do impacto dos ventos em construções de aço.

2.1 Tensões e Deformações

Em aplicações que envolvem a análise de estruturas, as grandezas mais comuns de uso são as tensões (σ) e as deformações (ϵ). Com isso, é possível imaginar uma barra reta que está sendo submetida a uma força F aplicada na mesma direção do seu eixo. Esse tipo de carregamento é chamado de tração simples. Quando a força F é dividida pela área A da seção transversal da barra, obtém-se o valor da tensão normal (σ) como mostra a equação 1:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde: σ representa a tensão, F representa a força e A representa a área.

Quando se aplica uma força de tração simples a uma barra, a parte da barra que inicialmente tinha um comprimento l_0 se estica e fica com um novo comprimento $l_0 + \Delta l$. Para quantificar essa mudança no comprimento, usamos um conceito chamado deformação, representado pela letra ϵ . A deformação ϵ é calculada pela seguinte relação mostrada na equação 2:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Onde: ϵ representa a deformação, l_0 o comprimento e Δl a variação da deformação.

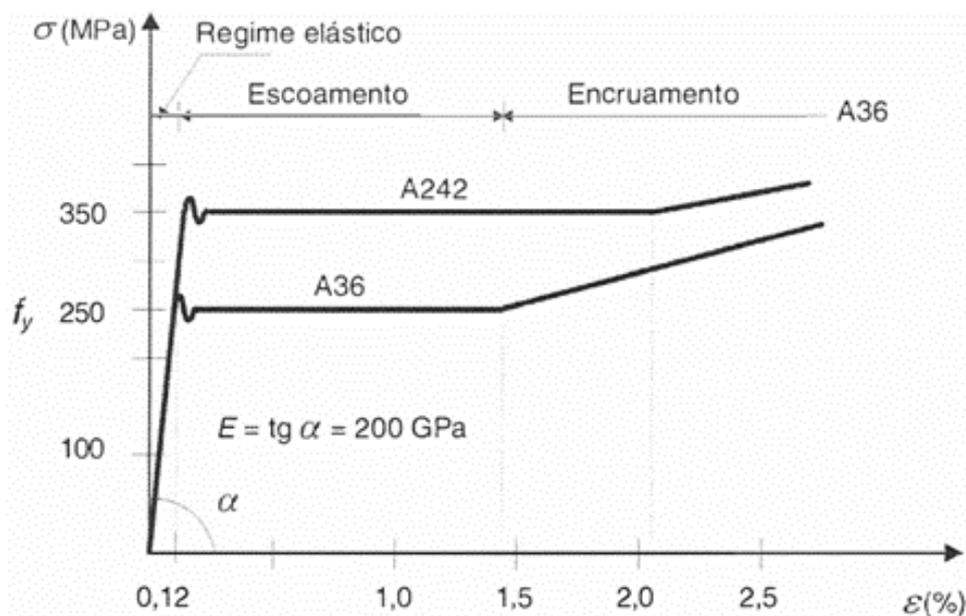
2.2 Ensaio de Tração Simples

O ensaio de tração simples, realizado à temperatura ambiente, é uma técnica amplamente utilizada para avaliar as propriedades mecânicas dos aços. Essas mesmas propriedades podem ser obtidas para a compressão, desde que não haja risco de flambagem. No ensaio, as máquinas seguram as barras metálicas com garras especiais e aplicam gradualmente forças de tração crescentes. Em cada etapa desse processo, é medido o quanto a barra se alonga (Δl) em relação ao seu comprimento inicial (l_0).

Quando uma barra é tracionada, sua seção transversal diminui, o que nos permite calcular a tensão real em cada estágio do teste dividindo a força aplicada pela área da seção transversal nesse estágio específico. Para simplificar os cálculos, é comum usar uma tensão convencional, que é a força dividida pela área inicial (antes de aplicar qualquer

carga), chamada A_0 . O alongamento unitário também é calculado em relação ao comprimento inicial da barra, sem carga. Se plotarmos os valores dos alongamentos unitários (ϵ) no eixo das abscissas e os valores das tensões convencionais (σ) no eixo das ordenadas, obteremos um gráfico conhecido como diagrama tensão-deformação, que mostra como o aço se comporta quando submetido a cargas estáticas. Na figura 1, é possível observar os diagramas correspondentes aos aços A36 e A242, com uma escala maior no eixo das abscissas.

Figura 1 – Diagrama tensão x deformação dos aços com patamar de escoamento.



Fonte: NORTON, 2013.

Quando um material vai além do seu regime elástico, ele exibe uma propriedade chamada de escoamento, que se caracteriza pelo aumento da deformação mesmo com uma tensão constante sendo aplicada. O ponto em que essa deformação começa a acontecer é chamado de limite de escoamento (f_y) do material. Para aços carbono comuns, o limite de escoamento costuma ser em torno de 250 MPa (duzentos e cinquenta megapascais) (no padrão ASTM A36, por exemplo), enquanto aços de baixa liga costumam ter um limite de escoamento próximo a 350 MPa (NORTON, 2013).

O escoamento geralmente causa uma deformação visível na peça metálica. Por esse motivo, ao dimensionar estruturas usando a teoria elástica, consideramos o limite de escoamento (f_y) como uma espécie de limite de tensão seguro, ao qual aplicamos um coeficiente de segurança adequado para obter a tensão admissível. As teorias plásticas, por outro lado, levam em conta o estado de escoamento real do material na análise de segurança. Geralmente, o endurecimento (encruamento) do material não é diretamente considerado nas teorias de dimensionamento de aço (NORTON, 2013).

2.3 Propriedades mecânica do aço

2.3.1 Ductilidade

A ductilidade de um material pode ser avaliada de duas maneiras principais: observando o quanto ele se estica antes de se romper ou quanta área é reduzida quando ele se rompe. Quando um material pode esticar em mais de 5% de seu comprimento original antes de se quebrar, chamamos esse material de "dúctil" (NORTON, 2013). Em materiais como os aços dúcteis, quando estão sob forças intensas em pontos específicos, eles podem sofrer deformações plásticas que permitem que as tensões se distribuam de forma mais uniforme. Isso significa que, por exemplo, em uma conexão parafusada, a carga é distribuída de maneira mais equilibrada entre os parafusos.

Além disso, a ductilidade é importante porque, quando um material é submetido a cargas elevadas, ele pode se deformar consideravelmente antes de se romper. Essas deformações significativas servem como um aviso de que cargas pesadas estão atuando sobre o material. A ductilidade pode ser medida observando o quanto o material se estica antes de romper (PFEIL e PFEIL, 2009).

2.3.2 Fragilidade

A fragilidade é um conceito essencial ao estudar as condições em que os aços se tornam quebradiços, o que é de grande importância na engenharia de estruturas metálicas. Materiais que se tornam quebradiços tendem a se romper de forma súbita, sem qualquer aviso prévio.

O comportamento quebradiço pode ser analisado sob dois aspectos: o momento em que a fratura começa (iniciação) e a sua subsequente propagação. A iniciação da fratura ocorre quando uma alta tensão ou deformação unitária se desenvolve em um ponto onde o material perde sua capacidade de se deformar plasticamente (ductilidade). Essas tensões elevadas podem surgir devido a tensões residuais, concentração de tensões, efeitos dinâmicos, entre outros fatores. A perda de ductilidade, por sua vez, pode estar relacionada a baixas temperaturas, elevadas tensões triaxiais, endurecimento do material, fragilização causada pelo hidrogênio, e assim por diante. Uma vez iniciada, a fratura pode continuar a se propagar pelo material, mesmo sob tensões moderadas (PFEIL e PFEIL, 2009).

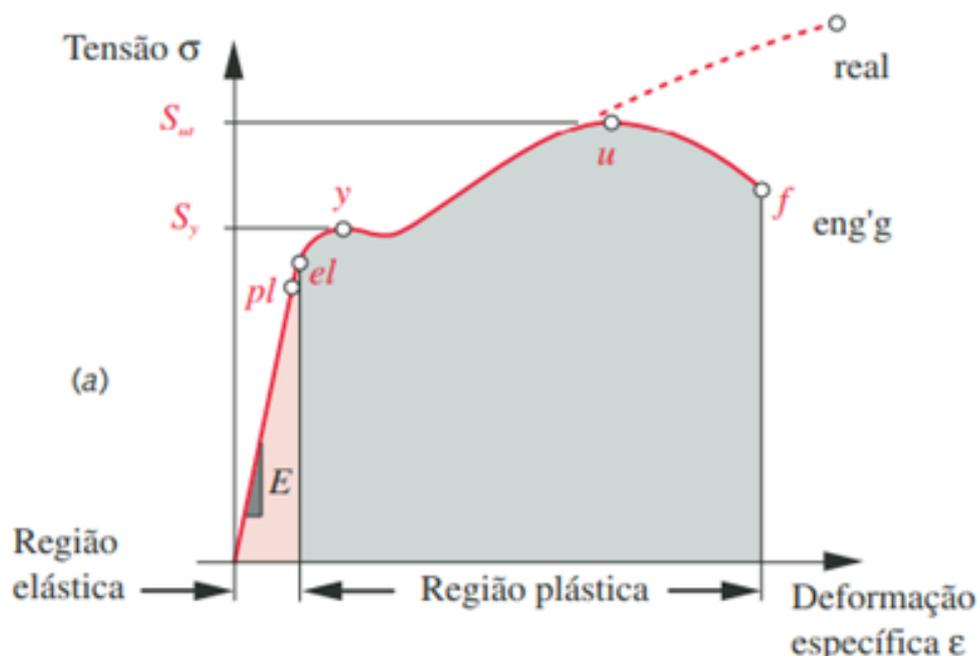
2.3.3 Resiliência, tenacidade e dureza

Resiliência é a capacidade de um material de absorver energia mecânica quando está sendo deformado de maneira elástica (ou seja, quando pode voltar à sua forma original) e também a capacidade de liberar essa energia quando necessário. O módulo de resiliência, ou simplesmente resiliência, é a medida da quantidade de energia elástica que o material pode absorver por unidade de volume enquanto está sendo tracionado, e isso é

representado pela área sob o gráfico de tensão (σ) versus deformação (ϵ) até o ponto onde o material deixa de se comportar elasticamente (figura 1).

A tenacidade de um material é a sua capacidade de absorver energia sem sofrer danos permanentes, e isso é representado pela área sombreada sob o gráfico (figura 2) que mostra como a tensão (força aplicada) se relaciona com a deformação (mudança de forma) até o ponto em que o material começa a deformar de maneira permanente (NORTON, 2013). Em um teste de tração simples, a tenacidade é representada pela área total sob o gráfico de tensão (σ) versus deformação (ϵ) até o ponto de ruptura do material. Em resumo, a tenacidade leva em consideração não apenas a energia elástica, mas também a energia dissipada na deformação plástica antes da quebra do material.

Figura 2 – Diagramas tensão-real de formação e tensão de engenharia de formação.



Fonte: NORTON, 2013.

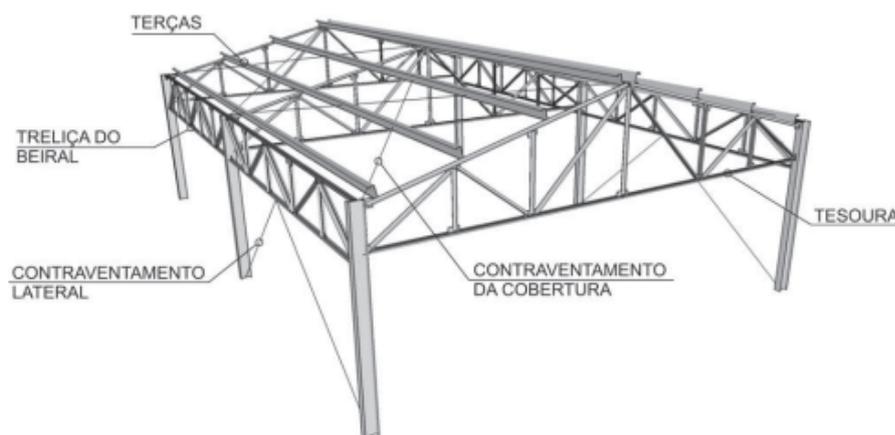
A dureza de um material pode ser um indicador de sua resistência ao desgaste (NORTON, 2013). Na prática mede-se dureza pela resistência que a superfície do material oferece à penetração de uma peça de maior dureza.

2.4 Estruturas Aporticadas para edificações

Em edifícios que utilizam uma estrutura composta por pórticos, o esquema estrutural depende das conexões escolhidas entre as vigas e os pilares. Quando as conexões entre vigas e pilares são flexíveis, a estrutura é estável apenas sob cargas verticais. Para resistir às forças horizontais, os pilares não desempenham um papel significativo (não formam pórticos). Nesse caso, é necessário adicionar uma subestrutura adicional que seja altamente

resistente à flexão, conhecida como contraventamento, como ilustrado na figura 3. Essa subestrutura pode ser composta por uma ou mais paredes diafragmas, também chamadas de paredes de cisalhamento, ou por uma subestrutura treliçada (PFEIL e PFEIL, 2009).

Figura 3 – Partes componentes de um galpão.



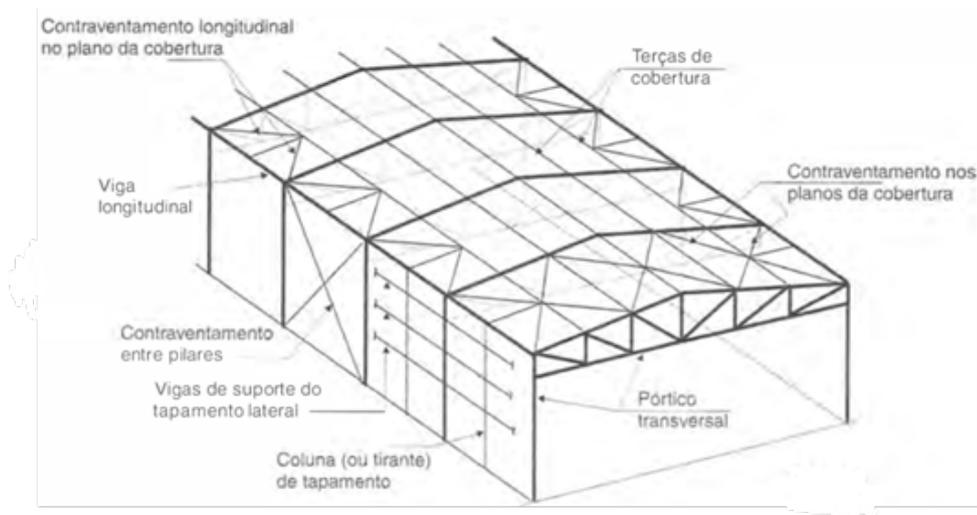
Fonte: Instituto Aço Brasil, 2018.

As conexões flexíveis são mais fáceis de instalar e geralmente têm custos mais baixos em comparação com conexões rígidas. No entanto, a necessidade de incluir subestruturas de contraventamento resulta na concentração das forças horizontais nas fundações dessas subestruturas, ao contrário da estrutura de pórticos, onde as forças horizontais se distribuem pelas fundações de todos os pilares.

2.5 Galpões Industriais Simples.

A figura 4 abaixo ilustra o esquema de um galpão metálico simples, destacando a disposição das vigas, contraventamento e terças, além das principais características estruturais e dimensões que influenciam seu comportamento sob cargas.

Figura 4 – Galpão metálico.



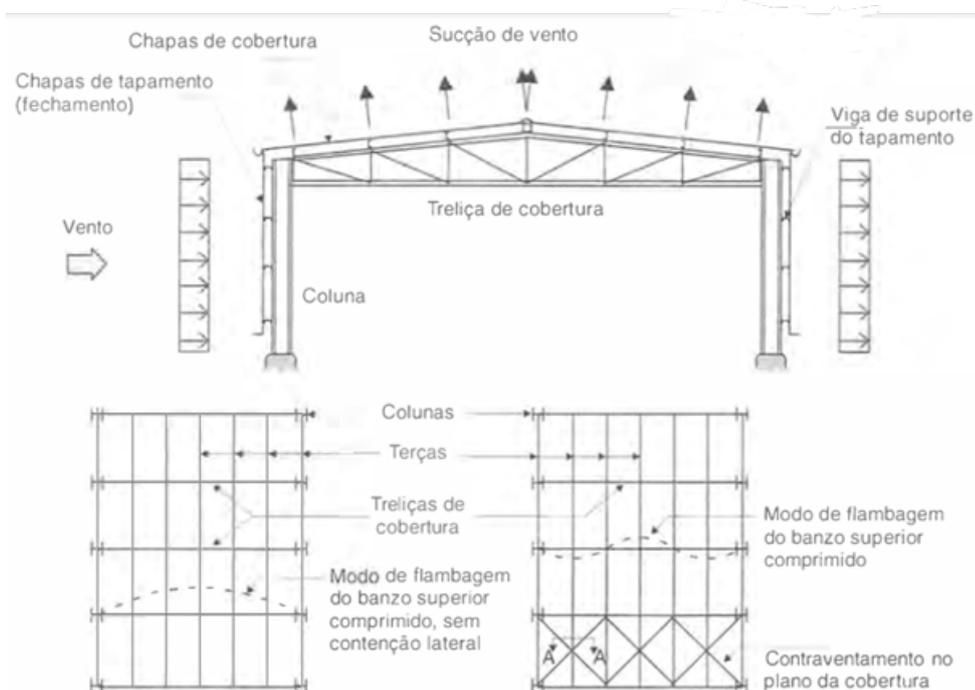
Fonte: PFEIL e PFEIL, 2009.

As terças são vigas longitudinais colocadas (com cerca de 6 metros de comprimento) na estrutura da cobertura. Elas têm a finalidade de transferir as cargas que atuam na cobertura, como o peso do telhado e as forças causadas pelo vento, para a estrutura principal. As forças do vento (V) causam flexão reta nas terças ao longo do seu eixo mais forte, enquanto as forças da gravidade (G) causam flexão inclinada.

O espaçamento entre essas terças é determinado pelo tamanho das chapas que compõem o telhado e geralmente varia de 2 a 4 metros para chapas de metal. As laterais dos galpões também são cobertas com chapas corrugadas de aço, que são apoiadas por vigas chamadas de vigas de tapamento lateral. Essas vigas também têm a função de transferir as forças do vento das laterais do edifício para a estrutura principal, apoiando-se diretamente nas colunas dos pilares principais. Para reduzir o vão das vigas de tapamento, são instalados tirantes de reforço, que mobilizam a viga superior longitudinal e o reforço longitudinal no plano do telhado, a fim de transferir as forças do vento para as colunas principais. Em alguns casos, também podem ser usadas colunas de tapamento com suas próprias bases de sustentação.

No caso das Figuras 4 e 5, o elemento principal é o pórtico transversal, que é formado pela conexão rígida entre a treliça da cobertura e as duas colunas. Esse pórtico precisa resistir às forças do vento que atuam nas laterais do edifício e na cobertura, além das forças gravitacionais.

Figura 5 – Vistas do galpão metálico.



Fonte: PFEIL e PFEIL, 2009.

Os sistemas de contraventamento são estruturas compostas por barras dispostas em forma de X, geralmente formando uma treliça. Esses sistemas têm como principal objetivo proporcionar estabilidade ao conjunto e distribuir as cargas de vento. Por exemplo, no caso de um telhado, o contraventamento é fundamental para manter a estabilidade lateral da parte superior da treliça, que é comprimida devido ao peso da estrutura.

Quando esses elementos comprimidos estão sujeitos à possibilidade de flexão no plano horizontal (ou seja, no plano do telhado), o contraventamento nesse plano é usado para reduzir o comprimento de flambagem desses elementos e, assim, aumentar sua capacidade de resistir à compressão. As barras diagonais desempenham um papel importante nesse sistema, transferindo as forças que atuam lateralmente para a treliça do contraventamento. Em situações em que a força do vento que atua sobre o telhado é mais significativa do que as cargas gravitacionais, pode ocorrer uma inversão nas forças internas dos elementos da treliça, fazendo com que a parte inferior da treliça seja comprimida.

2.6 NBR: 6123 - 2023: Forças devidas ao vento em edificações

2.6.1 Influência do vento nas estruturas

Sistemas não-lineares são difíceis de prever quando sujeitos a ações externas devido às relações complexas e não proporcionais entre suas variáveis. Pequenas mudanças nas

entradas podem desencadear respostas imprevisíveis, como oscilações ou comportamento caótico.

As coberturas são construções não-lineares que podem ser impactadas por forças dinâmicas, como o vento. O vento é produzido por diferenças de temperatura de massas de ar e ao entrar em contato com a superfície de qualquer objeto, tende a forçá-lo ao movimento juntamente com ele, podendo influenciar de forma significativa as áreas de barlavento (lado onde o vento incide diretamente) e sotavento (lado oposto ao vento), causando assim variações na sua estabilidade e desempenho (NBR 6123).

Quando o vento sopra sobre uma superfície, pode ocorrer uma pressão adicional (sinal positivo) na superfície devido à colisão das partículas de ar com ela. No entanto, em alguns casos, pode ocorrer o oposto, criando uma pressão reduzida (sinal negativo) na superfície, o que é conhecido como sucção ou vácuo. O vento geralmente atua perpendicularmente à superfície que está obstruindo sua passagem, resultando em diferentes pressões dependendo da direção e da velocidade do vento. (CHAMBERLAIN, 2021).

2.6.2 Velocidade do vento

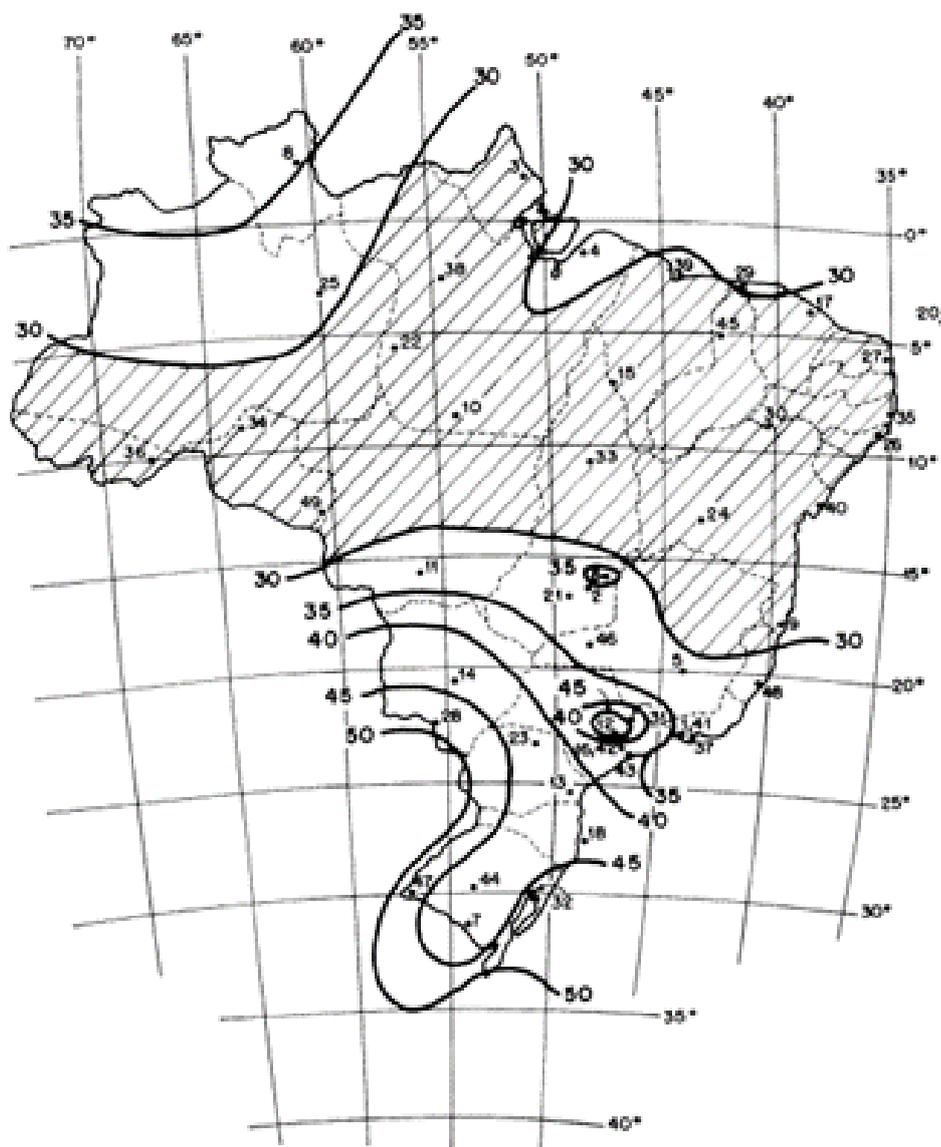
A determinação da velocidade do vento se apoia nas medições experimentais realizadas em torres de monitoramento. Seguindo a diretriz estabelecida pela norma NBR6123, essas observações ocorrem a uma altitude de 10 metros, em zonas descampadas e planas. A velocidade fundamental do vento é estabelecida a partir de rajadas de vento de três segundos de duração que, em média, ocorrem uma vez a cada cinquenta anos, e é denominada como V_o . De acordo com a NBR6123 e como mostra a equação 3, a velocidade característica V_k : é a velocidade usada em projeto, sendo que são considerados os fatores topográficos (S_1), influência da rugosidade (obstáculos no entorno da edificação), dimensões da edificação (S_2) e o fator de uso da edificação que considera a vida útil e o tipo de uso (S_3).

$$V_k = V_o \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (3)$$

Onde: V_o representa a a velocidade básica, S_1 o fator topográfico, S_2 o fator de rugosidade e dimensões da edificação e S_3 o fator estatístico.

A velocidade básica do vento (V_o) é a velocidade máxima do vento que dura 3 segundos, em média, ocorrendo uma vez a cada 50 anos, a uma altura de 10 metros acima do solo, em uma área aberta e plana. A Figura 5 abaixo apresenta o gráfico das isopletas da velocidade básica no Brasil, com intervalos de 5 m/s.

Figura 6 – Mapa de isopletas de vento, Velocidade Básica do vento.



Fonte: NBR 6123: 2023

O fator topográfico S_1 leva em consideração as variações do relevo do terreno e é determinado do seguinte modo:

- a) Terreno plano ou quase plano: $S_1 = 1,0$
- b) Taludes e morros (veja-se NBR6123/2023)
- c) Vales protegidos: $S_1 = 0,9$

O fator topográfico S_2 é determinado definindo uma categoria (rugosidade do terreno) e uma classe de acordo com as dimensões da edificação. As categorias são definidas, de acordo com a NBR:6123, como mostra o tabela 1 abaixo:

Tabela 1 – Definição de categorias de terreno.

Categorias	Descrição do ambiente	Cota média do topo dos obstáculos
I	Mar calmo, lagos, rios	
II	Campos de aviação, fazendas	Inferior ou igual a 1,0m
III	Casas de campo	Igual a 3m
IV	Zonas de parques; áreas industriais.	Igual a 10m
V	Centros de grandes cidades.	Igual ou superior a 25 m

Fonte: Adaptado da NBR6123:2023

O vento não sopra constantemente na mesma velocidade; ele está sempre mudando. No entanto, podemos calcular uma média da sua velocidade ao longo de um período de tempo específico. Segundo a NBR 6123, ao medir o vento em intervalos mais curtos, como a cada 3 segundos, estamos capturando rajadas que são influenciadas por obstáculos de até 20 metros na direção do vento médio. Se aumentarmos o intervalo de tempo para calcular a velocidade média, iremos considerar rajadas que cobrem uma distância ainda maior. Ao determinar quais partes de um prédio devem ser levadas em conta ao calcular as forças do vento, é importante levar em consideração as características de construção ou estruturais que não contribuem significativamente para a integridade estrutural contínua ao longo do edifício. As classes definem-se através das dimensões da edificação de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Definição de categorias de terreno.

Categorias	Descrição do ambiente	Cota média do topo dos obstáculos
I	Mar calmo, lagos, rios	Inferior ou igual a 1,0m
II	Campos de aviação, fazendas	Inferior ou igual a 1,0m
III	Casas de campo	Igual a 3m
IV	Zonas de parques; áreas industriais.	Igual a 10m
V	Centros de grandes cidades.	Igual ou superior a 25 m

Fonte: Adaptado da NBR6123:2023

O cálculo de S_2 é expresso pela equação 4:

$$S_2 = b \cdot Fr \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (4)$$

A determinação do fator S_2 por meio de uma altura z metros acima do nível geral do terreno é obtido pela Equação 4. Onde p é um parâmetro que depende do intervalo de tempo de rajada e da categoria do terreno, enquanto o fator Fr é sempre correspondente à

categoria II. Esta equação é aplicável até a altura Z_g , relativa à altura Z_g gradiente, que define o contorno superior da camada atmosférica. Os parâmetros que permitem determinar o S_2 através da Equação 4 são apresentados na tabela 3:

Tabela 3 – Parâmetros Meteorológicos

Categoria	Z_g (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	1,0	1,0	1,0
		p	1,0	0,98	0,95
		Fr	1,0	0,98	0,95
III	350	b	0,94	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: Adaptado da NBR6123:2023

O S_3 baseia-se em conceitos estatísticos, levando em conta o nível de segurança necessário e a durabilidade da construção. De acordo com a NBR 6123/1988, a probabilidade de o vento ultrapassar a velocidade básica V_0 durante o período de recorrência médio associado, ou seja, em 50 anos, é de 63% para construções comuns. O fator estatístico S_3 é determinado pela tabela 4:

Tabela 4 – Valores mínimos para coeficiente de 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 bombeiros, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,0
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 dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Fonte: Adaptado da NBR6123:2023

A pressão dinâmica ou de obstrução do vento, em condições normais de pressão (1 Atm = 101320MPa) e temperatura a 150, é dada pela equação 5:

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (5)$$

Onde: q representa a pressão dinâmica do vento e V_k a velocidade básica do vento.

2.7 Teorema de Bernoulli

O Teorema de Bernoulli descreve o comportamento de um fluido em movimento em relação à sua energia total. Ele relaciona dois componentes da energia de um fluido: energia cinética e energia potencial gravitacional. Embora não esteja diretamente relacionado ao vento, podemos usá-lo para entender o vento ao redor de superfícies sólidas.

Segundo Pitta (2024), quando o vento encontra uma superfície sólida, ele é desviado e acelera, o que reduz a pressão do ar, criando uma área de baixa pressão. Quando um fluido se move, sua velocidade aumenta e a sua pressão diminui e vice-versa, mantendo

a energia constante. Portanto, quando a velocidade do vento aumenta em uma área, a pressão nessa área diminui para manter a energia constante. A diminuição de pressão prova diminuição na força de arrasto.

2.8 Determinação das forças estáticas devido ao vento

Para determinar as forças estáticas exercidas pelo vento sobre uma estrutura, é preciso entender que depende da diferença de pressão entre as faces opostas dessa estrutura, o que é determinado pelos coeficientes aerodinâmicos. A norma brasileira NBR:6123 permite calcular essas forças usando coeficientes de pressão ou coeficientes de força. Os coeficientes de força são valores predefinidos para diferentes tipos de construções na NBR:6123, obtidos por meio de estudos em túneis de vento. A força devida ao vento através dos coeficientes de forma pode ser expressa pela equação 6 abaixo:

$$F = (C_{pe} - C_{pi}) \cdot q \cdot A \quad (6)$$

Onde: C_{pe} e C_{pi} representam os coeficientes de pressão interno e externo, q a pressão dinâmica do vento e A a área frontal ou perpendicular a atuação do vento.

2.9 Coeficientes de Pressão e Forma Aerodinâmicos

Quando o vento atinge uma construção, ele gera pressões ou sucções devido à sua natureza. Essas pressões extras ou sucções são apresentadas em tabelas na NBR:6123, assim como em normas estrangeiras, e dependem principalmente da forma e proporções da construção, bem como da localização das aberturas.

A presença e as características das aberturas em uma construção afetam os coeficientes de pressão interna que atuam sobre ela devido ao vento. A norma NBR6123, em seu anexo D, fornece informações detalhadas sobre como calcular esses coeficientes de pressão interna. Quando uma construção é completamente hermética ao ar, a pressão dentro dela permanece constante no tempo e independente da velocidade do vento do lado de fora.

Portanto, os coeficientes de pressão interna são influenciados pela capacidade da construção de permitir a passagem de ar, e o índice de permeabilidade de uma parte da construção é definido pela relação entre a área das aberturas e a área total dessa parte. Alguns elementos construtivos, como lajes de concreto reforçado ou protendido, paredes de alvenaria, pedra, tijolo, blocos de concreto, etc., sem portas, janelas ou aberturas, são considerados herméticos. Os demais elementos construtivos são considerados permeáveis devido à presença de aberturas, como juntas entre painéis, frestas em portas e janelas, ventilações em telhados, portas e janelas abertas, chaminés, lanternins, e assim por diante.

2.10 Efeitos Dinâmicos do vento

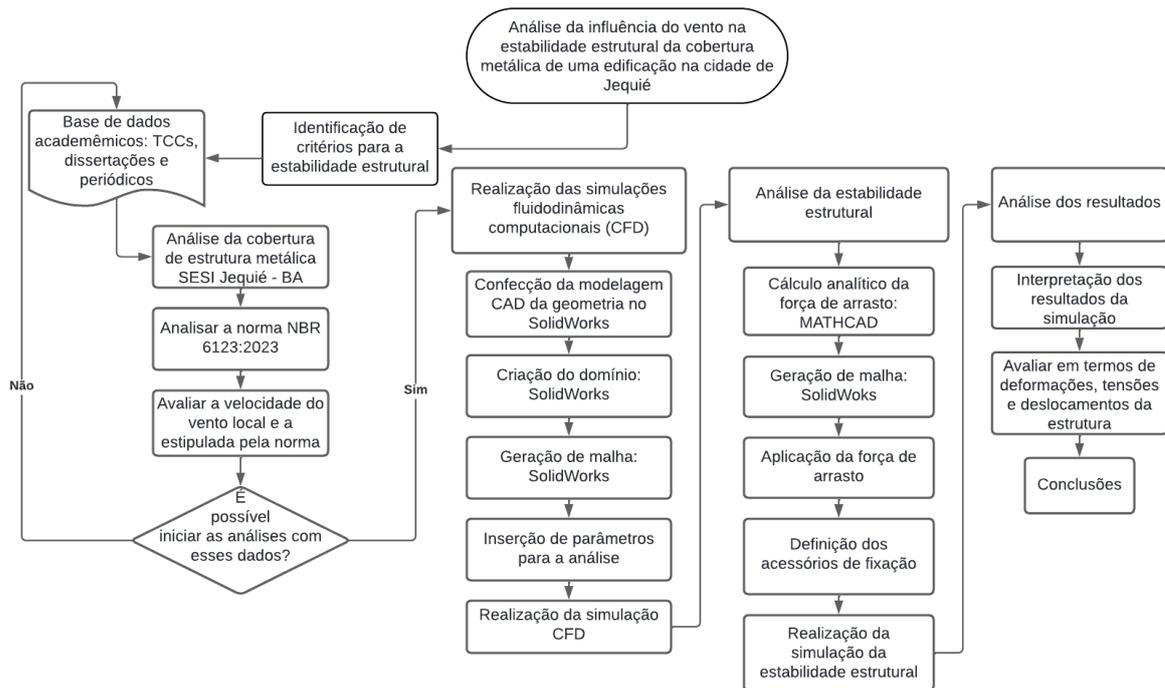
A dinamicidade dos efeitos causados pelo vento é inegável, contudo, em grande parte das estruturas, é possível empregar ações estáticas comparáveis a esses efeitos. Em edificações esbeltas e flexíveis, principalmente aquelas com baixas frequências naturais de vibração ($f < 1,0 H_z$), os efeitos dinâmicos devem ser considerados. Para uma cobertura de estrutura metálica, o efeito dinâmico devido ao vento que pode ser mais relevante é o "Desprendimento de Vórtices"(ou Vórtices de Von Kármán). Isso ocorre principalmente em estruturas altas e afiadas, como as coberturas de edifícios ou pontes metálicas.

Quando o vento atinge uma estrutura metálica, especialmente em suas bordas e cantos afiados, ele pode criar vórtices de Von Kármán, que são remoinhos de ar que se formam na esteira do objeto. Esses vórtices podem causar oscilações e vibrações indesejadas na estrutura, o que pode afetar sua estabilidade e até mesmo levar a danos ao longo do tempo. Para lidar com esse fenômeno, os engenheiros podem incorporar dispositivos de controle de vórtices, como aletas ou protuberâncias, para perturbar a formação dos vórtices e reduzir os efeitos do desprendimento de vórtices. (CHAMBERLAIN, 2021)

3 Metodologia

O fluxograma, apresentado na figura 7, ilustra os passos metodológicos que foram desenvolvidos ao longo desta pesquisa.

Figura 7 – Etapas metodológicas.



Fonte: Autora, 2024.

A primeira etapa metodológica desta pesquisa buscou alcançar o primeiro objetivo específico, que foi a realização das simulações fluidodinâmicas computacionais. Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi utilizado um método sistemático de seleção de palavras-chave com o objetivo de encontrar artigos científicos, teses e dissertações relevantes. As palavras-chave utilizadas incluíram termos como "estruturas metálicas", "resistência estrutural", "incidência do vento em estruturas" e "segurança". Além disso, foi aplicado o operador booleano "AND" para assegurar que todos os termos essenciais fossem incluídos nas buscas. Este método garantiu a obtenção de uma seleção abrangente e precisa de materiais acadêmicos pertinentes ao tema em estudo. Para embasar essa fase, foram utilizados bancos de dados como o Periódico Capes, Scielo, Google Acadêmico que abordam a problemática em questão: a influência do vento sobre estruturas metálicas.

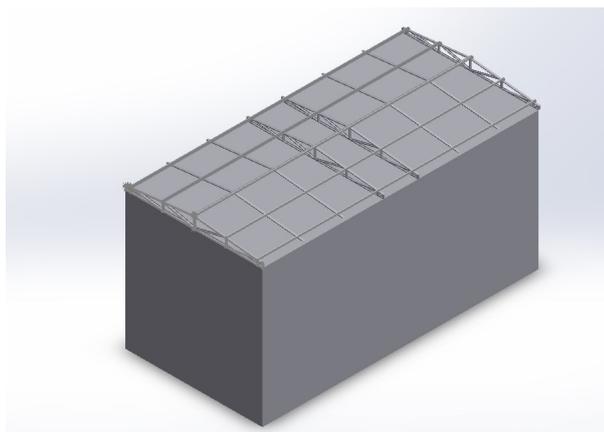
O foco do estudo é a cobertura da estrutura metálica do SESI, localizado na cidade de Jequié (BA). Inicialmente, foi conduzido um minucioso levantamento das características estruturais do projeto da cobertura com dimensões de 7,5m x 15,1m. Para esse projeto,

foi adotado o perfil U e o material escolhido foi o aço ASTM A572 grau 50, reconhecido por sua alta resistência e baixa liga. Como parte integrante deste processo, foram seguidas as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 6123:2023, que desempenha um papel fundamental no contexto do estudo em questão.

Para a determinação da velocidade do vento foram empregados dois parâmetros. A primeira análise foi realizada utilizando a velocidade do vento local, estimada em 10m/s pelo Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) para avaliar o desempenho da estrutura em condições típicas. A segunda análise consistiu nas diretrizes estabelecidas pela norma NBR 6123:2023, baseando-se em medições experimentais conduzidas em torres de monitoramento, a uma altura de 10 metros, em áreas abertas e planas.

A segunda etapa do processo metodológico foi subdividida em cinco partes. A primeira parte consistiu na modelagem da estrutura metálica utilizando o *software* SolidWorks. A modelagem resultante, apresentada na figura 8, reflete o processo realizado:

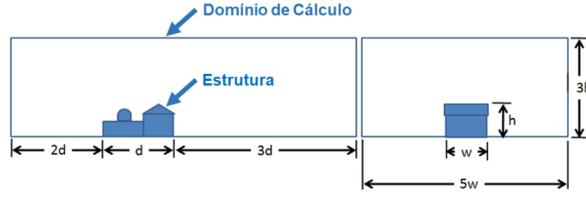
Figura 8 – Vista isométrica do prédio.



Fonte: Autora, 2024.

Em seguida, procedeu-se à definição do domínio de cálculo dentro do próprio *software* SolidWorks, conforme mostrado na figura 9. Para simular fluxos externos em CFD, recorre-se à técnica de inversão de geometria, implementada pelo manual do *software* CFD da *Autodesk*, na qual o objeto permanece fixo enquanto o fluxo é direcionado em sentido oposto. Segundo as diretrizes do *software*, são necessários dois componentes de geometria: o objeto e uma área de cálculo maior. O formato da área de cálculo não é crítico, mas o domínio de cálculo deve ser consideravelmente maior que o objeto. As especificações mínimas, como profundidade, altura e largura para dimensionar o domínio, são definidas pelo manual do *software*.

Figura 9 – Domínio de cálculo.



Fonte: Autodesk CFD, 2022.

Posteriormente, foi realizada a geração da malha, cuja qualidade é crucial para assegurar a precisão dos resultados. O SolidWorks subdivide a geometria em elementos finitos, que se ligam a pontos comuns chamados nós. O processo de subdivisão do modelo em pequenas peças é chamado de geração de malha. Os programas de análises de elementos finitos consideram o modelo como uma rede de elementos conectados por nós. A geração da malha é uma etapa decisiva na análise do projeto. O *software* SolidWorks cria automaticamente uma malha. A malha que se encaixa para esse tipo de análise é a malha de viga que são malhas de componentes estruturais e soldagens com elementos de viga (SolidWorks, 2023).

Após isso, foram definidas as condições de contorno como umidade, velocidade do vento, temperatura e modelo de turbulência, a fim de permitir que o *SolidWorks* conduzisse os cálculos e simulações necessários.

O modelo de turbulência $k-\epsilon$ foi o escolhido para esta análise. Este modelo é amplamente utilizado e comprovado em várias aplicações de engenharia devido à sua robustez, baixo custo computacional e estabilidade numérica em comparação com outros modelos de turbulência mais complicados (VERSTEEG e MALALASEKERA 2007). O modelo de turbulência $K-\epsilon$ é baseado em duas variáveis principais, a primeira delas é a energia cinética turbulenta (k) e a segunda é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (ϵ), como é mostrado nas equações 3.1 e 3.2 respectivamente abaixo:

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \epsilon^2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \quad (8)$$

Onde:

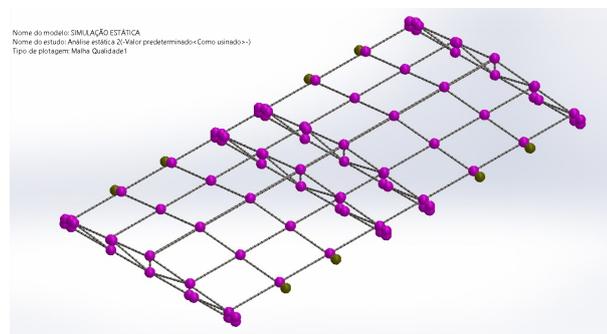
- ρ é a densidade do fluido;
- k é a energia cinética turbulenta por unidade de massa;
- ϵ é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de massa;

- t é o tempo;
- u_i é a componente i da velocidade média do fluido;
- x_i é a coordenada espacial na direção i ;
- x_j é a coordenada espacial na direção j ;
- μ_t é a viscosidade turbulenta ou viscosidade eddy;
- σ_k é o coeficiente de Prandtl para k , uma constante do modelo de turbulência que controla a difusão de k ;
- σ_ε é o coeficiente de Prandtl para ε , uma constante do modelo de turbulência que controla a difusão de ε ;
- $C_{1\varepsilon}$ é a constante do modelo de turbulência associada à produção de ε ;
- $C_{2\varepsilon}$ é a constante do modelo de turbulência associada à destruição de ε ;
- E_{ij} é o tensor das taxas de deformação média (taxa de deformação da componente i em relação à componente j).

Com o objetivo de validar os resultados obtidos a partir das simulações fluidodinâmicas computacionais (CFD), procedeu-se à realização do cálculo analítico da força de arrasto utilizando o *software Mathcad* com o intuito de determinar as tensões e deslocamentos da estrutura metálica quando o vento incide sobre esta.

Para a realização da simulação estática, foi feita a geração de malha. A malha de viga padrão, oferecida pelo próprio *software* SolidWorks, resultou em um total de 1505 nós e 1509 elementos como é possível observar na figura 10 abaixo:

Figura 10 – Malha de viga.



Fonte: Autora, 2024.

Em seguida foi aplicada a força de arrasto para iniciar as análises. A primeira pesquisa utilizou a velocidade estabelecida pelo mapa das isopletras da NBR 6123 de 30 m/s. A

segunda análise foi aplicada a velocidade local da cidade de Jequié-BA de 10m/s, estabelecida pela CPTEC (Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos). Na sequência, foi definido o acessório de fixação como geometria fixa, restringindo todos os graus translacionais de liberdade como zero (WEISS, 2016).

4 Resultados

4.1 Simulação fluidodinâmica

A análise inicial foi realizada considerando o fluxo externo de fluido, no qual o movimento ocorre em torno da geometria definida. Optou-se pelo ar como o fluido para a simulação, adicionando uma umidade local de 98% e uma temperatura de 301,15K. A velocidade do vento local foi estabelecida em 10m/s, conforme os dados do CTPEC (Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos) e a velocidade do vento estabelecida pela NBR6123 e de acordo com o mapa das isopletas foi de 30m/s na região da cidade de Jequié-BA. Ambas as velocidade foi colocada na direção Z negativa, representando a direção de incidência do vento na estrutura.

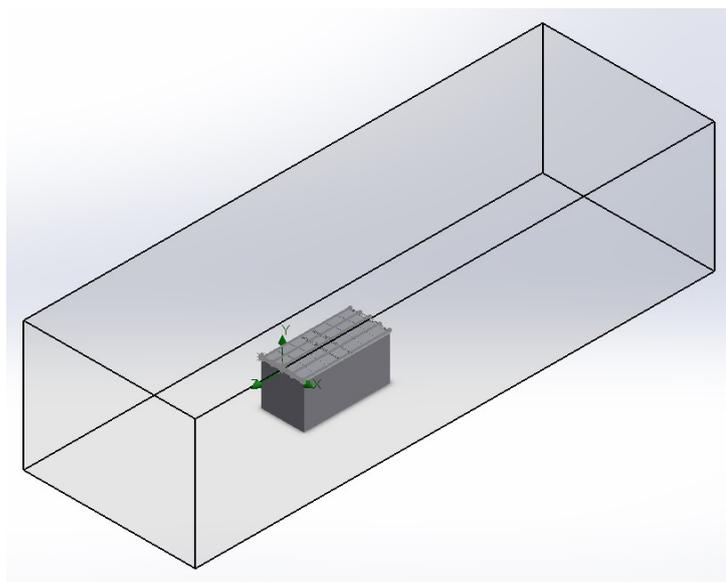
O *SolidWorks* automaticamente gerou o domínio com as dimensões estabelecidas pelo manual do *software* CFD da *Autodesk* que esta representado na figura 11 e foi adaptado seu tamanho de acordo com as medidas da tabela 1 abaixo:

Tabela 5 – Parâmetros utilizados para a geração do domínio

Direções	Tamanhos
X	15,0m
-X	-15,0m
Y	15,2m
-Y	-7.6m
Z	30,2m
-Z	-45,3m

Fonte: Autora, 2024

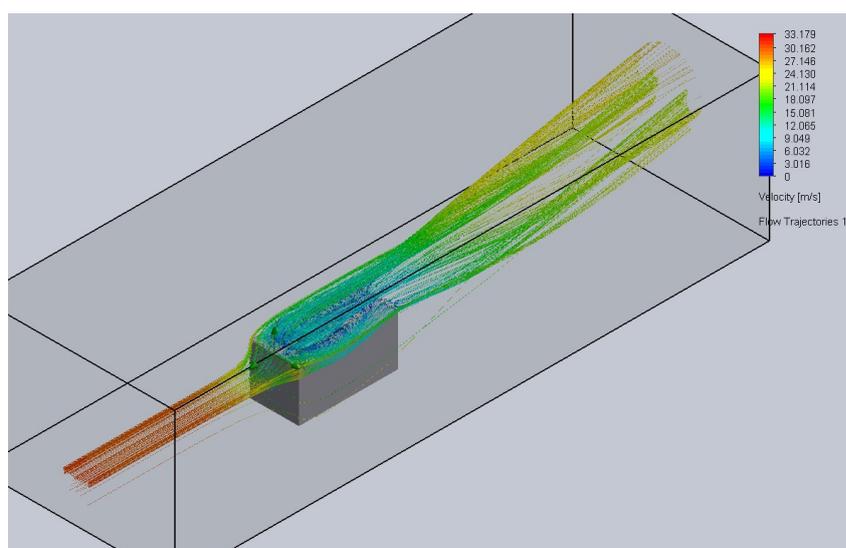
Figura 11 – Domínio.



Fonte: Autora, 2024.

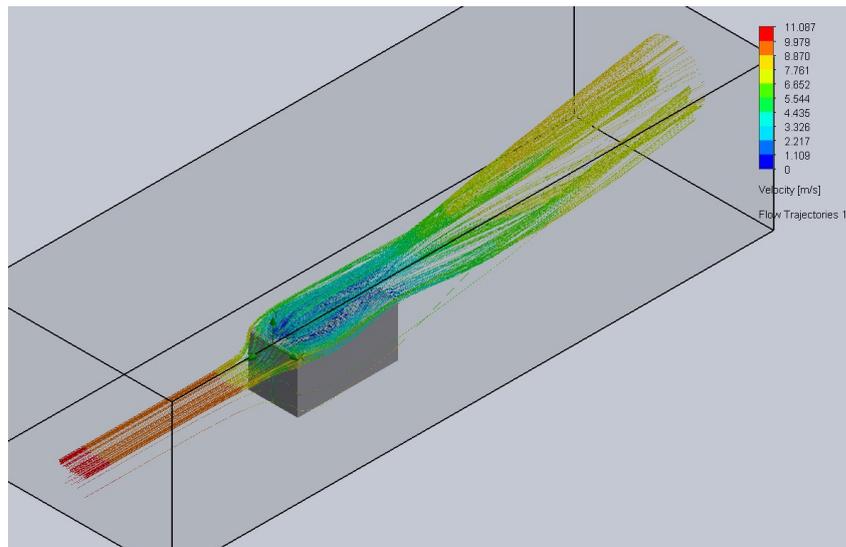
Em seguida, a simulação foi calculada, resultando em 247 iterações. Todas as faces da cobertura expostas ao vento foram selecionadas para analisar como o fluxo de ar interagiria com a estrutura, em uma abordagem análoga à observação em um túnel de vento. As figuras 12 e 13 mostram a velocidade do vento de acordo com a NBR6123 e a velocidade do vento local, segundo a CTPEC, respectivamente, ao atingir o prédio e a cobertura, além do comportamento do mesmo.

Figura 12 – Simulação da velocidade do vento de acordo com a NBR 6123.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 13 – Simulação da velocidade do vento real.



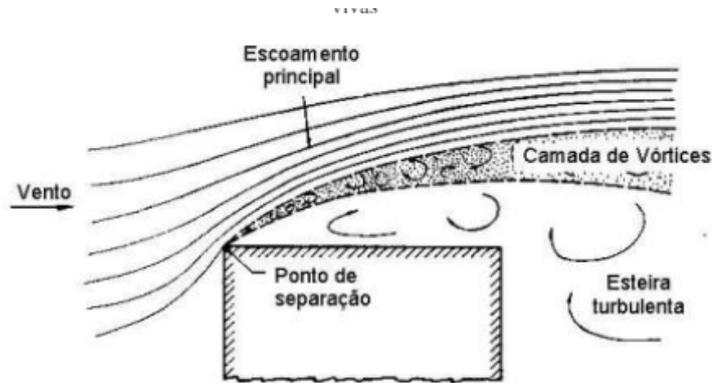
Fonte: Autora, 2024.

Durante o curso de ambos os experimentos, observou-se que o vento, ao atingir a cobertura, experimenta uma desaceleração significativa, levando sua velocidade a se aproximar de zero devido à conversão da energia cinética em pressão. Segundo ÇENGEL e CIMBALA (2015), esse fenômeno é identificado como pressão de estagnação.

A ação do atrito ou das tensões de cisalhamento em fluidos reais resulta em um aumento da força resultante aplicada pelo fluido sobre um sólido, conhecida como força de arrasto de superfície. Essa força é gerada pelas tensões de cisalhamento na superfície do sólido (BRUNETTI, 2008). De forma análoga, a presença de uma estrutura metálica no caminho do fluxo de ar age como uma barreira, criando uma resistência chamada força de arrasto. À medida que o vento contorna a estrutura, sua velocidade diminui gradualmente, demonstrando a influência da resistência aerodinâmica imposta pela estrutura. Assim como as tensões de cisalhamento aumentam a força de arrasto em fluidos reais, a resistência aerodinâmica causada pela estrutura metálica resulta na desaceleração do fluxo de ar ao seu redor.

À medida que o vento contorna a estrutura metálica, ele não é capaz de seguir um padrão de fluxo contínuo, resultando em uma separação do fluxo de ar e a formação de zonas de baixa pressão. Essa diferença de pressão desencadeia a formação de redemoinhos, conhecidos como vórtices, como mostra a figura 14. A presença desses redemoinhos indica a existência de uma região de alta turbulência, onde o fluxo de ar se caracteriza por sua desorganização e pela presença de múltiplas rotações.

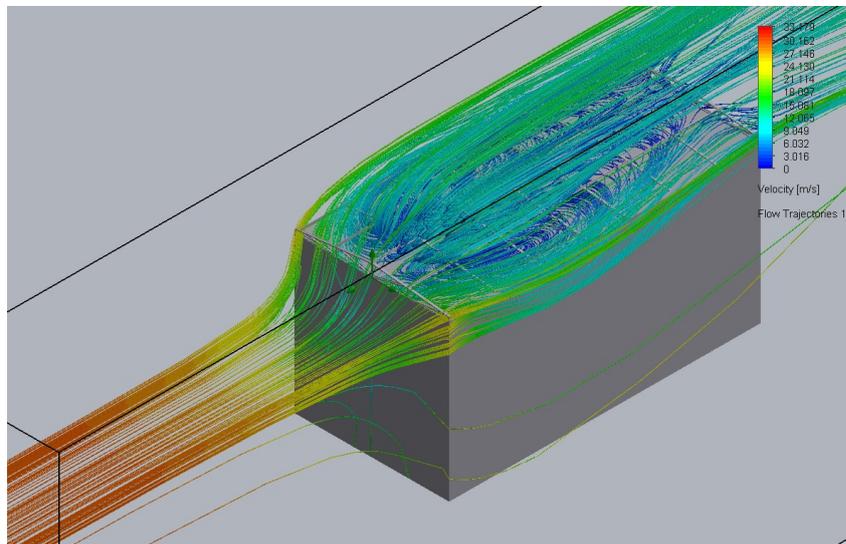
Figura 14 – escoamento de ar bidimensional sobre uma edificação com arestas vivas.



Fonte: DAVENPORT; ISYUMOV; FIELD (1968).

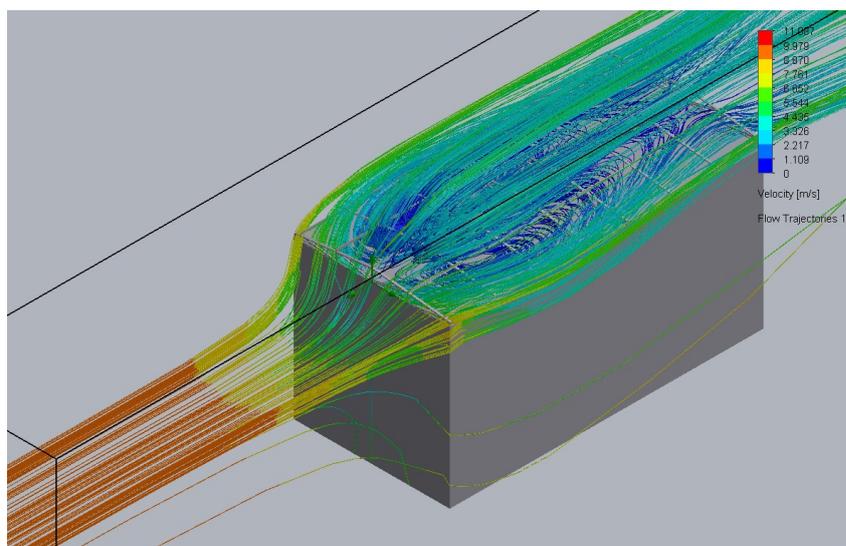
A camada de vórtices é caracterizada por um fluxo muito turbulento, contendo uma quantidade significativa de energia em uma frequência dominante relacionada ao desprendimento de vórtices, e um gradiente acentuado de velocidades entre o fluxo principal e a velocidade mais baixa da esteira (BORGES, 2020). As figura 15 e 16 abaixo ilustra esse fenômeno nas simulações realizadas:

Figura 15 – Análise da formação de vórtices de acordo com a velocidade da NBR6123.



Fonte: Autora, 2024.

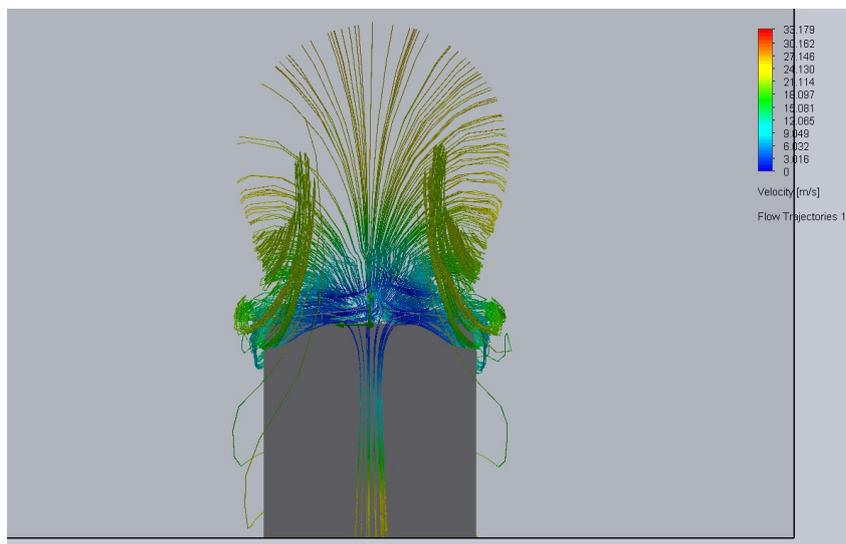
Figura 16 – Análise da formação de vórtices de acordo com a velocidade de real.



Fonte: Autora, 2024.

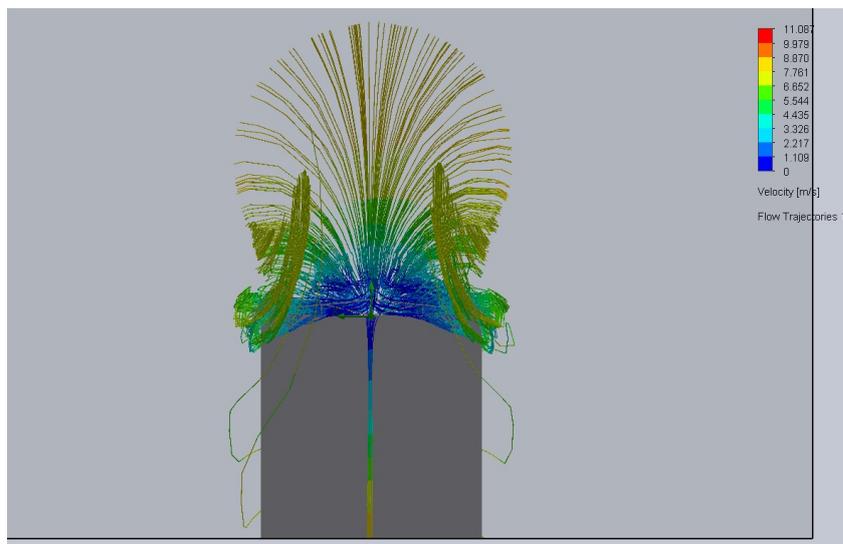
Ao escoar pela estrutura, o vento emerge de forma desordenada, refletindo os efeitos da turbulência gerada pela interação entre o vento e a estrutura metálica como pode ser visto nas figuras 17 e 18.

Figura 17 – Análise dos efeitos da turbulência na velocidade do vento conforme a NBR 6123.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 18 – Análise dos efeitos da turbulência na velocidade do vento real.



Fonte: Autora, 2024.

4.2 Simulação da Estabilidade Estrutural

4.2.1 Resultado analítico

A força de arrasto, que é a força resistente ao movimento de um objeto em um meio fluido, possibilita encontrar a força do fluido (ar) incidindo na estrutura metálica. Para encontrar o valor da força de arrasto, foram realizadas algumas análises. De acordo com a NBR 6123, a força devida ao vento pode ser calculada como representado na equação 9:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho A V_k^2 C_a \quad (9)$$

Onde a massa específica do ar é igual a $\rho = 1,226 \text{ kg/m}^3$. A área da incidência do vento é denotada por A , a velocidade característica do vento é representada por V_k , e o coeficiente de arrasto é indicado por C_a .

Com o auxílio da NBR 6123 e do *software* Mathcad, foi possível calcular o valor da velocidade característica do vento utilizando a equação 3 e o coeficiente de arrasto, obtendo os valores da tabela 6, de acordo com as respectivas velocidades básicas do vento. A velocidade básica do vento é uma referência que representa a intensidade do vento em uma localização específica. A velocidade característica do vento, por sua vez, é calculada a partir da velocidade básica do vento e leva em consideração fatores como a topografia e as características locais do terreno.

Tabela 6 – Valores da Velocidade Característica e Coeficiente de Arrasto

Velocidade do básica do vento	Velocidade característica do vento	Coeficiente de arrasto
10 m/s	14,6874 m/s	0,8
30 m/s	44,0624 m/s	0,8

Fonte: Autora, 2024

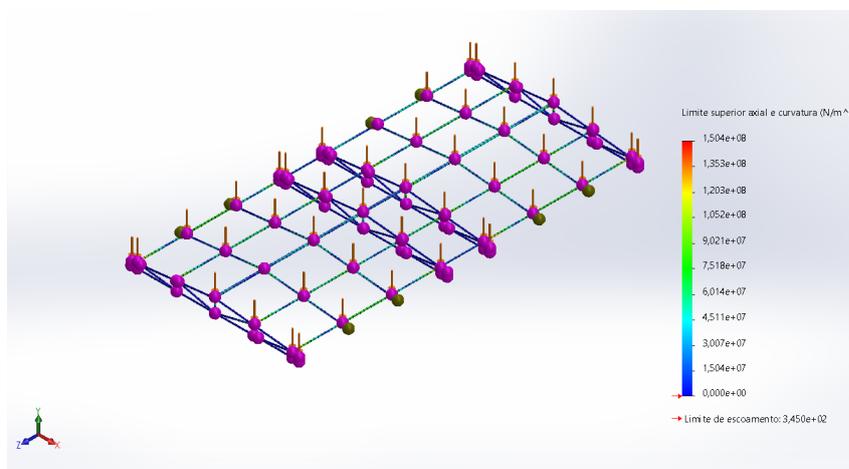
Com os valores obtidos, foi possível determinar a força de arrasto para diferentes velocidades do vento. Para a velocidade real de 10 m/s , de acordo com CTPEC, a força de arrasto foi de 2795,28 N. Já para a velocidade de 30 m/s , estabelecida pelo mapa das isopletas, a força de arrasto foi de 25157,52 N. Esses valores foram utilizados na simulação de estabilidade estrutural.

4.2.2 Resultados obtidos pela análise da estabilidade estrutural

4.2.2.1 Análise de tensão

A análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) permite a simulação do comportamento da estrutura sob diferentes condições de carregamento e posições de operação, dividindo o modelo em pequenos elementos finitos interconectados. Esse método numérico possibilita a análise detalhada de tensões e deslocamentos, considerando as propriedades específicas dos materiais e as características geométricas da estrutura (SILVA, 2023). A análise de tensões de Von Mises utilizada para identificar se as tensões máximas excedem a resistência do material (MORALES, 2013), mostra que a tensão máxima da simulação com a velocidade do vento local é de 150,4 MPa como esta ilustrado na imagem 18 abaixo:

Figura 19 – Tensões estruturais sob condições de velocidade real do vento

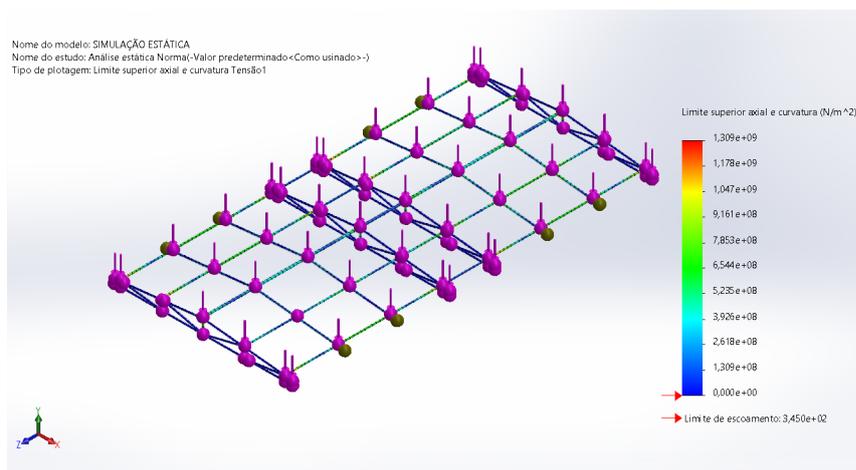


Fonte: Autora, 2024.

Segundo a NBR 6123, para que uma estrutura seja considerada segura, ela deve ser projetada de forma que a tensão máxima causada pelo vento (tensão de escoamento) seja menor que a tensão admissível do material. A tensão admissível é geralmente calculada com base na tensão de escoamento do material dividida por um fator de segurança, o que garante que a estrutura não falhe sob as cargas previstas. No caso da estrutura metálica deste projeto, que utiliza aço ASTM A572 grau 50, o limite de escoamento é de 345 MPa. Para este projeto, o coeficiente de segurança adotado é 1,4 (NBR: 14762:2010). Com isso, a tensão admissível é aproximadamente 246,42 MPa. Portanto, concluímos que a estrutura atende às diretrizes estabelecidas pela norma, uma vez que a tensão admissível é superior à tensão de escoamento máxima calculada devido à ação do vento.

As figura 19 mostra a tensão quando a força incide sobre a estrutura com uma velocidade de 30 m/s, baseada no mapa das isopletas:

Figura 20 – Análise de tensão na estrutura de acordo com a NBR6123



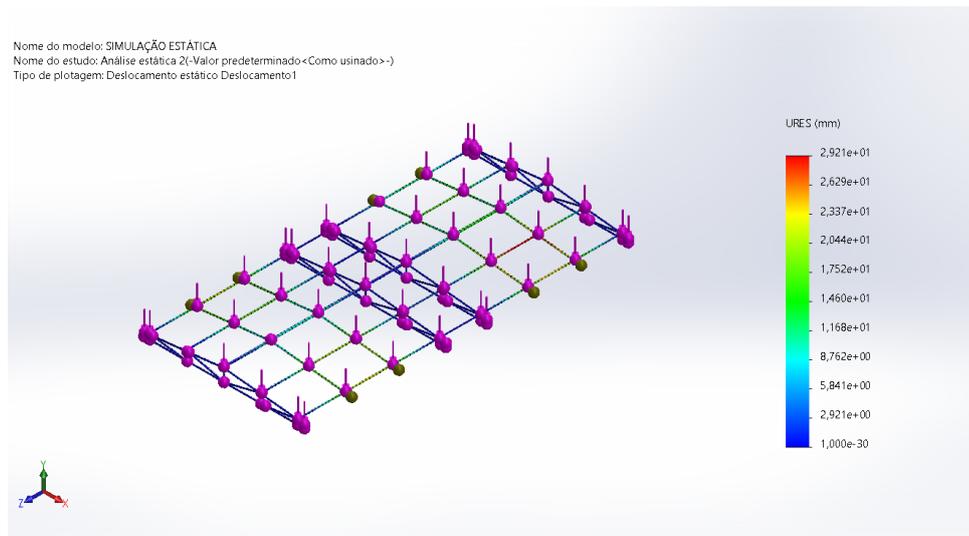
Fonte: Autora, 2024.

Diferentemente do caso anterior, a tensão de escoamento máxima causada pela ação do vento sobre a estrutura é de 1309 MPa, valor que supera a tensão admissível do aço ASTM A572 grau 50. Portanto, é possível concluir que, se a velocidade do vento atingir 30 m/s em Jequié, a cobertura da estrutura metálica não será capaz de suportar essa carga e estará sujeita ao colapso.

4.2.2.2 Análise do Deslocamento

A análise dos deslocamentos foi realizada através da deformação da estrutura quando a força de arrasto é aplicada. Na figura 20 abaixo, é ilustrado o deslocamento da estrutura em função da velocidade real, considerando uma força de arrasto de 2795,28 N:

Figura 21 – Deslocamento da estrutura sob condições de velocidade Real

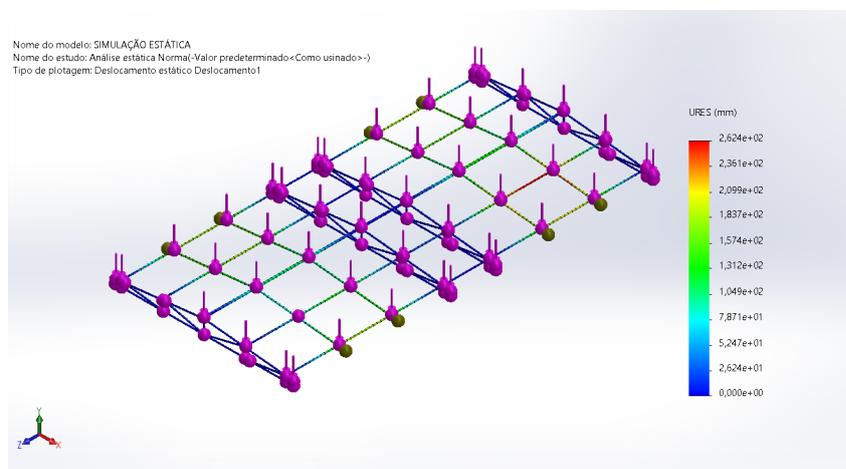


Fonte: Autora, 2024.

De acordo com o estudo realizado, foi possível perceber que o deslocamento máximo obtido foi de 29,21 mm. Neste caso, embora o deslocamento tenha sido mínimo, é possível reduzi-lo ainda mais com a inclusão de contraventamentos que são elementos estruturais que fornecem suporte adicional e aumentam a estabilidade das estruturas, especialmente em estruturas metálicas, atuando principalmente para resistir a forças horizontais, como as causadas pelo vento, e ajudam a minimizar o deslocamento e a deformação da estrutura. Com a inclusão de contraventamentos, é possível distribuir melhor as cargas e reduzir o deslocamento máximo, melhorando a segurança e a eficiência estrutural.

A figura 21 abaixo mostra o deslocamento máximo de 262 mm da estrutura de acordo com a velocidade básica do vento sugerida pela NBR6123:

Figura 22 – Deslocamento da estrutura de acordo com a NBR6123



Fonte: Autora, 2024.

De acordo com estudos baseados na NBR 6123:2023, uma estrutura com um deslocamento de quase 3 cm pode não ser adequada para o conforto humano, resultando em desconforto para os usuários.

Em conclusão, foi possível observar em ambas as análises, tanto de tensão quanto de deslocamento, que, embora as forças aplicadas sejam diferentes, as terças e treliças permanecem inalteradas. Esses componentes exibem comportamentos estruturais distintos, mas ambos desempenham um papel crucial no desempenho e na integridade da cobertura.

As treliças, compostas por elementos lineares interligados por nós triangulares, se destacam pela eficiência na transferência de cargas, principalmente por meio de esforços axiais (VIEIRA, 2020). Segundo Díaz et al. (2017), essa configuração minimiza a flexão e o cisalhamento, resultando em deslocamentos e tensões relativamente baixos, como mostrado nos resultados das simulações. A geometria triangular rígida e a distribuição uniforme de cargas nos nós contribuem para a baixa deformabilidade das treliças sob cargas verticais e horizontais.

Em contrapartida, as terças suportam as cargas das telhas e as transferem para as treliças. No entanto, diferentemente das treliças, as terças estão sujeitas a flexão, cisalhamento e torção, principalmente sob a ação do vento (STEIN, 2019).

5 Conclusão

A análise da influência do vento na estabilidade estrutural da cobertura metálica da edificação em Jequié, realizada por meio da fluidodinâmica computacional (CFD), revelou resultados altamente significativos em termos de resistência e segurança.

Os resultados obtidos demonstraram que a estrutura metálica do prédio do SESI em Jequié-BA possui uma resistência eficaz aos ventos típicos da região. As tensões provocadas pelo vento permanecem dentro dos limites seguros, assegurando a integridade e longevidade da edificação. Além disso, o deslocamento da estrutura, mesmo sem contraventamento, mostrou-se seguro. No entanto, a adição de contraventamento poderia aumentar ainda mais a segurança da edificação. Entretanto, a estrutura não conseguiu suportar a velocidade do vento estipulada pela norma NBR 6123:2023. Isso, porém, não significa que a norma não seja eficaz. A velocidade estabelecida pelo mapa das isopletas é usada como um limite de velocidade para a região, mas não reflete necessariamente a resistência das estruturas dessa área.

A utilização da CFD revelou-se uma ferramenta poderosa na análise da influência do vento, oferecendo uma alternativa mais econômica e eficiente em comparação aos testes em túneis de vento, que demandam altos investimentos e tempo. A simulação computacional permitiu uma avaliação detalhada do comportamento da estrutura sob diferentes intensidades de vento, destacando-se como uma metodologia viável e confiável para o desenvolvimento de projetos de edificações metálicas.

Este trabalho contribui significativamente para o campo da engenharia ao evidenciar a importância de considerar os efeitos do vento desde as fases iniciais do projeto, assegurando que as estruturas metálicas sejam projetadas para resistir às condições climáticas previstas, conforme as diretrizes da norma NBR 6123:2023. Além disso, reforça a viabilidade da CFD como uma alternativa eficaz aos métodos tradicionais de teste, ampliando as possibilidades de análise e otimização estrutural.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se realizar simulações considerando a incidência do vento em outras direções, visando entender o comportamento da estrutura sob diferentes condições. Além disso, é sugerido utilizar uma maior variedade de velocidades do vento para determinar até que ponto a estrutura pode suportar as cargas impostas, identificando assim a velocidade máxima que a estrutura pode suportar sem comprometer sua estabilidade e segurança.

Referências

- AGUILERA, J. R. F. *Estruturas treliçadas esbeltas sob ação do vento*. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC – Rio. Rio de Janeiro, 2007. 119p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro, 2023.
- BORGES, Gustavo Schneider. *Estudo experimental em túnel de vento do campo de velocidades no topo de uma edificação para análise do potencial de geração de energia eólica*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Matemática e Estatística, 2019. 100 f.
- BRUNETTI, Franco. *Mecânica dos fluidos*. 2^a ed. São Paulo: Pearsom, 2008.
- CARDOSO, D. G. P.; BORCHARDT K.; MARQUES R. L. *Análise de frequência em pontes mistas*. 2011. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) na Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo.
- CARVALHO, Loyane Nunes Martins. *ANÁLISE DE GALPÃO EM ESTRUTURA METÁLICA: Avaliação das ações do vento típicas para as diversas regiões brasileiras*. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - UniCEUB - Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2017.
- CASTRO, Adriana Almeida. *Análise do uso das estruturas de aço em edificações de habitacionais de interesse social*. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- ÇENGEL. Yunus A. *Mecânica dos fluidos fundamentos e aplicações*. 3. ed. Porto Alegre: AMGH editora, 2015.
- DIAZ, Antonio Alves; MUNAIAR NETO, Jorge; HANAI, João Bento de; SALES, José Jairo de; BARBATO, Roberto L. A.; MIOTTO, José Luiz. *Introdução aos sistemas estruturais*. 2017. [PDF] Disponível em: <file:///C:/Users/babig/Downloads/20Antonio%20Alves%20Dias%20et%20al%20-%20Introdu%C3%A7%C3%A3o%20aos%20sistemas%20estruturais.pdf>. Acesso em: 24 de julho de 2024.
- FRANKE, J.; HIRSCH, C.; JENSEN, A. G.; KRUS, H. W.; SCHATZMANN, M.; WESTBURY, P. S.; MILHAS, S. D.; WISSE, J. A.; WRIGHT, N. G. (2004) *Recommendations on the use of CFD in wind engineering*. Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics.

- GILL, Antônio Carlos. *Método e técnicas de pesquisa social*. 5^a Ed. São Paulo: Atlas, 1999.
- GONÇALVES, Roberto M.; SALES, José Jairo de; MALITE, Maximiliano; NETO, Jorge Munaiar. *Ação do vento em edificações: teoria e exemplos*. 1^a edição – São Carlos: SET/EESC/USP, 2004.
- LIMA, F. A. R.; SANTOS, R. S. *Análise da ação do vento na estrutura de edificações*. 2019. Trabalho de conclusão (TCC) - UNIEVANGÉLICA, Anápolis - GO.
- LIU, M. et al. *Evaluation of wind effects on a large span retractable roof stadium by wind tunnel experiment and numerical simulation*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 179, p. 39–57, Aug. 2018.
- LOREDO-SOUZA, Acir M.; NÚÑEZ, Gustavo J. Z.; ROCHA, Marcelo M. *Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico*. Porto Alegre: UFRGS, 2012. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/det/index.php/det/article/view/69/45>>. Acesso em: 24 de novembro 2023.
- MATOS, Rafael Carrijo Barreto *SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTOS EM EDIFÍCIOS DE ESTRUTURA METÁLICA*. Brasília: FATECS, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/235/6404/1/21016114.pdf>>. Acesso em: 24 de Julho 2024.
- MAKOWSKI, D. G. *Ação do Vento em Coberturas Isoladas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- MORALES, Eduardo Domingo. *Análise de critérios de falha em materiais dúcteis: um estudo numérico e experimental* / E.D. Morales. – versão corr. – São Paulo, 2013.
- NEGRI, Jennifer de Fátima et al. *Efeitos de vizinhança nas ações do vento em edifícios com cobertura em duas águas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- NORTON, Robert L. *Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada*. 4^a edição. Bookman, 2013.
- PITTA, J. A. A. *Ações devidas ao vento em edificações*. São Carlos: EdUFSCar, 2024. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=sen3EAAAQBAJ>>. Acesso em: [02 de agosto de 2024].
- PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. *Estruturas de Aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008*. 8^a Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SCHLICHTING, W. *A Relevância do Uso de Estruturas de Aço em Obras Habitacionais Populares*. Disponível em: <<https://repositorio-api.animaeducacao.com.br/server/api/core/bitstreams/bb015c17-00a9-42e3-a4a1-d162d44bebc7/content>>.

SILVA, Carlos Eduardo Pereira da. *Controle de vibração de sistemas por metamaterial inteligente: abordagem pelo método dos elementos finitos*. 2023. 81 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

SOLIDWORKS. *Tipos de elementos*. Disponível em: <<https://help.solidworks.com/2023/portuguese-brazilian/solidworks/cworks/c_element_types.htm>>. Acesso em: 24 de maio de 2024.

STEIN, Juliana Aparecida de Almeida. *Análise teórica e experimental de treliças metálicas planas do tipo steel joist*. 2019. [PDF] Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC. Disponível em: <<https://repositorio.unisc.br/jspui/bitstream/11624/2488/1/Juliana%20Aparecida%20de%20Almeida%20Stein.pdf>>. Acesso em: 24 de julho de 2024.

TAKANO, Michele Ogawa. *Análise numérica das ações do vento em galpões com cobertura de vãos múltiplos em forma de arco*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, 2019.

VANIN, D. D. *Resposta dinâmica de edifícios altos frente à ação do vento: comparação de técnicas experimentais em túnel de vento*. 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 2011.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. 2. ed. Londres: Pearson, 2007.

VIEIRA, Lucas Chagas. *A utilização de treliças na construção civil*. 2020. 28 f. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Gestão e Negócios, Engenharia Civil e Ambiental, Taubaté, 2020. Disponível em: <<http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/5131/1/Lucas%20Chagas%20Vieira%20274943.pdf>>. Acesso em: 24 de julho de 2024.

WEISS, Gabriel Hecker Evangelho. *Análise Computacional e Experimental de Rigidez à Torção de um Chassi de Fórmula SAE*. 2016. Projeto de Graduação (Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

WILCOX, David C. *Turbulence modeling for CFD*. 3. ed. San Diego: DCW Industries, 2006.

ZIENKIEWICZ, O. C. *The finite element method in structural and continuum mechanics*. 1. ed. Vol. 1. Berkeley, Califórnia: Butterworth-Heinemann, 2000.