

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ITALO FERNANDO ONIBENI PERES

ESTUDO DE AÇÕES DO VENTO EM COBERTURAS PLANAS ISOLADAS

PATO BRANCO

2023

ITALO FERNANDO ONIBENI PERES

ESTUDO DE AÇÕES DO VENTO EM COBERTURAS PLANAS ISOLADAS
Study of wind actions on insulated flat roofs

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel/Licenciado em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador (a): Diego Rizzotto Rossetto

PATO BRANCO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ITALO FERNANDO ONIBENI PERES

ESTUDO DE AÇÕES DO VENTO EM COBERTURAS PLANAS ISOLADAS

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação/
Especialização apresentado como requisito para
obtenção do título de Bacharel/Licenciado em
Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

14 de junho de 2023

Fábio Rodrigues Mandello Rodrigues
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Diego Rizzotto Rossetto
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Joviano Janjar Casarin
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2023

Dedico este trabalho à minha família e amigos que
Obtive durante minha graduação

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família e minha noiva por ter me apoiado por todo esse tempo durante a graduação

Eu denomino meu campo de Gestão do Conhecimento, mas você não pode gerenciar conhecimento. Ninguém pode. O que você pode fazer, o que a empresa pode fazer é gerenciar o ambiente que otimize o conhecimento.
(DAVENPORT; PRUSAK, 2012).

RESUMO

Durante o processo de dimensionamento estrutural de edificações, um dos maiores desafios consiste na determinação dos esforços decorrentes do escoamento de ar sobre a estrutura. Entretanto, a geometria da estrutura e disponibilidade de obstáculos ao seu redor causam uma variação dos gradientes de pressão a qual a estrutura está submetida. A cobertura plana isolada sendo comumente utilizada para edificação de postos de abastecimento de combustível, possui uma abrangência limitada em referência a seu dimensionamento, e mediante a recorrência de sinistros deste tipo de estrutura se torna cada vez maior, viu-se a oportunidade de se realizar este estudo que possui como principal finalidade teórica analisar o escoamento fluidodinâmico do ar e identificar a magnitude da variação de gradientes de pressão em função de diferentes cenários. Para auxiliar a obtenção dos gradientes de pressão, serão utilizadas ferramentas de simulações numéricas e programas de modelamento estruturais. As análises serão feitas utilizando uma geometria simples de estrutura e variando a direção do escoamento e o posicionamento de possíveis obstáculos. Os valores de pressão obtidos por meio das simulações numéricas efetuadas pelo software ANSYS, foram comparadas entre si para determinação de qual o melhor e o pior caso. Com os resultados obtidos, notou-se a influência da incidência do escoamento com a variação do gradiente de pressão. Em casos da presença de um ou mais obstáculos, a variação pode tornar-se ainda maior.

Palavras-chaves: gradiente de pressão; simulação numérica; coberturas planas.

ABSTRACT

During the process of structural design of buildings, one of the biggest challenges is to determine the efforts arising from the air flow over the structure. However, the geometry of the structure and the availability of obstacles around it cause a variation in the pressure gradients to which the structure is subjected. The isolated flat roof, which is commonly used for the construction of fueling stations, has a limited scope in terms of its dimensioning, and due to the recurrence of claims of this type of structure becoming increasingly larger, the opportunity to carry out this project was seen. Study whose main theoretical purpose is to analyze the fluid dynamic flow of air and to identify the magnitude of the variation in pressure gradients as a function of different scenarios. To help obtain pressure gradients, numerical simulation tools and structural modeling programs will be used. The analyzes will be made using a simple structure geometry and varying the flow direction and the positioning of possible obstacles. The internal pressure values obtained through numerical simulations carried out by the ANSYS software were compared to each other to determine which was the best and worst case. With the obtained results, it was noticed the influence of the incidence of the flow with the variation of the pressure gradient. In cases where one or more obstacles are present, the variation can become even bigger.

keywords: pressure gradient; numerical simulation; insulated roofing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Postos de serviço.....	16
Figura 2 - Posto de serviço em Santa Maria/RS	17
Figura 3 - Contorno de um tubo de correte de um fluido	20
Figura 4 - Turbulência causada por objeto	22
Figura 5 - Fluxograma seguido no trabalho.....	26
Figura 6 - Vista frontal da estrutura (Ilustrativo)	27
Figura 7 - Vista lateral da estrutura (Ilustrativo)	27
Figura 8 - Vista superior do obstáculo (Ilustrativo).....	28
Figura 9 - Vista Lateral do obstáculo (Ilustrativo)	28
Figura 10 - Casos a serem estudados	29
Figura 11 - direção do vento caso 1	29
Figura 12 - direção do vento caso 2	29
Figura 13 - direção do vento caso 3	30
Figura 14 - direção do vento caso 4	30
Figura 15 - direção do vento caso 5	30
Figura 16 - direção do vento caso 6	31
Figura 17 - configurações de elemento	32
Figura 18 - isopletras de velocidade básica V_0 (m/s).....	38
Figura 19 - Tabela com valores do fator S_2	39
Figura 20 - valores mínimos do fator estático S_3	40
Figura 21 - Volume de controle.....	41
Figura 22 - Gradiente de pressão interna caso 1.....	44
Figura 23 - Gradiente de pressão interna caso 2.....	45
Figura 24 - Gradiente de pressão interna caso 3.....	46
Figura 25 - Gradiente de pressão interna caso 4.....	47
Figura 26 - Gradiente de pressão interna caso 5.....	48
Figura 27 - Gradiente de pressão interna caso 6.....	49
Figura 28 - Variação do gradiente de pressão em cada caso.....	49
Figura 29 - Gradiente de pressão ao redor da estrutura caso 1.....	50
Figura 30 - Linhas de escoamento de velocidade do caso 1.....	50
Figura 31 - Gradiente de pressão ao redor da estrutura caso 2.....	51
Figura 32 - Linhas de escoamento de velocidade do escoamento caso 2.....	51
Figura 33 - Gradiente de pressão ao redor da estrutura caso 3.....	52
Figura 34 - Linhas de escoamento de velocidade do escoamento caso 3.....	52
Figura 35 - Gradiente de pressão ao redor da estrutura caso 4.....	53
Figura 36 - Linhas de escoamento de velocidade do escoamento caso 4.....	53
Figura 37 - Gradiente de pressão ao redor da estrutura caso 5.....	54
Figura 38 - Linhas de escoamento de velocidade do escoamento caso 5.....	54
Figura 39 - Gradiente de pressão ao redor da estrutura caso 6.....	55
Figura 40 - Linhas de escoamento de velocidade do escoamento caso 6.....	55

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1 - Estudo de refinamento de malha	33
Gráfico 2 - Número de elementos x qualidade da malha 1	34
Gráfico 3 - Número de elementos x qualidade da malha 2	35
Gráfico 4 - Número de elementos x qualidade da malha 3	36
Gráfico 5 - Número de elementos x qualidade da malha 4	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valor máximo de y^+ por cada modelo de simulação	43
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Massa específica	kg/m ³
A	Área transversal	m ²
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	-
V	Velocidade	m/s
t	Tempo	s
ν	Viscosidade dinâmica	m ² /s
L	Medida de referência	m
V_k	Velocidade característica do vento	m/s
S_1	Fator topográfico	-
S_2	Fator rugosidade de terreno	-
S_1	Fator estático	-
p	Pressão dinâmica	Pa
p_0	Pressão estática	atm
M	Escala mach de velocidade	-
γ_{ar}	Densidade do ar	kg/m ³
P	Pressão	Pa
V	Velocidade	m/s
ΔP	Varição de pressão	Pa
V	Volume	m ³

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo principal	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Justificativa	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Conceitos relevantes	19
2.1.1 Teoria da conservação de massa	19
2.1.2 Teorema de bernoulli.....	20
2.2 Escoamento fluidodinâmico	21
2.2.1 Aerodinâmica da estrutura	22
2.3 Ação do vento nas edificações	23
2.4 Análise computacional pelo método de volumes finitos	23
3 METODOLOGIA	26
3.1 Fluxograma	26
3.2 Definição de geometria da estrutura	26
3.3 Forma e posicionamento de obstáculo	27
3.4 Geometria do volume de controle	31
3.5 Malha de cálculo e tipo de elemento	31
3.6 Condições de contorno físicas para simulação	37
4 ANÁLISE DE RESULTADOS	43
4.1 Parâmetros de análise fluido dinâmica	43
4.2 Resultado dos gradientes de pressão	43
4.2.1 Caso 1	43
4.2.2 Caso 2	44
4.2.3 Caso 3	45
4.2.4 Caso 4	46
4.2.5 Caso 5	47
4.2.5 Caso 6	48
4.3 Resultado de pressão e velocidade ao redor da estrutura	50
4.3.1 Caso 1	50
4.3.2 Caso 2	51
4.3.3 Caso 3	52

4.3.4 Caso 4.....	53
4.3.5 Caso 5.....	54
4.3.6 Caso 6.....	55
5 CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia tornou-se possível o desenvolvimento de estruturas, que utilizam materiais mais leves do que o concreto, porém igualmente resistentes e menos inflamáveis que a madeira. Sendo assim, estudos levaram à criação e desenvolvimento de um novo tipo de estrutura: a estrutura metálica.

Como o nome já sugere o material utilizado em sua construção é puramente metal, sendo que existem indicadores de sua utilização em escalas industriais a partir do ano de 1750. Já no Brasil, o início de sua fabricação ocorreu no ano de 1812 com a implementação de grandes siderúrgicas possibilitando a fabricação de perfis metálicos em larga escala.

Atualmente o uso desse tipo de estrutura é bem comum é recomendado, sendo utilizado tanto em meios comerciais quanto residenciais. Isso é possível pela variedade disponível atualmente, a fabricação e implementação desta. Dentre os tipos de estruturas, se destacam pontes em geral, galpões e seus diferentes tipos de coberturas como: cobertura em uma água, coberturas em duas águas e cobertura em arco. Também é comum a construção de coberturas isoladas em estruturas metálicas, que está sendo muito utilizada em postos de serviços, conforme ilustrado na Figura 1:

Figura 1 - Postos de serviço



Fonte: Brasil postos (2022)

Coberturas isoladas se caracterizam pela particularidade de que em sua estrutura não possui fechamentos laterais ou paredes. Desta forma, a estrutura é composta somente por sua cobertura, podendo ser de uma água, duas águas, em

arco e até mesmo plana. Suas colunas são as que sustentam a cobertura propriamente dita. Para coberturas isoladas, o vetor velocidade do vento em um dado instante, pode ter uma direção inclinada no plano vertical pela composição da velocidade média, horizontal, juntamente com a componente vertical da turbulência. Assim, para intervalos de tempo de alguns segundos, o vento pode soprar com uma inclinação que se situa entre $+10^\circ$ e -10° . Estes limites podem inclusive ser ultrapassados em temporais com turbulência muito elevada (Blessmann, 1990).

O cálculo de esforços do vento em cobertas planas isolada é pouco abordado em nossa norma regulamentadora, levando em conta algumas aproximações distanciando o cálculo teórico do que acontece na prática, logo torna-se comum imagens como a Figura 2 serem vistas ao longo das rodovias nacionais e estaduais.

Figura 2 - Posto de serviço em Santa Maria/RS



Fonte: Blessmann (2001)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo deste trabalho consiste em analisar a variação dos gradientes de pressão em uma cobertura plana isolada quando há presença de um obstáculo próximo. Pretende-se investigar como o posicionamento do obstáculo afeta os gradientes de pressão na superfície da cobertura.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que seja possível alcançar o objetivo principal os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados.

- Efetuar uma modelagem computacional e dimensionamento de uma cobertura isolada plana semelhante a uma estrutura real;
- Aplicar as condições de contorno para que seja possível a simulação mediante método de elementos finitos;
- Analisar os resultados obtidos e identificar a influência do posicionamento do obstáculo;

1.3 Justificativa

Este trabalho tem como justificar a importância de identificar a variação de pressão em coberturas isoladas quando há a presença de um obstáculo próximo. A segurança e a estabilidade das estruturas são aspectos fundamentais, e compreender os pontos críticos de esforço desempenha um papel essencial na concepção e no projeto de estrutura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos relevantes

Para total entendimento do trabalho e necessário o conhecimento de alguns conceitos previamente definidos, tais como o Teorema de conservação de Massa, o Teorema de Bernoulli e por fim o conceito de gradiente de pressão e gradientes de velocidade.

2.1.1 Teoria da conservação de massa

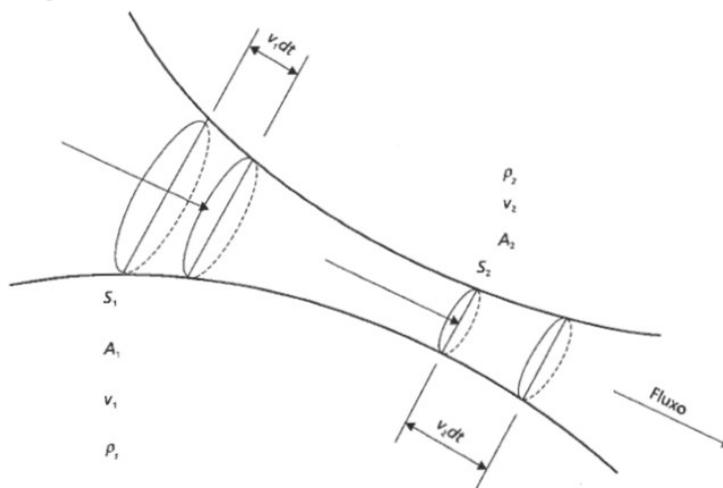
Do ponto de vista do escoamento de ar em torno de uma edificação, o vento pode ser considerado um fluido incompressível até velocidade de 300km/h, o que abrange todos os casos de análise de sua ação em edificações. (PITTA, 2002)

Segundo Fox (2014), a equação de conservação de massa é também chamada de equação de continuidade, onde o primeiro termo representa a taxa de variação da massa dentro do volume de controle; O segundo termo representa a taxa líquida de escoamento de massa para fora através da superfície de controle. Sendo assim temos Equação 1 onde a soma da taxa de variação da massa dentro do volume de controle com a taxa líquida de escoamento de massa através da superfície de controle é zero.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV + \int \rho V dA = 0 \quad (1)$$

Onde M representa a massa do sistema, ρ sua massa específica, V sua velocidade e A a área de superfície. Sendo assim, reescrevendo a equação 1 de modo mais simplificado por meio de um tubo ilustrado pela Figura 3 temos:

Figura 3 - Contorno de um tubo de corrente de um fluido



Fonte: Pitta (2002)

Considerando o volume de controle limitado pelo tubo entre as secções S_1 e S_2 em um intervalo de tempo, obtém-se a Equação 2:

$$\rho_1(A_1v_1dt) = \rho_2(A_2v_2dt) \quad (2)$$

Considerando que o ar nessas circunstâncias é um fluido incompressível e está em regime permanente é possível apresentar a Equação 3 e 4:

$$\rho_1 = \rho_2 \quad (3)$$

$$(A_1V_1) = (A_2V_2) \quad (4)$$

Dessa forma, deduz-se que: ao se aumentar a área de secção transversal a velocidade do escoamento será reduzida. Logo, as linhas de fluxo se afastam. Caso contrário, a velocidade de escoamento aumenta, e as linhas de fluxo se aproximam.

2.1.2 Teorema de Bernoulli

Para apresentar o teorema de Bernoulli, primeiramente deve-se relacioná-lo com a equação de Euler, ou equação de quantidade de movimento, segundo FOX (2014) a variação na quantidade de movimento de uma partícula fluida é causada pela força de campo (considerada somente a gravidade) e pela força líquida de pressão sendo assim, utilizando a equação de Euler para escoamento em regime permanente ao longo de uma linha de corrente, temos a equação 5:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \frac{\partial z}{\partial s} = V * \frac{\partial V}{\partial s} \quad (5)$$

Se a partícula fluida se desloca em uma distância ds , multiplicando a equação 5 por ds e integrando temos a equação 6;

$$\frac{1}{2} V^2 + \frac{P}{\rho} + gz = \text{constante} \quad (6)$$

De maneira mais sucinta apresenta-se o Teorema de Bernoulli, ou também conhecido como Teorema de conservação de Energia que diz, segundo Gonçalves (2013), para um fluido incompressível e um escoamento em regime permanente, pode-se dizer que a soma das pressões (ou cargas) cinéticas, estáticas e de posição resulta-se constante. Utilizando a equação 6 e multiplicando todos os fatores por ρ tem-se a equação 7:

$$\frac{1}{2} \rho V^2 + P + \rho gz = \text{constante} \quad (7)$$

No caso de ações do vento em edificações é possível desprezar a pressão ou carga de posição (ρgz), o que permite então dizer que a soma da pressão dinâmica com a pressão estática será constante (GONÇALVES et al., 2013), dessa forma a equação 4 e rerepresentada como equação 8:

$$\frac{1}{2} \rho V_1^2 + P_1 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 + P_2 \quad (8)$$

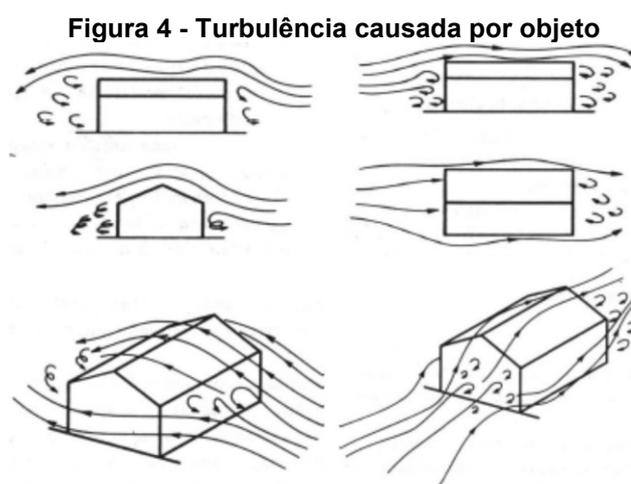
2.2 Escoamento fluidodinâmico

Existem diferentes tipos de escoamento que um determinado fluido pode apresentar. Este escoamento pode ser permanente, onde as grandezas características do escoamento permanecem inalteradas com o passar do tempo, variando apenas em função do espaço. O escoamento também pode ser variável, onde as grandezas se alteram em função do tempo e do espaço. Um caso particular e comumente utilizado para fins de estudo, é o denominado escoamento uniforme onde as grandezas não variam em função do tempo, variando apenas devido ao espaço, sendo que se a velocidade também permanecer inalterada com o passar do

tempo, determina-se o escoamento como uniforme e permanente (BLESSMANN, 2011).

2.2.1 Aerodinâmica da estrutura

O aspecto aerodinâmico demonstra qual é a influência da forma das edificações na determinação das pressões locais e totais sobre elas. Além disso, deve-se considerar possíveis variações devido a agentes externos tais como outras edificações ou obstáculos tanto no que diz respeito a ação estática do vento para cada elemento estrutural quanto a sua ação dinâmica. (PITTA,2002). O escoamento do vento por meio de um obstáculo pode, dependendo de sua geometria, acaba gerando turbulências ao seu redor essa turbulência, de modo simplificado e ilustrado na Figura 4 exemplifica a turbulência causada por um obstáculo ou estrutura:



Fonte: Gonçalves et al. (2004)

No caso a ser estudado, o formato da edificação, por se tratar de uma cobertura sem fechamentos laterais e frontais, não possibilita o cálculo do coeficiente de pressão externo. Segundo Gonçalves et al. (2013) deve-se determinar a ação do vento que será exercida diretamente sobre a face superior e inferior da cobertura.

2.3 Ação do vento nas edificações

Toda a ação devida ao vento é dinâmica, pois sua velocidade varia com o tempo, podendo-se dividi-la, por razões práticas, em uma componente constante e uma de flutuação. Quando o período médio de separação da componente de flutuação é maior ou igual a cem vezes o período de vibração da estrutura, pode-se considerar o efeito do vento como estático. (PITTA 2002)

Segundo PITTA (2002) quando um objeto está totalmente envolto em um escoamento de um fluido em movimento uniforme ele acaba desviando as linhas de fluxo fazendo-as contorná-lo, porém algumas linhas de fluxo incidem perpendicularmente a superfície e se estagnam gerando uma pressão sobre o objeto, nesses pontos a pressão efetiva é chamada de pressão de obstrução. A pressão de obstrução é conhecida como a diferença entre as pressões estática, que é a pressão de estagnação do fluido.

Tomando o objeto como uma edificação e o fluido é o vento incidente, alguns outros fatores também devem ser considerados, de acordo com PITTA (2002) o aspecto aerodinâmico da edificação demonstra qual a influência da forma na determinação de pressões locais e totais, fatores externos como outras edificações, relevo do terreno ou obstáculos presente próximo a estrutura causam variação dos esforços impostos pelo escoamento do fluido na estrutura

2.4 Análise computacional pelo método de volumes finitos

A análise computacional de fluidodinâmica (CFD) estuda sistemas que envolvem o movimento de fluidos, utilizando as equações de Navier-Stokes para descrever a conservação de massa, quantidade de momento e energia, as quais são resolvidas por meio de métodos computacionais. O desenvolvimento dessa técnica só foi possível graças aos avanços na área da computação.

A fluidodinâmica computacional tem diversas aplicações, abrangendo problemas relacionados ao escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos como reações químicas. De acordo com Silva et al. (2016), essa área engloba três aspectos fundamentais: teoria dos fenômenos de transporte, métodos numéricos e computação científica. Na indústria, o uso da CFD ganhou destaque a partir da década de 1990, proporcionando vantagens em relação às análises

experimentais, como a redução de custos e tempo em novos projetos, capacidade de analisar sistemas de grande escala e estudar condições perigosas.

Segundo Versteeg e Malasekara (1995), a estrutura dos códigos de CFD é baseada em algoritmos numéricos que resolvem problemas relacionados ao escoamento de fluidos. Para melhorar a interação com o usuário, esses códigos são divididos em três etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento. O pré-processamento abrange etapas essenciais para a análise em CFD, que incluem:

- Definição da geometria para estabelecer o domínio computacional.
- Geração da malha: nesse estágio, é recomendado que a malha seja suficientemente refinada para resolver os problemas de escoamento. A qualidade da malha influencia nos resultados da análise em CFD, já que a solução para os problemas de escoamento (velocidade, pressão, temperatura etc.) é determinada nos nós de cada célula da malha. Portanto, a precisão da solução em CFD também é governada pela qualidade e refinamento da malha.
- Seleção dos fenômenos físicos e químicos que precisam ser modelados.
- Definição das propriedades dos fluidos.
- Especificação das condições de contorno

O pré-processamento demanda considerável tempo para a modelagem do domínio, atualização da malha e ajustes dos parâmetros de convergência (PASQUAL, 2011).

A etapa de Solução é responsável pelo processamento das informações inseridas no pré-processamento. Os algoritmos numéricos realizam as seguintes etapas:

- Aproximação das variáveis de escoamento por meio de funções simples.
- Discretização através da solução das aproximações entre as equações de transporte de escoamento e as manipulações matemáticas subsequentes.
- Solução das equações algébricas.

Existem diferentes métodos que podem ser utilizados para a resolução numérica, tais como diferenças finitas, elementos finitos, métodos espectrais e método de volumes finitos. Chung (2002) destaca que a diferença entre esses métodos reside na aproximação das variáveis do escoamento e na discretização da solução. O método das diferenças finitas é formulado para malhas estruturadas, enquanto o método dos

volumes finitos é válido também para malhas não estruturadas. O ANSYS CFX utiliza o método de volumes finitos (MVF), que foi formulado por Patankar em 1980 e evoluiu a partir do método das diferenças finitas. As etapas que compõem os algoritmos do MVF, conforme Versteeg e Malasekara (1995), são:

- Integração das equações que governam o escoamento em todo o domínio computacional.
- Conversão das equações em um sistema de equações algébricas.
- Solução do sistema de equações algébricas por meio de um método iterativo.

A etapa de pós-processamento apresenta os resultados da simulação numérica, permitindo ao usuário visualizar e analisar os dados obtidos. Nessa etapa, é possível observar gráficos de vetores, linhas de fluxo, gráficos e linhas de contorno, trajetória de partículas, realizar animações, entre outros recursos. É nessa fase que o usuário pode avaliar a qualidade da análise em CFD.

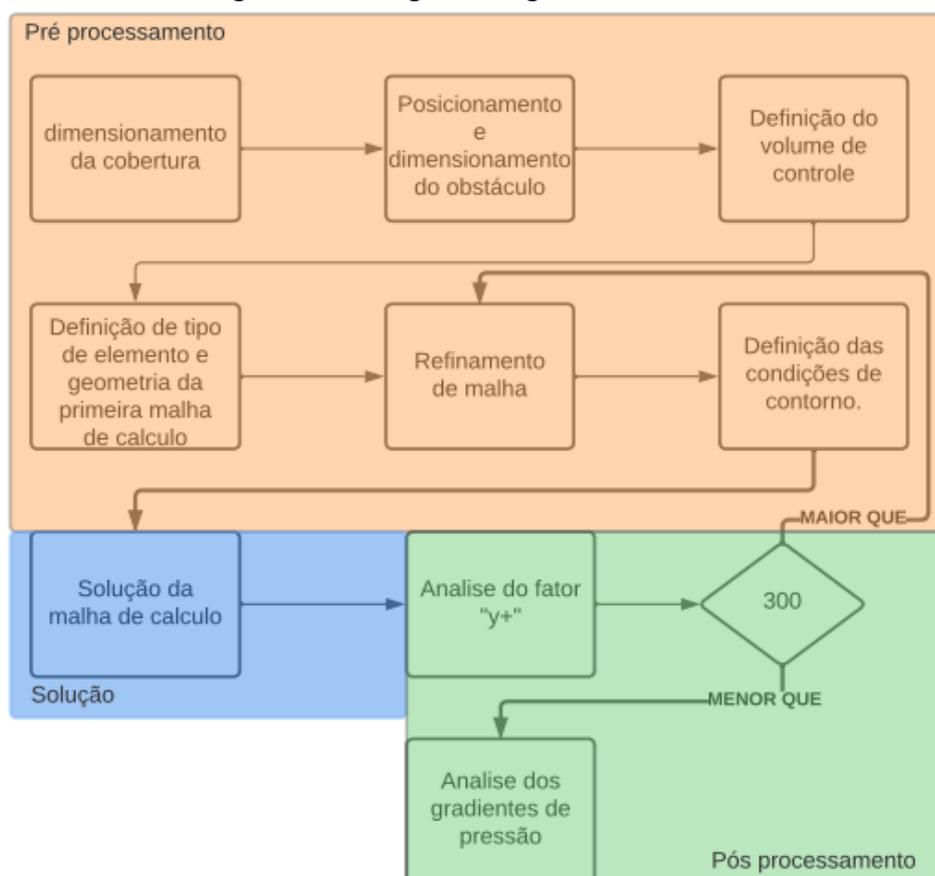
No caso específico da análise da ação do vento, é possível obter os coeficientes de pressão, analisar o escoamento do vento ao redor dos edifícios analisados e verificar a velocidade do escoamento. Com esses resultados em mãos, é possível compará-los com ensaios experimentais, estudos na literatura ou valores de referência normativos, a fim de validar a qualidade e eficiência da simulação realizada.

3 METODOLOGIA

3.1 Fluxograma

Para melhor entendimento da metodologia aplicada neste trabalho, segue abaixo um fluxograma ilustrado pela Figura 5 o qual esse trabalho seguiu.

Figura 5 - Fluxograma seguido no trabalho

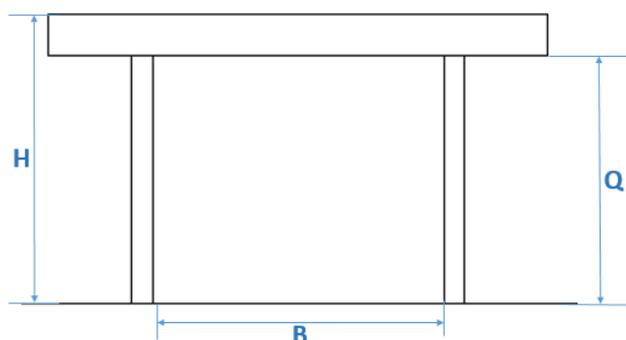


Fonte: Autoria própria (2023)

3.2 Definição de geometria da estrutura

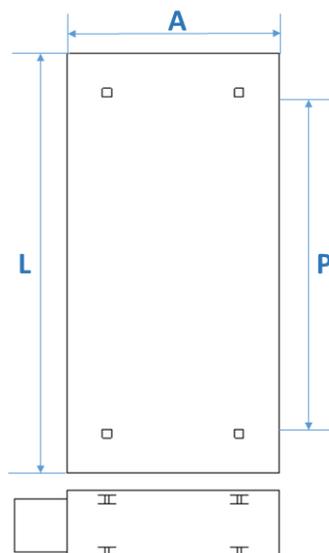
Antes de iniciar as análises computacionais, são necessárias que sejam definidas algumas condições de controle. Uma dessas condições é a geometria da estrutura que será analisada, como citado anteriormente o objetivo desse trabalho é analisar uma estrutura com cobertura plana e isolada. Sendo assim foram tomadas algumas decisões referentes à sua forma, segue abaixo a Figura 6 e Figura 7 que apresentam as dimensões escolhidas para a estrutura:

Figura 6 - Vista frontal da estrutura (Ilustrativo)



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 7 - Vista lateral da estrutura (Ilustrativo)



Fonte: Autoria própria (2023)

sendo $Q = 6$ m (seis metros); $H = 7$ m (sete metros); $B = 7$ m (sete metros); $A = 12$ m (doze metros); $L = 24$ m (vinte e quatro metros); $P = 19$ m (dezenove metros) e a estrutura possui 4 colunas quadradas com dimensões de $0,5$ m x $0,5$ m (meio metro por meio metro).

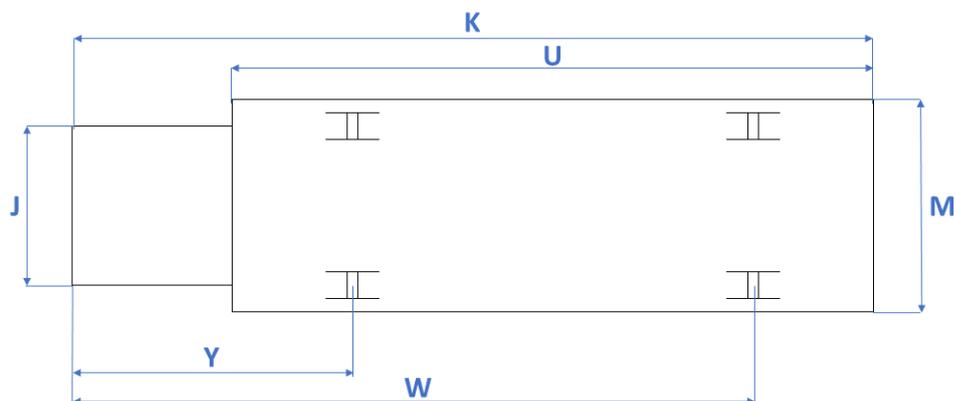
3.3 Forma e posicionamento de obstáculo

Outras condições de controle extremamente importantes para a análise e a geometria é o posicionamento do obstáculo que influenciará diretamente nos esforços atuantes na estrutura.

Para esse estudo, foi definido que a geometria do obstáculo seria similar a um caminhão e que sua forma deveria obstruir totalmente o escoamento de ar incidente

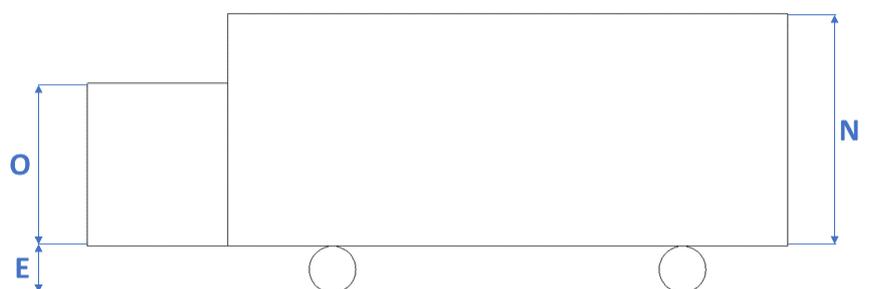
na estrutura. Sendo assim, de modo esquemático, Figura 8 e Figura 9 as quais ilustram de modo simplificado a forma do obstáculo:

Figura 8 - Vista superior do obstáculo (Ilustrativo)



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 9 - Vista Lateral do obstáculo (Ilustrativo)



Fonte: Autoria própria (2023)

sendo $K = 15,5$ m (quinze metros e meio); $M = 4$ m (quatro metros); $W = 13$ m (treze metros); $U = 12$ m (doze metros); $Y = 2,5$ m (dois metros e meio); $J = 3,5$ m (três metros e meio); $N = 5$ m (cinco metros); $E = 1$ m (um metro) e $O = 3,5$ m (três metros e meio).

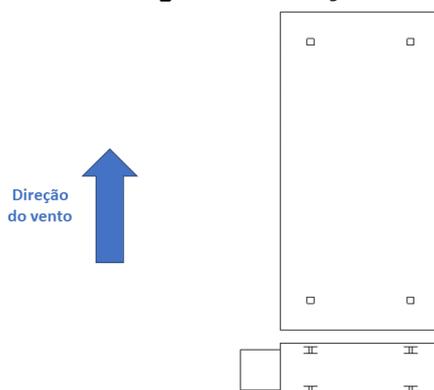
O posicionamento do obstáculo é mais uma condição de controle geométrica para análise dos esforços promovidos pelo escoamento fluidodinâmico atuantes na estrutura. Sendo assim, ao trocá-lo de lugar faz com que os esforços se alterem. Dessa forma, buscando compreender em qual posicionamento proporcionaria esforços sobre a estrutura, definiu-se 6(seis) posicionamentos diferentes para serem analisados, logo 6 casos diferentes, segue abaixo a Figura 10 que descreve cada um dos casos:

Figura 10 - Casos a serem estudados

Caso 1	Um obstáculo posicionado paralelamente aos pórticos, na face barlavento (à frente da estrutura).
Caso 2	Um obstáculo posicionado paralelamente aos pórticos, na face sotavento (atrás da estrutura).
Caso 3	Dois obstáculos posicionados paralelamente aos pórticos, um na face barlavento (à frente da estrutura) e outro na face sotavento (atrás da estrutura).
Caso 4	Um obstáculo posicionado perpendicularmente aos pórticos, na face barlavento (à frente da estrutura).
Caso 5	Um obstáculo posicionado perpendicularmente aos pórticos, na face sotavento (atrás da estrutura).
Caso 6	Dois obstáculos posicionados perpendicularmente aos pórticos, um na face barlavento (à frente da estrutura) e outro na face sotavento (atrás da estrutura).

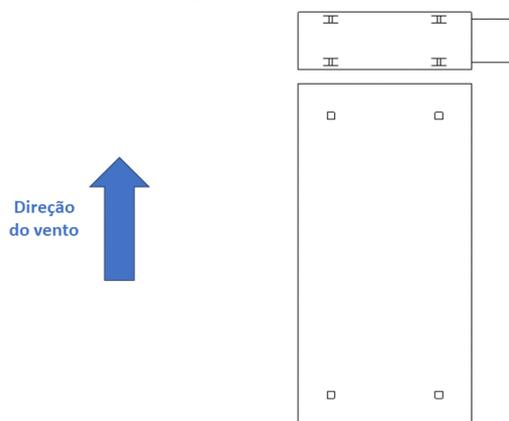
Fonte: Autoria própria (2023)

1º (Primeiro) caso: Um obstáculo posicionado paralelamente aos pórticos, na face barlavento (à frente da estrutura). Figura 11:

Figura 11 - direção do vento caso 1

Fonte: Autoria própria (2023)

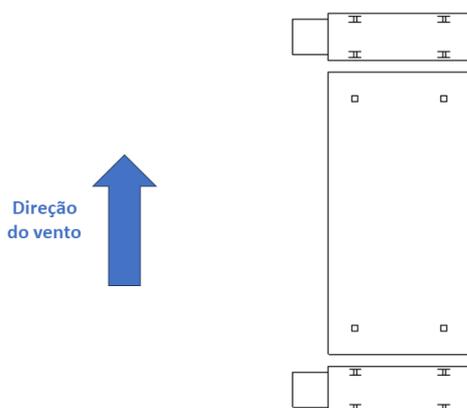
2º (Segundo) caso: Um obstáculo posicionado paralelamente aos pórticos, na face sotavento (atrás da estrutura). Figura 12:

Figura 12 - direção do vento caso 2

Fonte: Autoria própria (2023)

3º (Terceiro) caso: Dois obstáculos posicionados paralelamente aos pórticos, um na face barlavento (à frente da estrutura) e outro na face sotavento (atrás da estrutura). Figura 13:

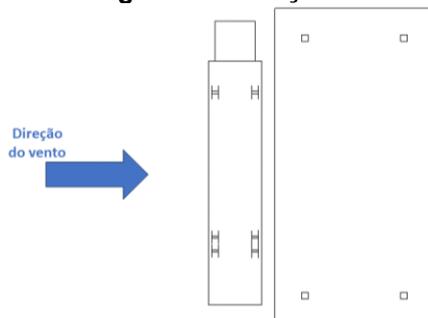
Figura 13 - direção do vento caso 3



Fonte: Autoria própria (2023)

4º (Quarto) caso: Um obstáculo posicionado perpendicularmente aos pórticos, na face barlavento (à frente da estrutura). Figura 14:

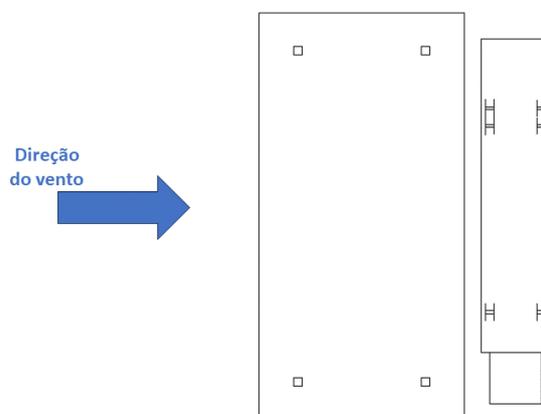
Figura 14 - direção do vento caso 4



Fonte: Autoria própria (2023)

5º (quinto) caso: Um obstáculo posicionado perpendicularmente aos pórticos, na face sotavento (atrás da estrutura). Figura 15:

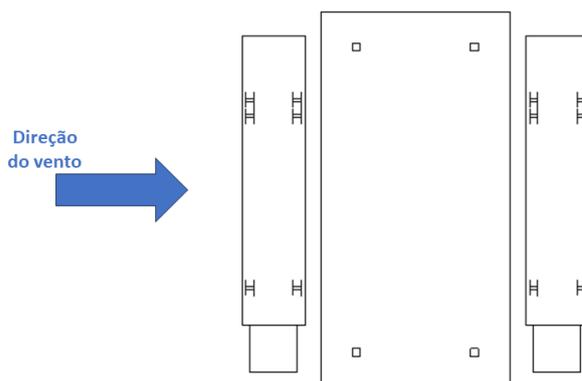
Figura 15 - direção do vento caso 5



Fonte: Autoria própria (2023)

6º (sexto) caso: Dois obstáculos posicionados perpendicularmente aos pórticos, um na face barlavento (à frente da estrutura) e outro na face sotavento (atrás da estrutura). Figura 16:

Figura 16 - direção do vento caso 6



Fonte: Autoria própria (2023)

3.4 Geometria do volume de controle

Esta será a última geometria a qual necessita ser definida. Ela simula o que seria um túnel de vento. Suas dimensões foram definidas em escala 16 a 1 a partir das dimensões totais da estrutura, exceto a altura a qual possui uma escala de 7.5 a 1. A estrutura e o obstáculo serão inseridos na parte central do volume de controle.

3.5 Malha de cálculo e tipo de elemento

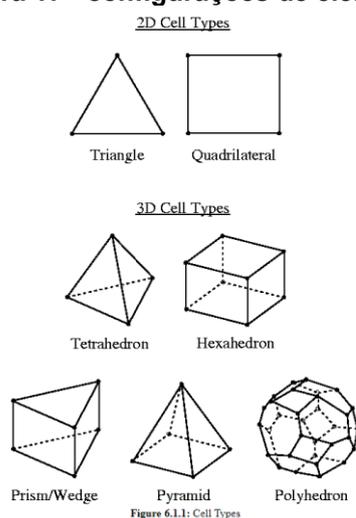
Para que seja possível a obtenção de dados pelo método de elementos finitos é necessária dimensionar uma malha de cálculo que auxiliará nos cálculos de variáveis como a pressão e a velocidade em um determinado ponto no espaço e em um intervalo de tempo estipulado. Essa malha será composta por elementos tridimensionais, os quais auxiliam a obtenção de resultados mais realistas.

Com todas as geometrias modeladas e todos os casos definidos partiu-se para análise computacional de cada caso, para isso importou-se todas as geometrias feitas no software INVENTOR para o software de simulação ANSYS, onde é possível

simular algo similar ao um túnel de vento com a extensão de análise fluidodinâmica CFX.

A partir das geometrias, nesse novo software (ANSYS), foi gerada a malha de cálculo, para regiões distantes do obstáculo e das estruturas, foi definido o elemento de cálculo 3D tetraédricos. Nas regiões mais próximas da estrutura, o tamanho dos elementos era reduzido. Na superfície da estrutura, o local que se pretende focar a maior parte das análises, utilizou-se elementos 2D triangulares. Em alguns pontos da malha houve a presença de elementos prismáticos e com formato de pirâmide, isso ocorre por conta das configurações de dimensionamento de malha incorporadas no programa, os elementos tetraédricos, prismáticos, pirâmide, e triangulares podem ser representados pela seguinte Figura 17:

Figura 17 - configurações de elemento

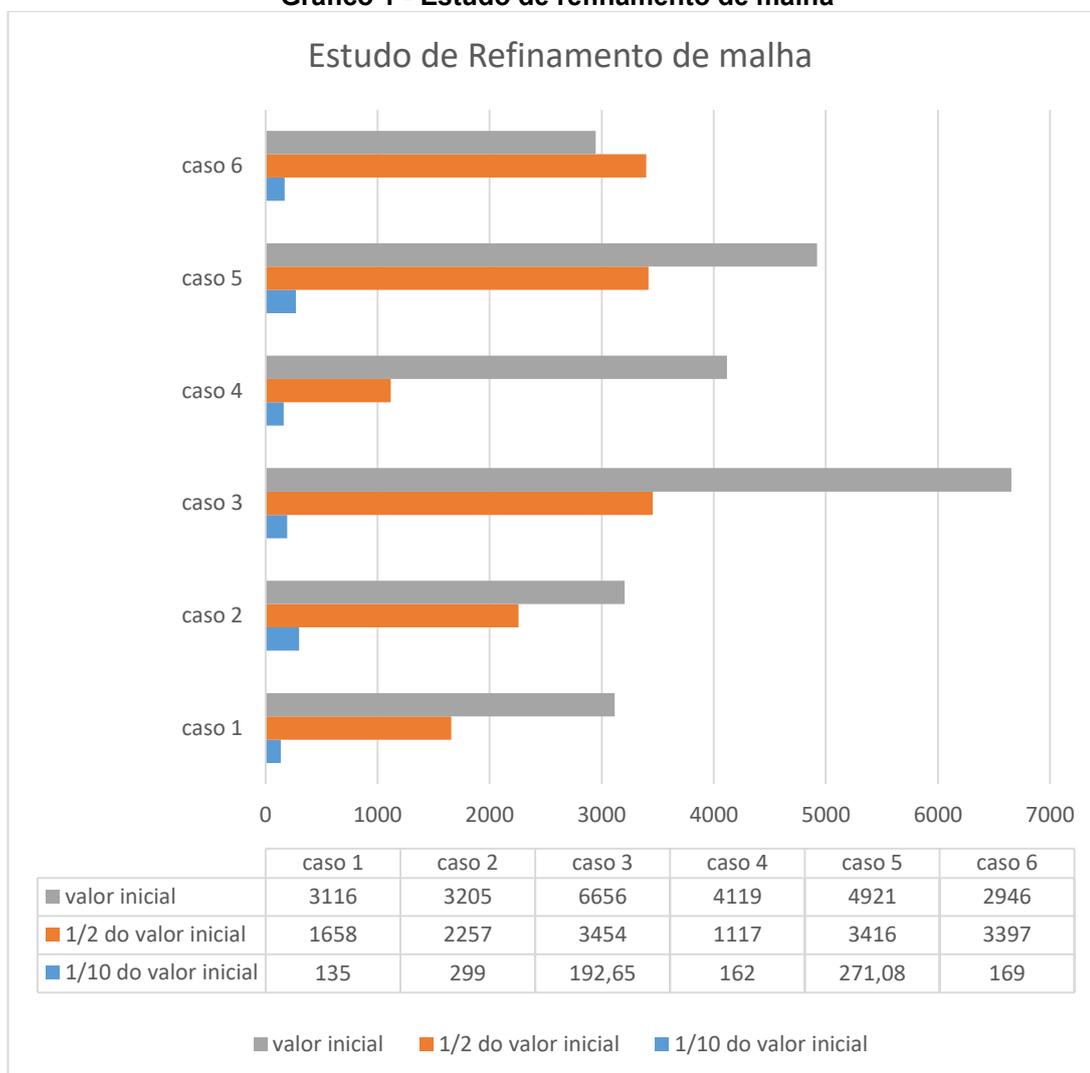


Fonte: ENEA (2009)

A fim de se obter resultados mais precisos, realizou-se um estudo de convergência de malha, o qual tem como objetivo avaliar a sensibilidade dos resultados numéricos em relação à densidade da malha utilizada. Isso é feito refinando progressivamente a malha, ou seja, aumentando o número de elementos finitos, e observando as mudanças nos resultados obtidos. Para o presente trabalho, a validação dos resultados é de extrema importância. Um dos fatores cruciais para essa validação é o valor da variável "y+". No próximo capítulo, será realizada uma abordagem mais detalhada sobre essa variável. Neste estudo, estabelecemos como métrica a busca por valores de "y+" menores que 300. Com o intuito de analisar a influência do refinamento da malha, apresentamos abaixo o Gráfico 1 que demonstra

o efeito desse refinamento em cada caso e sua consequente influência no valor de "y+".

Gráfico 1 - Estudo de refinamento de malha



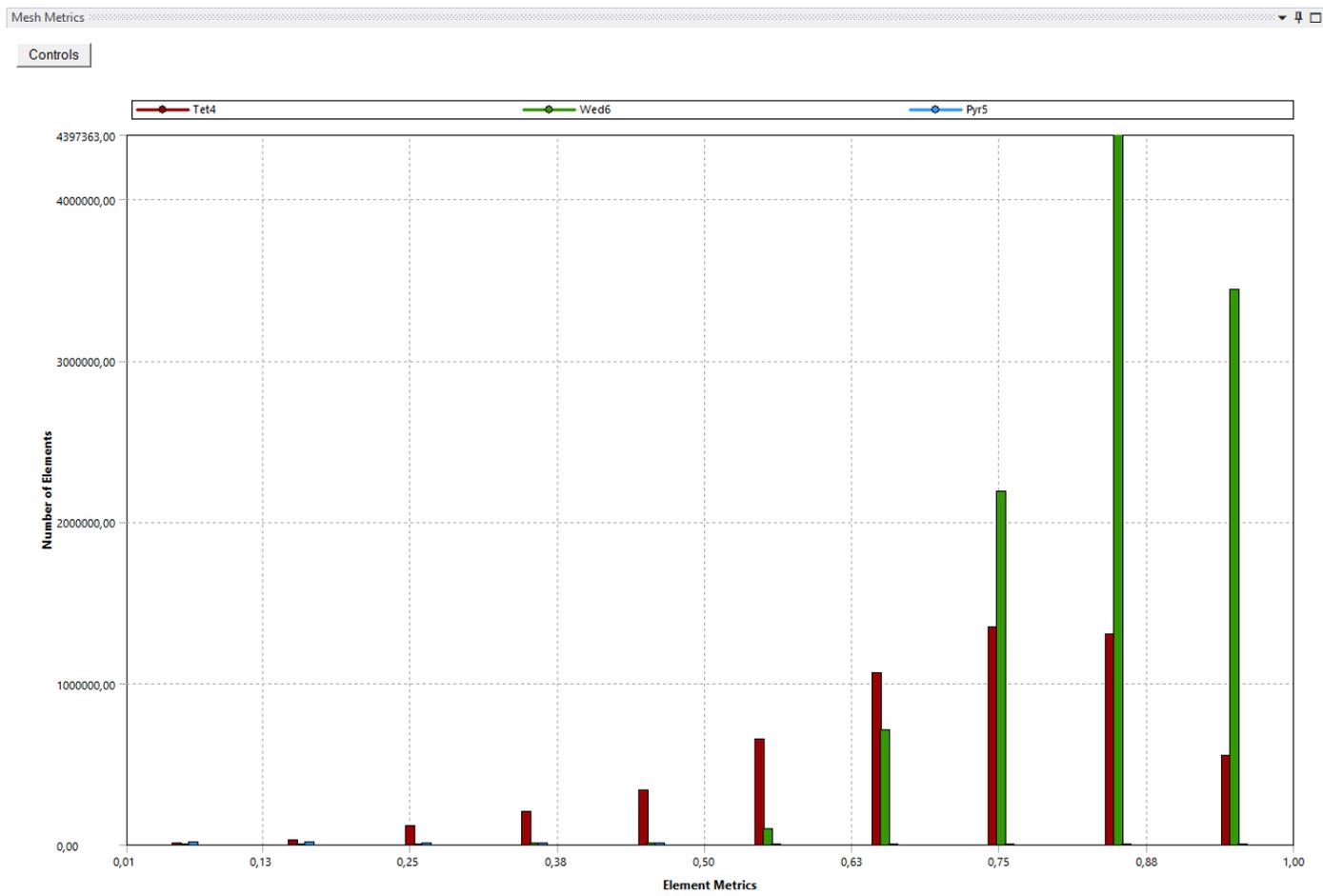
Fonte: Autoria própria (2023)

Para validação da qualidade da malha de cálculo, programa ANSYS disponibiliza alguns métodos de avaliação de qualidade de malha, entre eles o "Orthogonal Quality" e "Element Quality", neste estudo foi utilizado o método de avaliação "Orthogonal Quality". Ele avalia a ortogonalidade das arestas dos elementos da malha em relação à superfície do modelo. Quanto mais próximo de 1 for o valor obtido, melhor será a qualidade da malha,

Como esse estudo abrange seis casos distintos, houve a necessidade de gerar quatro malhas de cálculo, as quais serão utilizadas nos cálculos dos seguintes casos:

Malha 1: abrange o caso 1 e caso 2, possui 16473920 elementos e 6581574 nós, essa malha foi analisada pelo método “Ortogonal Quality” o qual é representado abaixo pelo Gráfico 2:

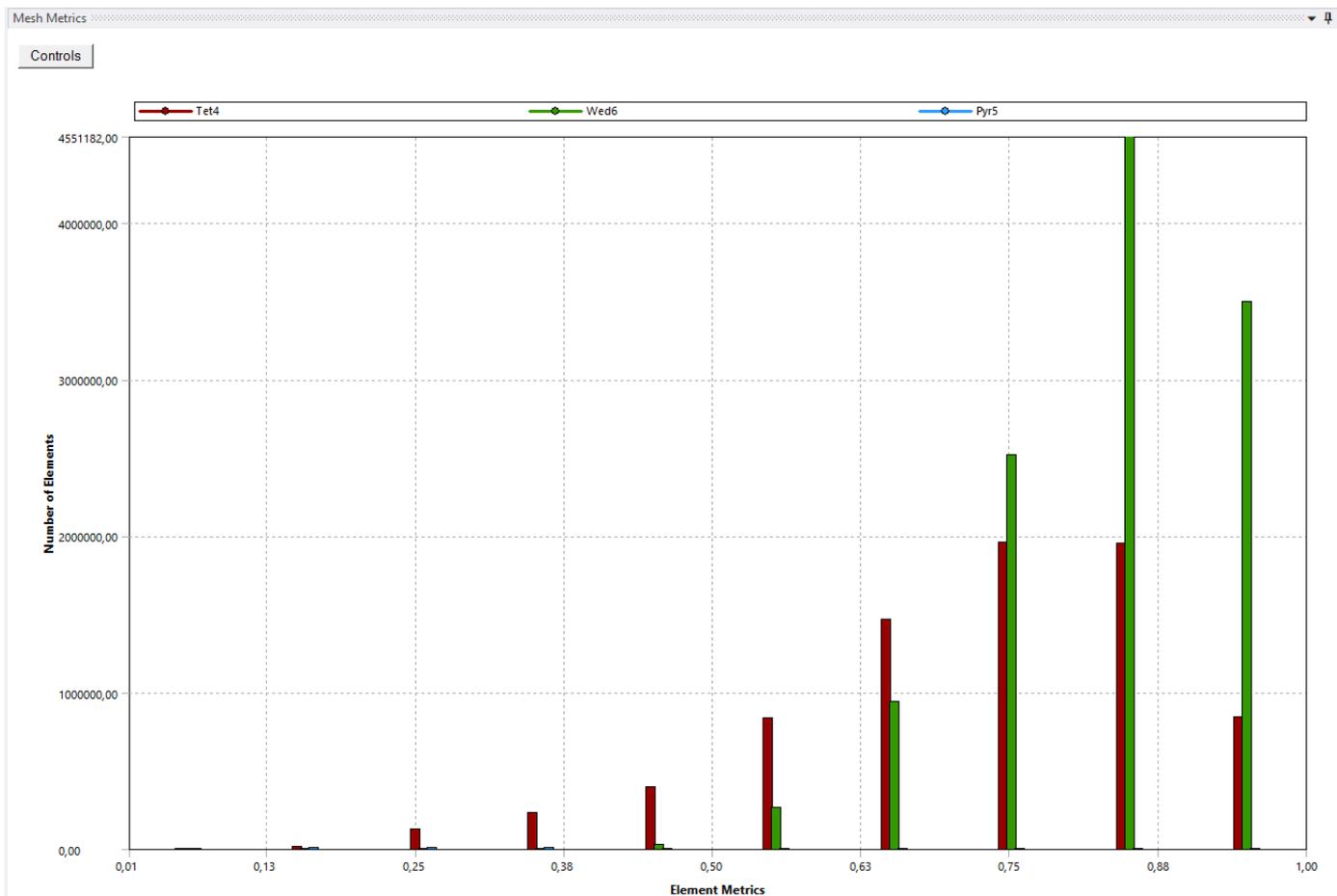
Gráfico 2 - Número de elementos x qualidade da malha 1



Fonte: Autoria própria (2023)

Malha 2: abrange o caso 3, possui 19628658 elementos e 7473138 nós, essa malha foi analisada pelo método “Ortogonal Quality” o qual é representado abaixo pelo Gráfico 3:

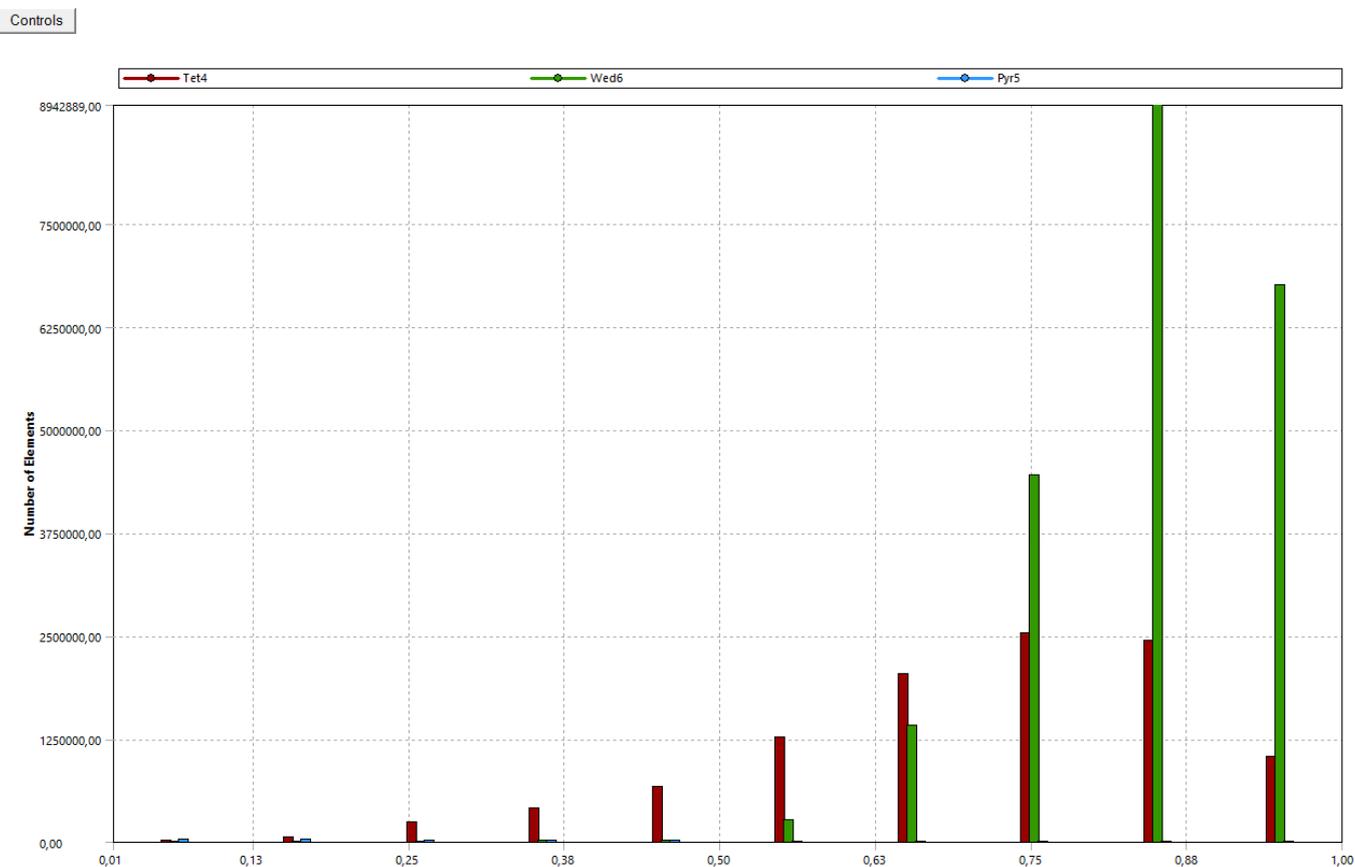
Gráfico 3 - Número de elementos x qualidade da malha 2



Fonte: Autoria própria (2023)

Malha 3: abrange o caso 4 e caso 5, possui 32560770 elementos e 13137379 nós, essa malha foi analisada pelo método “Ortogonal Quality” o qual é representado abaixo pelo Gráfico 4 :

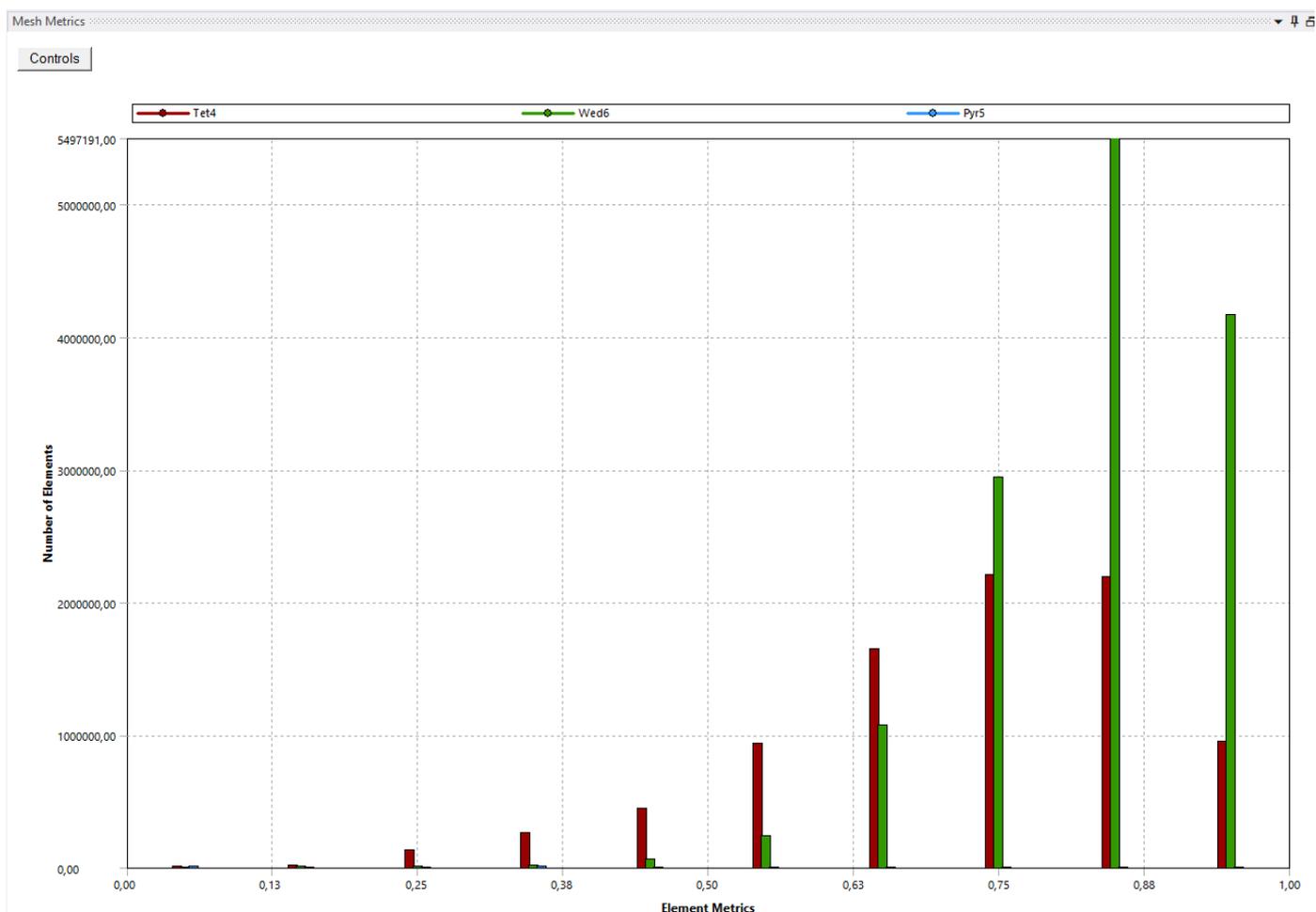
Gráfico 4 - Número de elementos x qualidade da malha 3



Fonte: Autoria própria (2023)

Malha 4: abrange o caso 6 possui 22797050 elementos e 8774335 nós, essa malha foi analisada pelo método “Ortogonal Quality” o qual é representado abaixo pelo Gráfico 5:

Gráfico 5 - Número de elementos x qualidade da malha 4



Fonte: Autoria própria (2023)

3.6 Condições de contorno físicas para simulação

A extensão CFX utilizada no software ANSYS para análise fluidodinâmica, possui uma sequência de tarefas as quais devem ser seguidas antes de iniciar os cálculos da simulação. Essa sequência deverá ser executada da seguinte maneira: primeiramente a definição da geometria, em seguida o dimensionamento da malha de cálculo, posteriormente a inclusão das condições de contorno físicas e cálculo da malha e por fim a análise de resultados obtidos por meio dos cálculos. Dessa forma, como a geometria e a malha de cálculo já foram definidas, o próximo passo seria a inclusão das condições de controle físicas necessárias para a simulação.

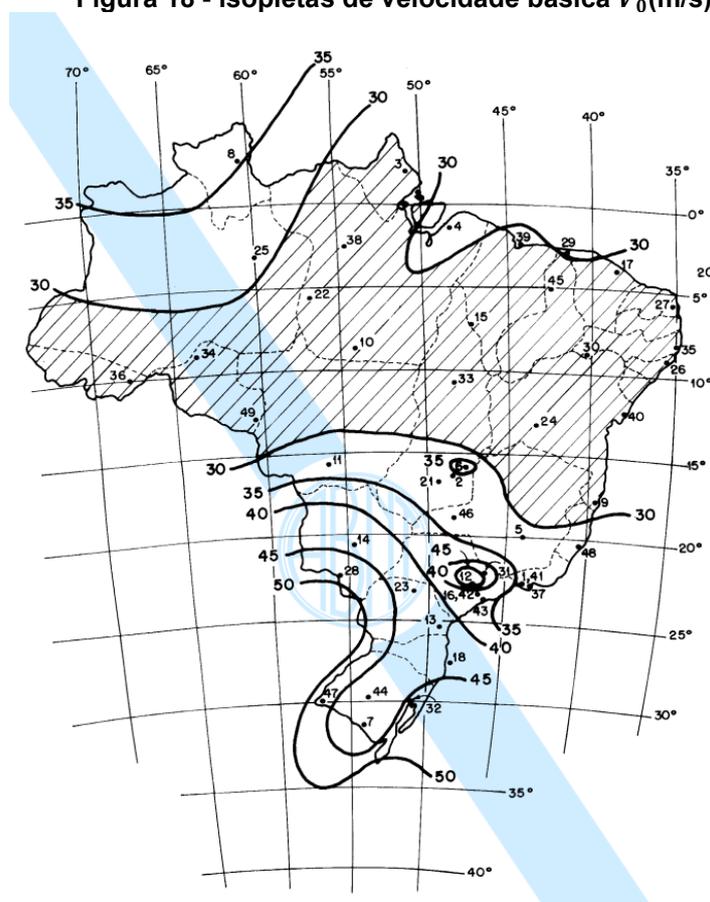
Como o objetivo desse estudo é analisar o impacto das ações do vento em estruturas planas isoladas em diferentes situações, utilizaram-se as mesmas condições de contorno em todos os casos.

Uma das condições de contorno necessárias para dar sequência a análise, é a velocidade do escoamento ou velocidade característica do vento (V_k) que se dá pela seguinte equação 9:

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 \quad (9)$$

onde V_0 é a velocidade básica do vento, S_1 é o fator topográfico, S_2 é o fator de rugosidade do terreno e S_3 fator estático. Para determinação de cada uma dessas variáveis segue-se o que é descrito na norma ABNT NBR 6123:1988, sendo assim, considerando que a estrutura está uma região rural plana, próxima a cidade de Pato Branco, Paraná, pode-se definir a velocidade básica do vento por meio da Figura 18 abaixo demonstrada.

Figura 18 - isopletas de velocidade básica V_0 (m/s)



Fonte: ABNT (1988)

$$V_0 = 45 \frac{m}{s} \quad (10)$$

$$S_1 = 1 \quad (11)$$

Considerando que a estrutura está em terreno aberto e aproximadamente em nível, pode-se definir que para cálculo do fator S_2 a estrutura pertence a Categoria II e Classe A, logo através da Figura 19 pode-se definir o valor de S_2

Figura 19 - Tabela com valores do fator S_2

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

Fonte: ABNT (1988)

Adotando que a altura (z) da estrutura é maior que 5 metros o fator S_2 pode ser descrito pela equação 12:

$$S_2 = 1 \quad (12)$$

O valor do último fator, no caso S_3 pode-se ser definido por uma tabela presente na norma ABNT NBR 6123:1988 o qual é representada pela Figura 20:

Figura 20 - valores mínimos do fator estático 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 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 dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Fonte: ABNT (1988)

Categorizando a estrutura dentro o grupo 2 o fator S_3 pode-se ser descrito pela equação 13:

$$S_3 = 1 \quad (13)$$

Logo a velocidade característica do vento (V_k) definida pela equação 9 terá um valor igual a apresentada pela equação 14:

$$V_k = 45 \frac{m}{s} \quad (14)$$

Dando sequência a definição das condições de contorno, a próxima condição é a densidade do ar (γ_{ar}) a 25 °C e a pressão dinâmica (p), no caso da densidade utilizou-se o valor aproximado descrito pela equação 15:

$$\gamma_{ar} = 1.4 \frac{kg}{m^3} \quad (15)$$

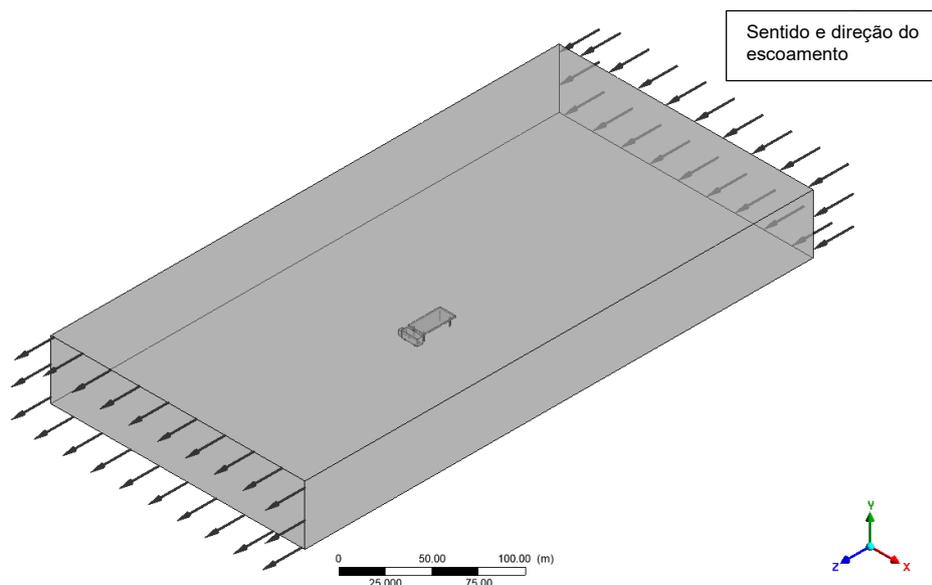
Durante as análises dos primeiros casos, notou-se a necessidade de utilizar uma pressão dinâmica, causada pela velocidade de escoamento desta forma foi calculada através da equação 24 a qual é utilizada na apostila do “*Workshop 04 Fluid flow around the NACA0012 Airfoil*” utilizada como base para a programação das condições de controle deste trabalho.

$$p = \frac{p_0}{\left[1 + \left(\frac{\gamma_{ar} - 1}{2}\right) * M^2\right]^{\frac{\gamma_{ar}}{\gamma_{ar} - 1}}} \quad (16)$$

Onde p_0 que representa a pressão estática adotada como $p_0 = 1 \text{ atm}$ e M que representa a velocidade que o escoamento encontra a estrutura, em escala mach de velocidade, $M = 0,1311$. Sendo assim, o valor de p e descrito pela equação 17

$$p = 92477,75 \text{ Pa} \quad (17)$$

Figura 21 - Volume de controle



Fonte: Autoria própria (2023)

Com a malha de cálculo definida, as condições de contorno definidas, inicia-se os cálculos computacionais para simulação, e com o término dos cálculos avalia-se os resultados obtidos.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Parâmetros de análise fluido dinâmica

O Primeiro parâmetro analisado é denominado como “y+” que, de modo mais simplificado é uma distância adimensional normal a superfície entre os elementos que formam a malha. Sendo assim, conforme os elementos se aproximam na superfície, através de refinamento de malha, menor será o “y+”, e quanto mais elementos próximos a superfície da estrutura, mais precisa será a simulação, logo para maior precisão sobre os valores calculados, buscou-se um “y+” menor possível.

A partir dessas informações, com base nas referências, adotou-se como método de convergência de malha o valor máximo de 300 para o +y permitindo na superfície das estruturas após as simulações, sendo adequado para um estudo de parâmetros em um método simplificado (ANSYS INC, 2012). Em casos em que o y+ se apresentou maior que 300, efetuou-se um refinamento de malha mais efetivo seguido de outra simulação afim de se obter maior precisão.

Os valores máximos de y+ obtidos estão presentes na Tabela 1:

Tabela 1 - Valor máximo de y+ por cada modelo de simulação

Modelo de simulação	y+ max
Escoamento Lateral com obstáculo antes e depois	169
Escoamento frontal com obstáculo antes	135
Escoamento frontal com obstáculo depois	299
Escoamento Lateral com obstáculo antes	162
Escoamento Lateral com obstáculo depois	271,08
Escoamento frontal com obstáculo antes e depois	192.65

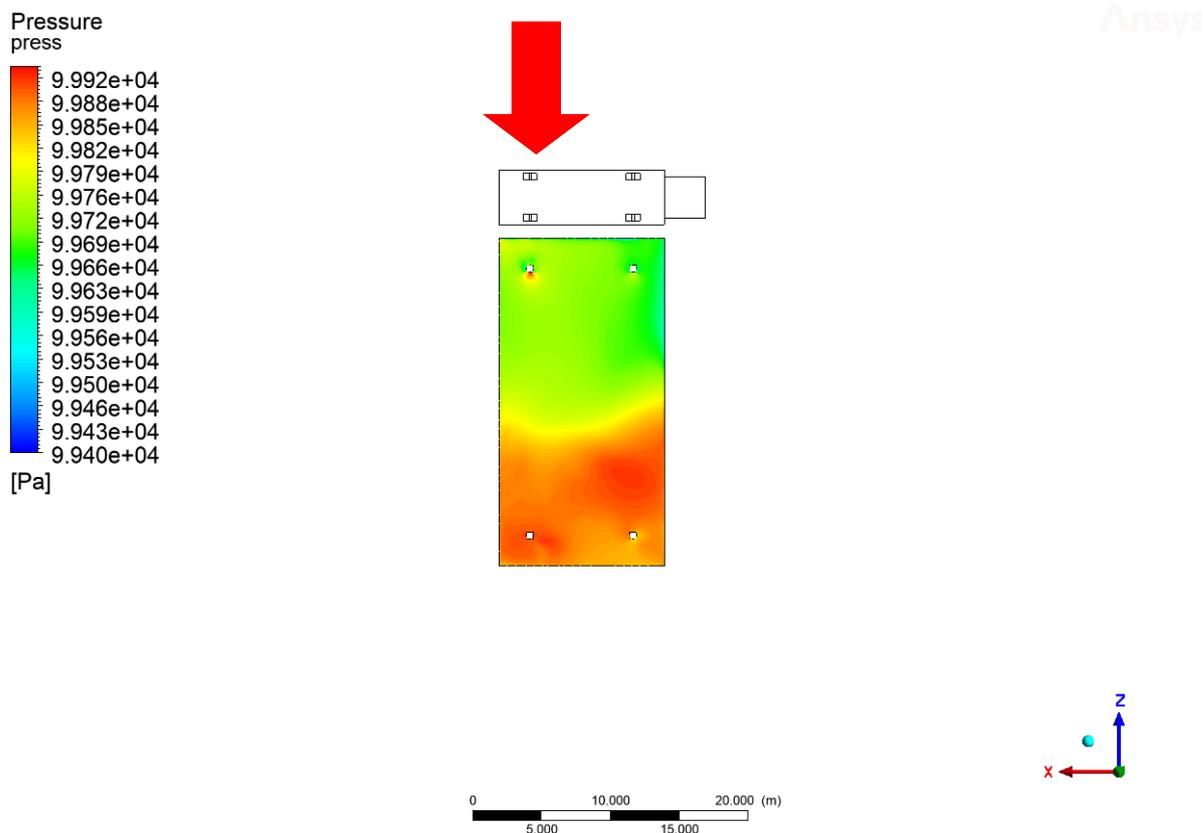
Fonte: Autoria própria (2020)

4.2 Resultado dos gradientes de pressão

4.2.1 Caso 1

Para o primeiro caso analisado, após redução de y+ ao um valor abaixo do determinado anteriormente, avaliou-se a pressão da superfície interna da estrutura, face de baixo da cobertura. Que pode ser demonstrado através de gradientes de pressão, dessa forma, seguem abaixo o gradiente obtido por intermédio de dos cálculos computacionais, representados pela Figura 22:

Figura 22 - Gradiente de pressão interna caso 1



Fonte: Autoria própria (2023)

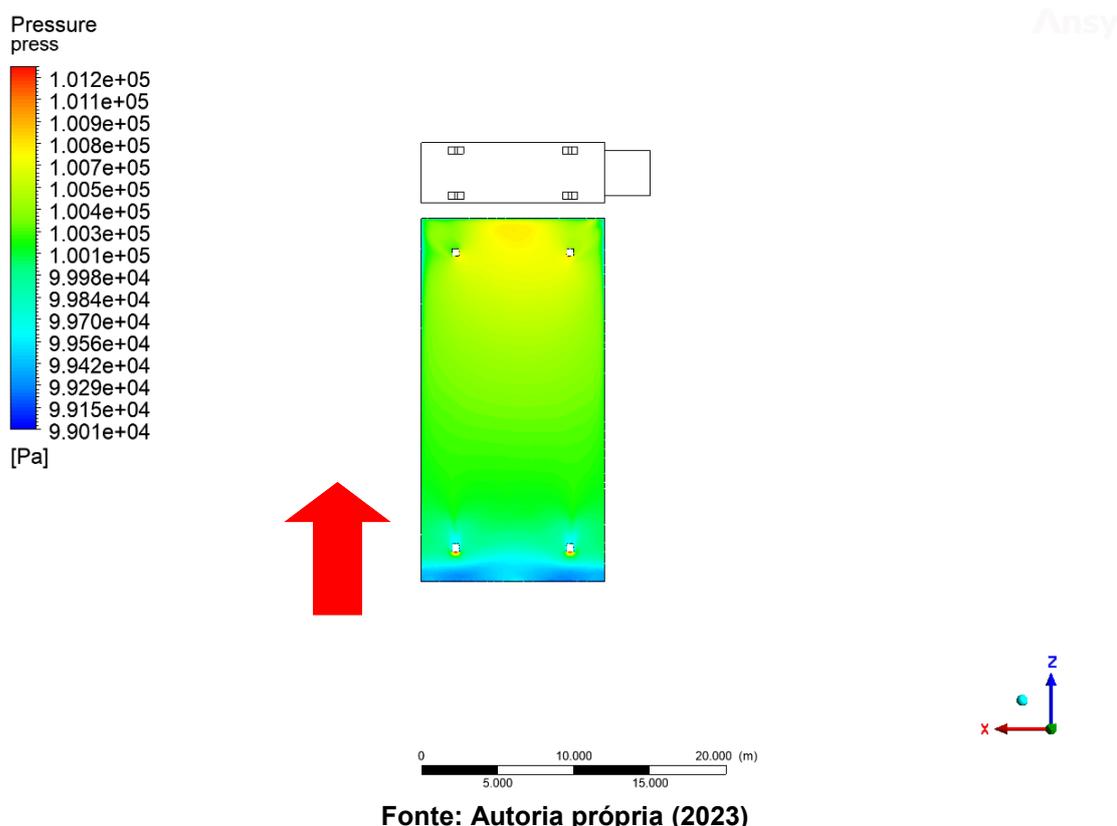
O sentido do escoamento é demonstrado pela seta vermelha, ou de maneira mais simples, da parte de cima da imagem, para parte de baixo.

Analisando a Figura 22 nota-se que a área próxima ao obstáculo, principalmente a região próxima a bralavento, sofrem uma pressão menor comparada a região próxima há sotavento. A pressão máxima encontrada foi de 99.94 kPa

4.2.2 Caso 2

Para o segundo caso analisado, após redução de y^+ ao um valor abaixo do determinado anteriormente, avaliou-se a pressão da superfície interna da estrutura, face de baixo da cobertura. Que pode ser demonstrado através de gradientes de pressão, dessa forma, seguem abaixo o gradiente obtido por intermédio de dos cálculos computacionais, representados pela Figura 23:

Figura 23 - Gradiente de pressão interna caso 2



Fonte: Autoria própria (2023)

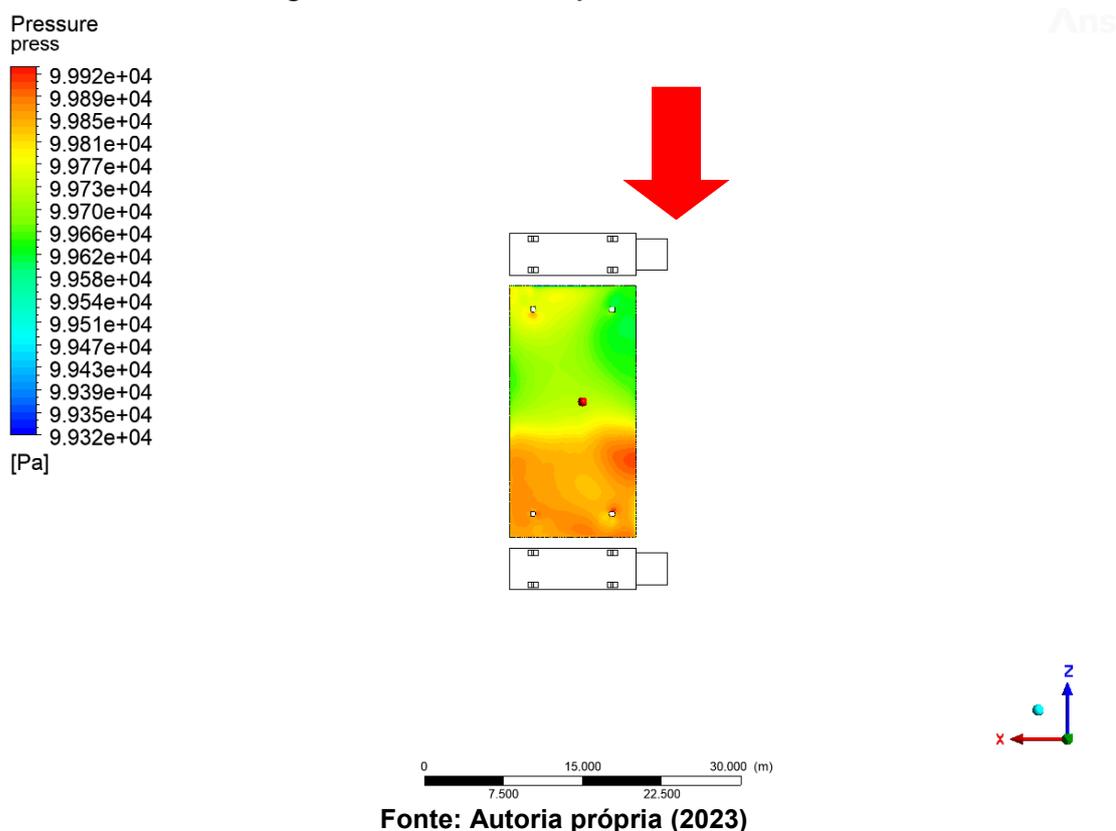
O sentido do escoamento é demonstrado pela seta vermelha, ou de maneira mais simples, da parte de baixo da imagem, para parte de cima.

Analisando a Figura 23 nota-se que a área próxima ao obstáculo, principalmente a parte central próxima a borda sotavento, sofrem uma pressão maior comparada a área próximo a barlavento, onde é registrado o menor valor de pressão na face inferior da cobertura. A pressão máxima encontrada foi de 101.2kPa.

4.2.3 Caso 3

Para o terceiro caso analisado, após redução de y^+ ao um valor abaixo do determinado anteriormente, avaliou-se a pressão da superfície interna da estrutura, face de baixo da cobertura. Que pode ser demonstrado através de gradientes de pressão, dessa forma, seguem abaixo o gradiente obtido por intermédio de dos cálculos computacionais, representados pela Figura 24:

Figura 24 - Gradiente de pressão interna caso 3



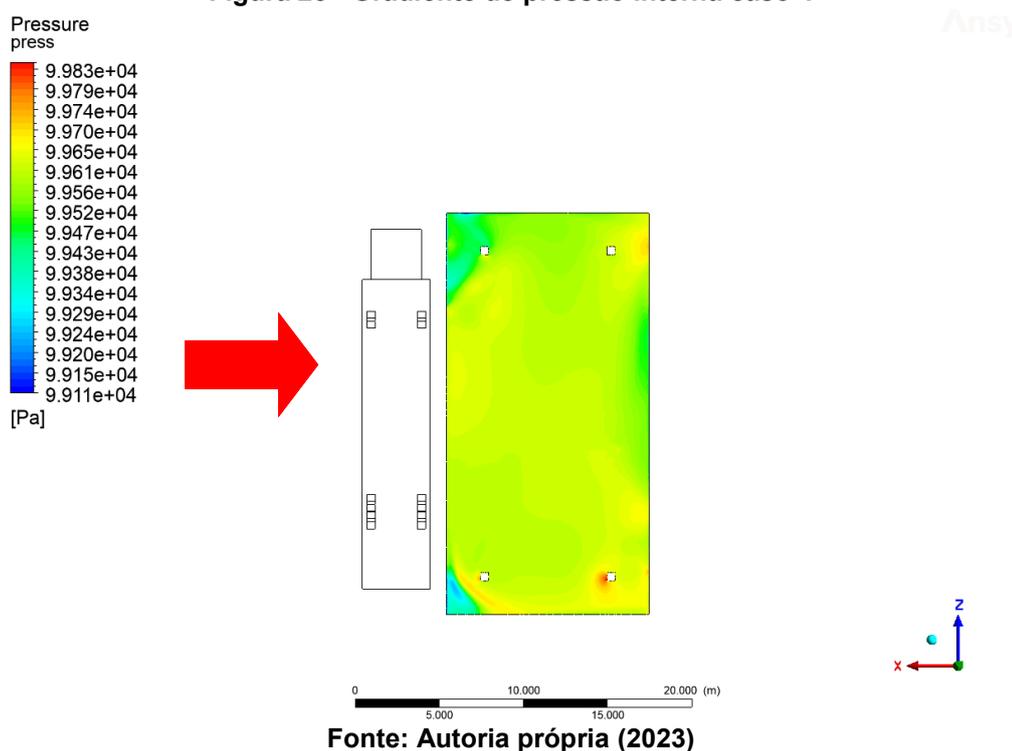
O sentido do escoamento é demonstrado pela seta vermelha, ou de maneira mais simples, da parte de cima da imagem, para parte de baixo.

Analisando a Figura 24 nota-se que o comportamento da pressão imposta sobre a cobertura se assemelha aos casos anteriores, com a região mais próxima a sotavento sofrendo com valores maiores de pressão. Entretanto percebe-se um aumento da pressão próxima borda barlavento. A pressão máxima encontrada foi de 99.93kPa.

4.2.4 Caso 4

Para o quarto caso analisado, após redução de y^+ ao um valor abaixo do determinado anteriormente, avaliou-se a pressão da superfície interna da estrutura, face de baixo da cobertura. Que pode ser demonstrado através de gradientes de pressão, dessa forma, seguem abaixo o gradiente obtido por intermédio de dos cálculos computacionais, representados pela Figura 25:

Figura 25 - Gradiente de pressão interna caso 4



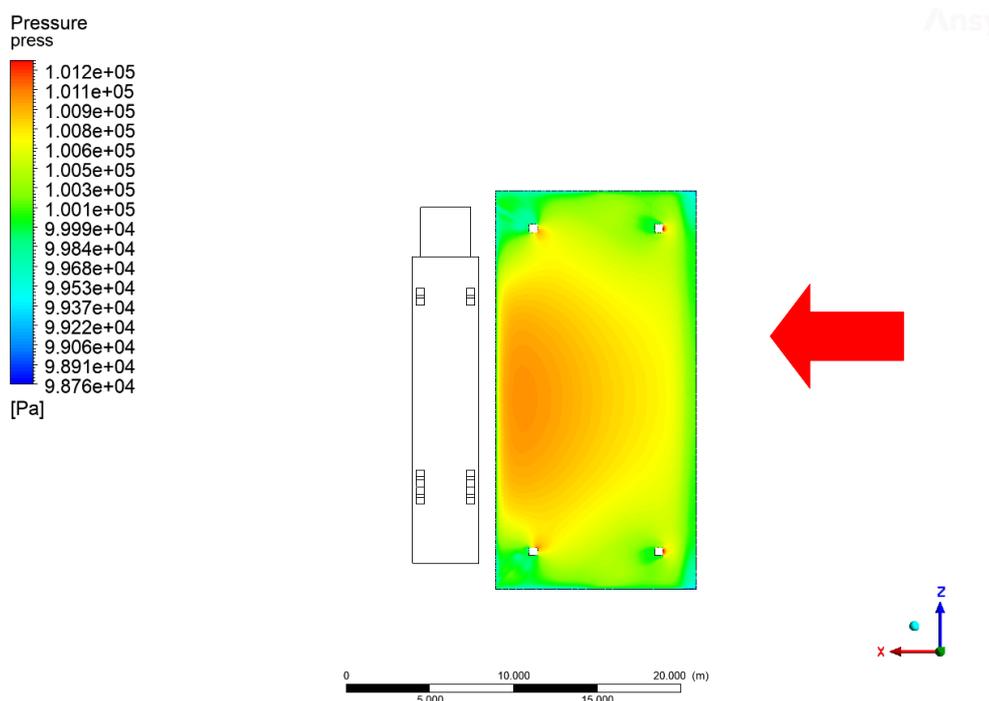
O sentido do escoamento é demonstrado pela seta vermelha, ou de maneira mais simples, da direita da imagem, para a esquerda.

Analisando a Figura 25 nota-se que o comportamento da pressão imposta sobre a cobertura é bem distinta comparada os casos anteriores, com uma distribuição mais homogênea de pressão. No caso a áreas mais próximas a barlavento apresentam alteração mais abruptas de pressão. A pressão máxima encontrada foi de 99.94kPa.

4.2.5 Caso 5

Para o quinto caso analisado, após redução de y^+ ao um valor abaixo do determinado anteriormente, avaliou-se a pressão da superfície interna da estrutura, face de baixo da cobertura. Que pode ser demonstrado através de gradientes de pressão, dessa forma, seguem abaixo o gradiente obtido por intermédio de dos cálculos computacionais, representados pela Figura 26:

Figura 26 - Gradiente de pressão interna caso 5



Fonte: Autoria própria (2023)

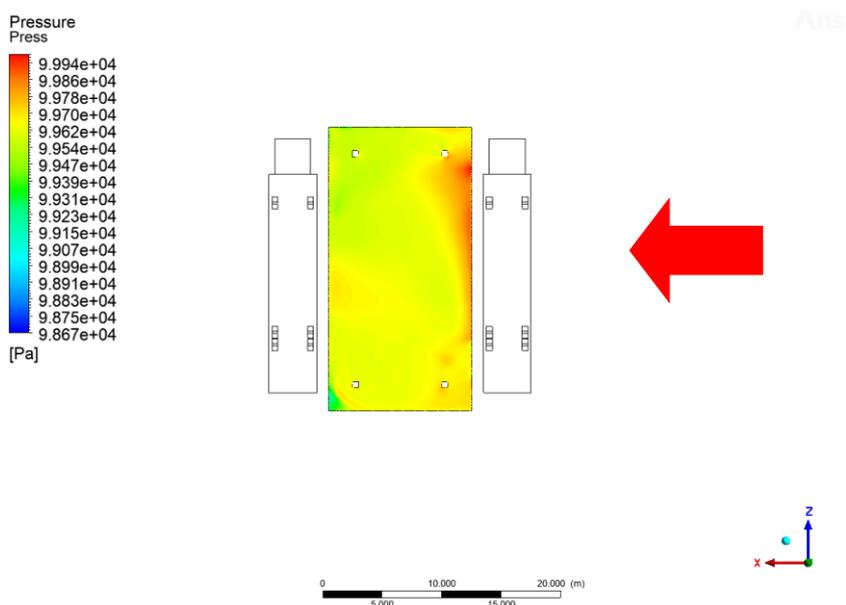
O sentido do escoamento é demonstrado pela seta vermelha, ou de maneira mais simples, da esquerda da imagem, para a direita.

Analisando a Figura 26 nota-se que o comportamento da pressão imposta sobre a cobertura é semelhante ao caso anterior. Entretanto com valores de pressão maiores próximo ao obstáculo e face sotavento, novamente as bordas laterais da estrutura recebe uma sollicitação menor comparado ao centro. A pressão máxima encontrada foi de 101.3 kPa.

4.2.5 Caso 6

Para o sexto e último caso analisado, após redução de y^+ ao um valor abaixo do determinado anteriormente, avaliou-se a pressão da superfície interna da estrutura, face de baixo da cobertura. Que pode ser demonstrado através de gradientes de pressão, dessa forma, seguem abaixo o gradiente obtido por intermédio de dos cálculos computacionais, representados pela Figura 27:

Figura 27 - Gradiente de pressão interna caso 6



Fonte: Autoria própria (2023)

O sentido do escoamento é demonstrado pela seta vermelha, ou de maneira mais simples, da direita da imagem, para a esquerda.

Analisando a Figura 27 nota-se que o comportamento da pressão imposta sobre a cobertura é semelhante ao caso 4 em que a pressão próxima a borda barlavento é maior, comparada a sotavento, ao contrário do casos 5 a distribuição de pressão não é concentrada no centro da cobertura tornando-a mais homogênea. A pressão máxima encontrada foi de 99.962 kPa

Comparando os resultados de todos os casos temos o seguinte, onde pode-se notar a variação do gradiente de pressão na face inferior da cobertura, nota-se uma tendência, de que quando o obstáculo está posicionado após a face sotavento, a variação do gradiente de pressão é maior. E dentre todos os casos, o que apresenta a maior pressão é o caso 5 com 101.3 kPa

Figura 28 - Variação do gradiente de pressão em cada caso

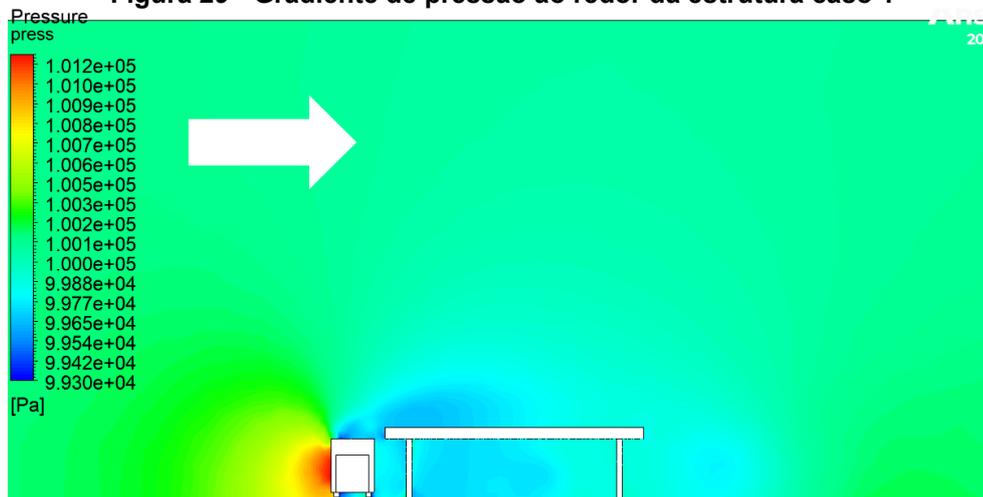


Fonte: Autoria própria (2023)

4.3 Resultado de pressão e velocidade ao redor da estrutura

4.3.1 Caso 1

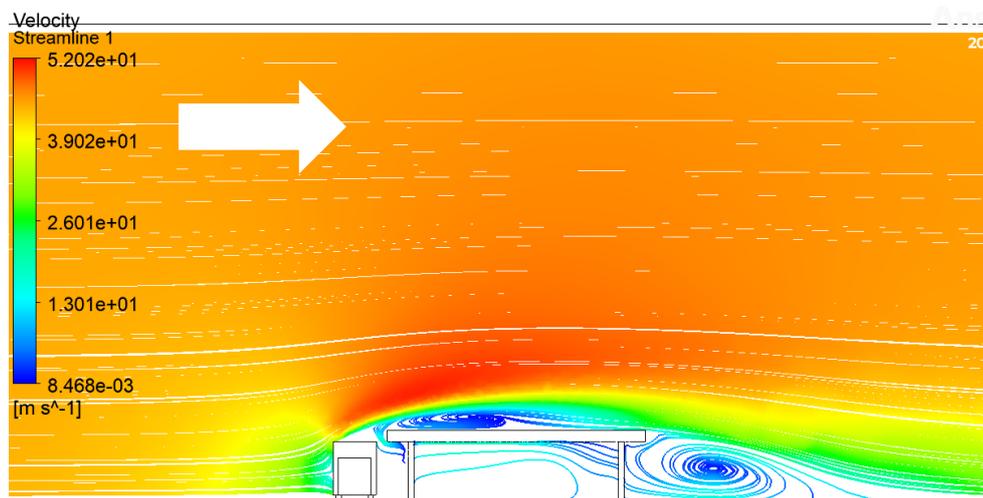
Figura 29 - Gradiente de pressão ao redor da estrutura caso 1



Fonte: Autoria própria (2023)

Conforme Figura 29 nota-se que neste primeiro caso uma zona de baixa pressão próxima a estrutura, com pressões menores na face superior da cobertura, próxima a borda barlavento.

Figura 30 - Linhas de escoamento de velocidade do caso 1

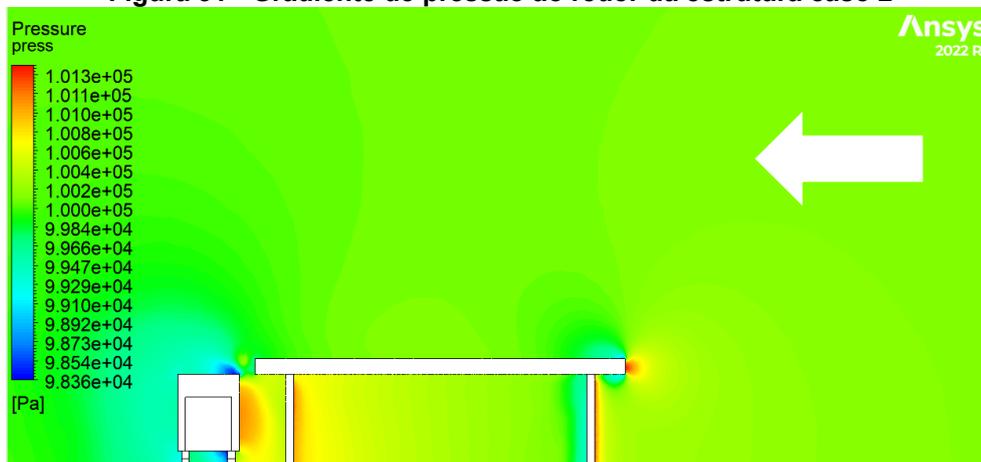


Fonte: Autoria própria (2023)

No mesmo local onde é identificado a região de baixa pressão na Figura 29, pode-se notar uma diminuição de velocidade na Figura 30, as linhas de escoamento presentes na Figura 30 demonstram um aumento da velocidade de escoamento logo acima dessa região de baixa pressão.

4.3.2 Caso 2

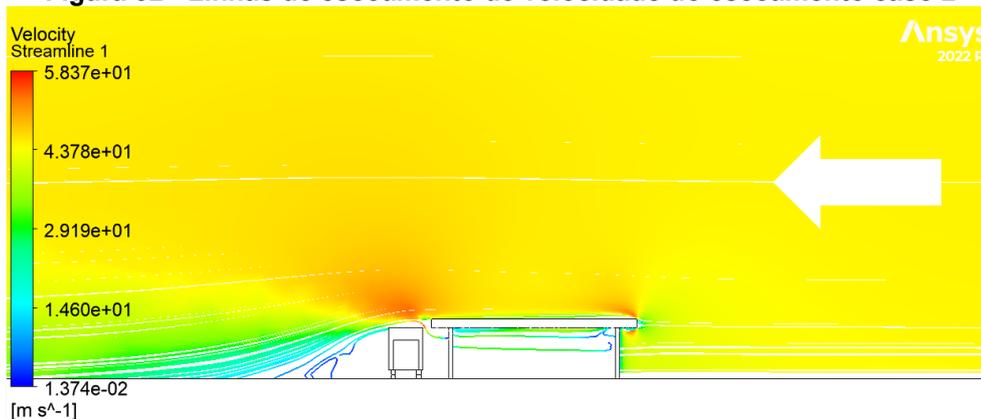
Figura 31 - Gradiente de pressão ao redor da estrutura caso 2



Fonte: Autoria própria (2023)

Neste caso, a pressão ao redor da estrutura é mais homogênea, tendo um aumento de pressão na face barlavento, ao contrário do caso 1 conforme Figura 31

Figura 32 - Linhas de escoamento de velocidade do escoamento caso 2

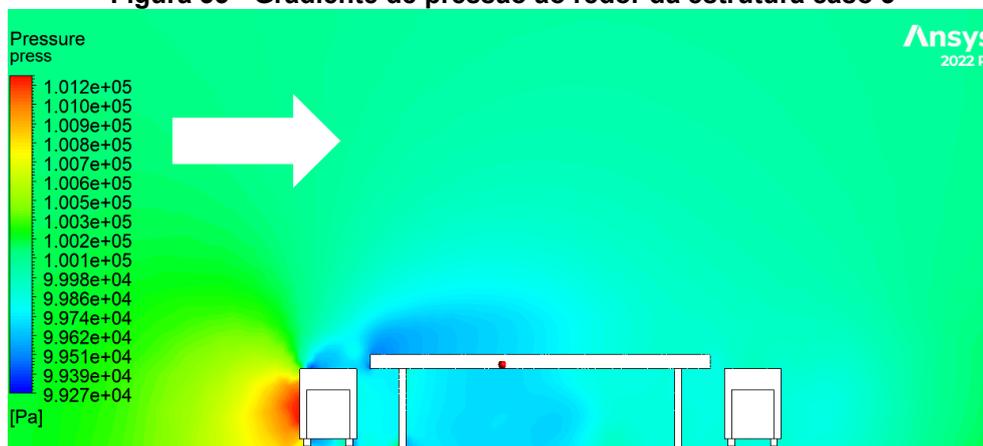


Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 32 nota-se um aumento de velocidade após a face sotavento, e uma redução de velocidade após o obstáculo

4.3.3 Caso 3

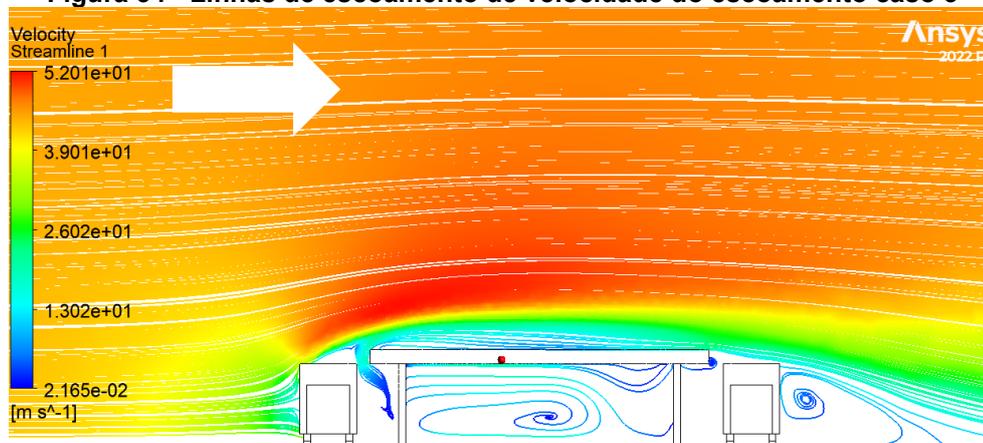
Figura 33 - Gradiente de pressão ao redor da estrutura caso 3



Fonte: Autoria própria (2023)

Similar ao apresentado no caso 1, porém a presença de um obstáculo após a estrutura fez com que a zona de baixa pressão fosse mais homogênea. Conforme a Figura 33.

Figura 34 - Linhas de escoamento de velocidade do escoamento caso 3

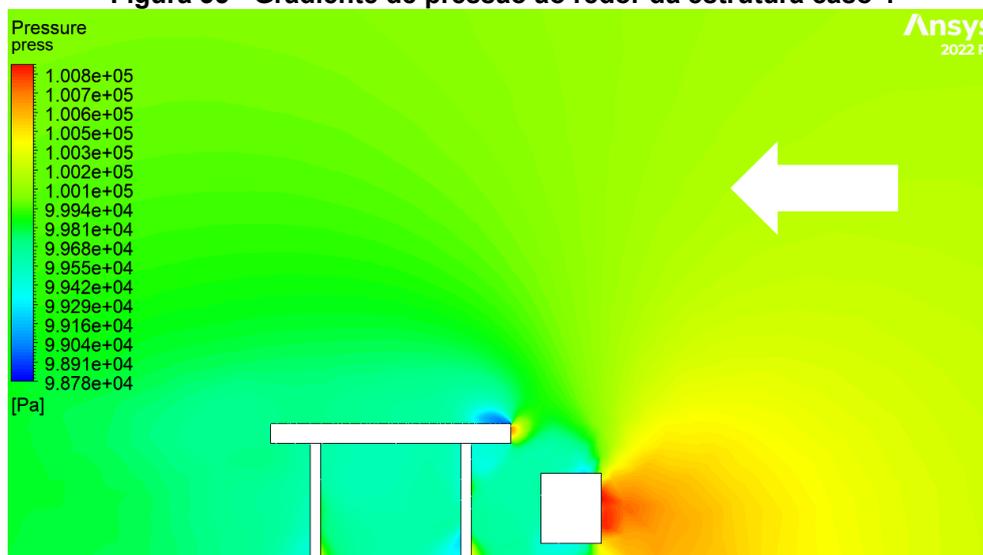


Fonte: Autoria própria (2023)

Como apresentado anteriormente, na Figura 34 as linhas de escoamento também são similares ao apresentado no caso um, a diferença consiste na recirculação de fluxo após a estrutura está mais afastada da mesma pela presença de um obstáculo nesta região.

4.3.4 Caso 4

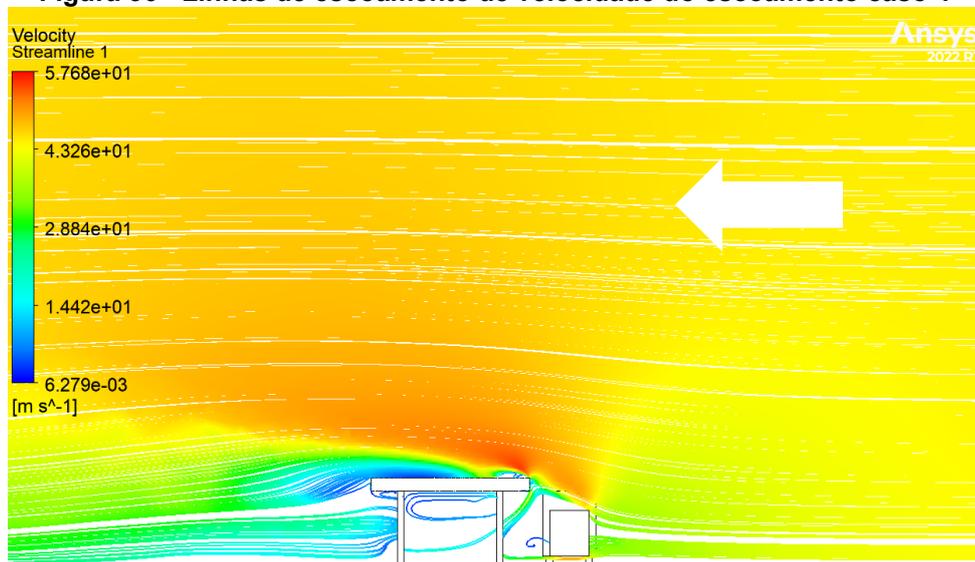
Figura 35 - Gradiente de pressão ao redor da estrutura caso 4



Fonte: Autoria própria (2023)

Analisando a Figura 35 similar ao caso 1, criando uma região de baixa pressão próxima a estrutura, porém com uma variação de pressão menor que a encontrada no caso 1.

Figura 36 - Linhas de escoamento de velocidade do escoamento caso 4

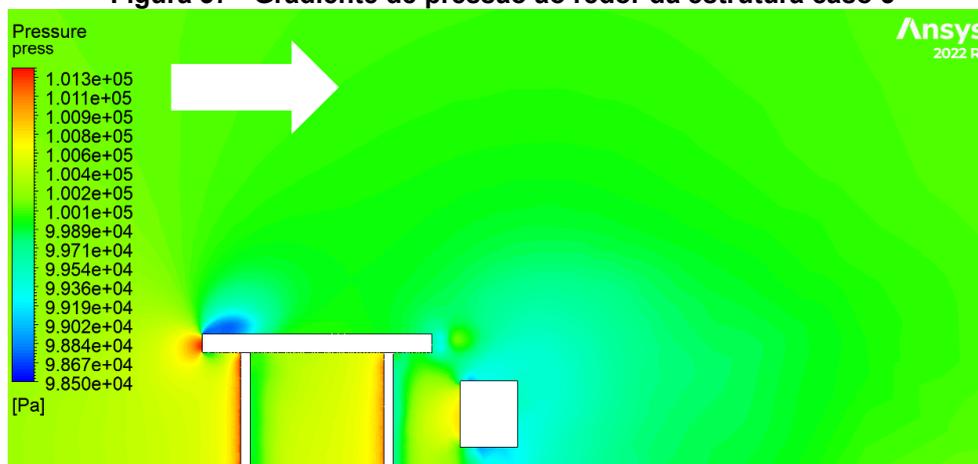


Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 36 nota-se novamente semelhanças com o caso 1, porém, no caso 4 não a presença de recirculação após a estrutura.

4.3.5 Caso 5

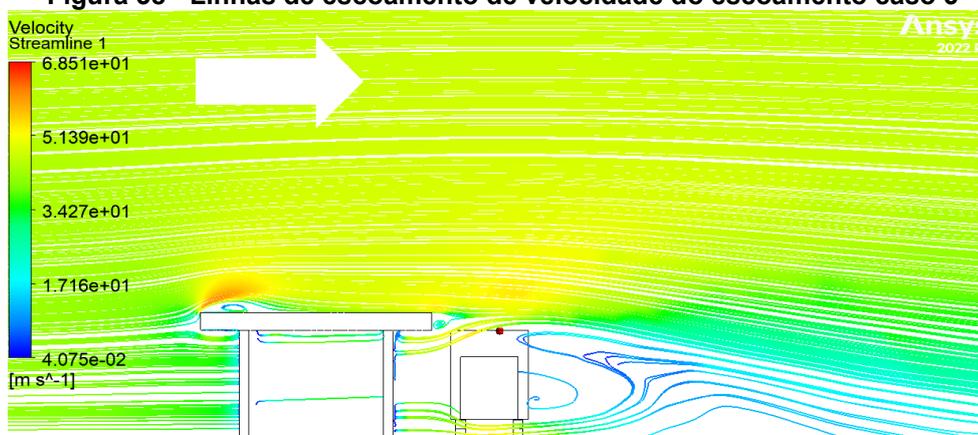
Figura 37 - Gradiente de pressão ao redor da estrutura caso 5



Fonte: Autoria própria (2023)

Observando a Figura 37, neste caso ocorre o inverso do caso anterior, que é um aumento da pressão entre os pórticos, tendo como região que sobre a maior pressão a face barlavento.

Figura 38 - Linhas de escoamento de velocidade do escoamento caso 5

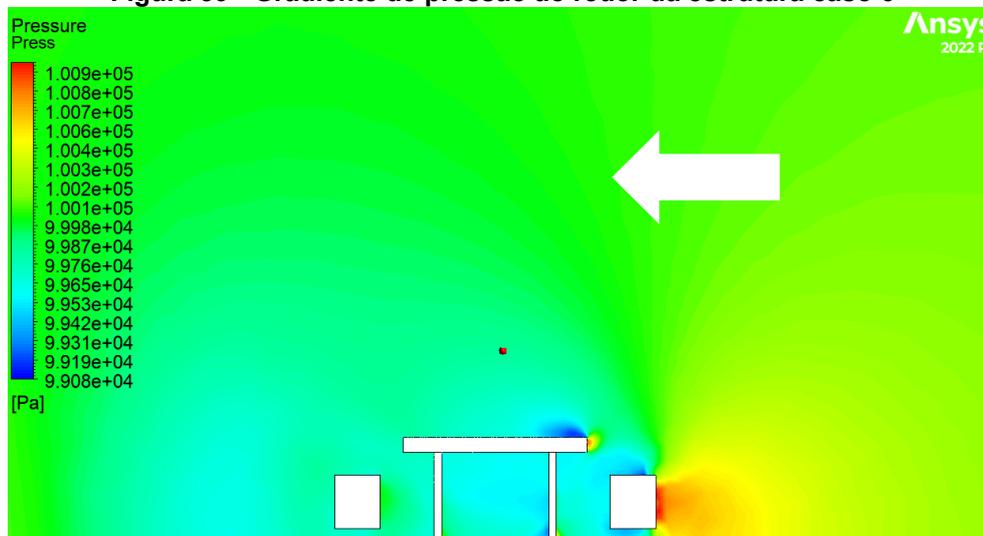


Fonte: Autoria própria (2023)

Já a velocidade de escoamento, demonstrada pela Figura 38, demonstra uma variação menor do que os casos anteriormente apresentados, sendo mais presente após o obstáculo.

4.3.6 Caso 6

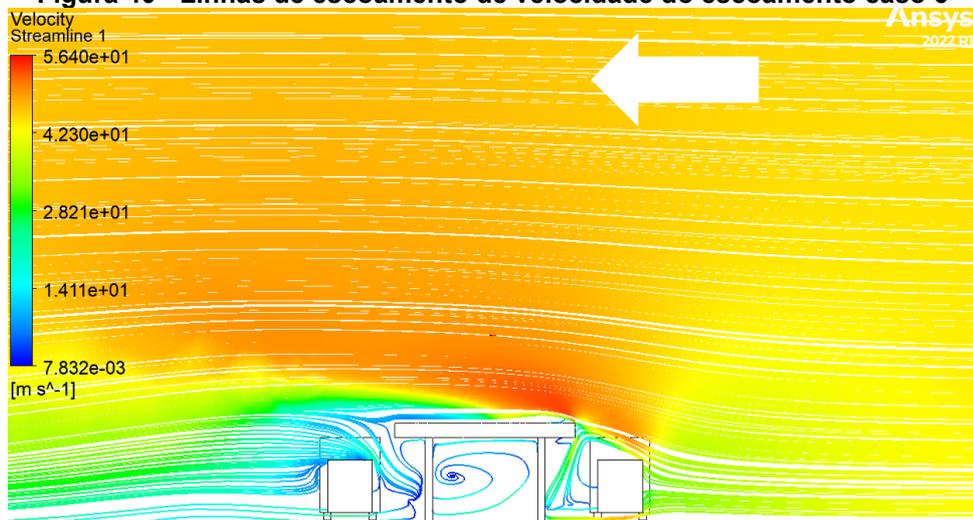
Figura 39 - Gradiente de pressão ao redor da estrutura caso 6



Fonte: Autoria própria (2023)

Neste último caso, a Figura 39 demonstra uma variação de pressão similar ao caso 3 e caso 1, com uma zona de baixa pressão ao redor da estrutura. Porém neste caso, a face barlavento da cobertura possui uma pressão maior do que nos casos anteriores.

Figura 40 - Linhas de escoamento de velocidade do escoamento caso 6



Fonte: Autoria própria (2023)

Analisando a Figura 40, é similar ao caso 3, porém nesse caso não temos recirculação após o obstáculo próximo a sotavento.

5 CONCLUSÕES

Após realizar uma análise minuciosa e completa, é possível concluir que tanto os objetivos gerais quanto os específicos estabelecidos para este trabalho foram alcançados com sucesso. Dessa forma, pudemos investigar a variação dos gradientes de pressão em uma cobertura plana isolada de acordo com o posicionamento de obstáculos ao seu redor.

Ao comparar os diferentes casos, observamos que as pressões máximas obtidas por meio das simulações foram bastante similares. A variação máxima observada nessas distintas condições de contorno não ultrapassou 1,5 kPa (um quilo e meio pascal).

Apesar de não haver grandes variações nos gradientes de pressão na face interna da cobertura, é possível extrair algumas conclusões em relação à influência do posicionamento do obstáculo. Ao analisar o gráfico 6, fica evidente que quando o obstáculo está localizado antes da estrutura, a variação do gradiente de pressão na face inferior da cobertura é menor. Por outro lado, quando o obstáculo está posicionado após a estrutura, a variação do gradiente de pressão nessa região é maior.

Outra constatação importante ao examinar os dados obtidos é que quando o escoamento incide perpendicularmente à estrutura (como nos casos 4, 5 e 6), o gradiente de pressão se torna mais homogêneo. Isso ocorre porque a distância entre os pórticos é reduzida nessa configuração.

Portanto, podemos entender que a influência do posicionamento de um obstáculo próximo a uma cobertura plana isolada pode ser avaliada da seguinte maneira: em situações em que é possível determinar a posição de algum obstáculo ao redor da cobertura, com base nos resultados deste estudo, a opção menos impactante seria utilizar dois obstáculos, como nos casos 3 e 6. Os casos 1 e 4 apresentaram valores de pressão inferiores aos casos mencionados anteriormente. No entanto, considerando que o escoamento do ar pode mudar de direção e sentido, essa estrutura que utilizou os casos 1 e 4 pode estar suscetível a fenômenos semelhantes aos casos mais críticos, como os casos 2 e 5.

As dimensões do obstáculo tiveram uma influência significativa na obtenção do gradiente de pressão. Portanto, em estudos futuros com um obstáculo distinto do apresentado, espera-se que o valor do gradiente de pressão seja alterado.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- BLESSMANN, Joaquim. Ação do Vento em Telhados. 1. ed. Porto Alegre: Ufrgs, 2003.
- BLESSMANN, Joaquim. Aerodinâmica das Construções. 3. ed. Porto Alegre: Ufrgs, 2011.
- CHUNG. T. J. Computational Fluid Dynamics. First published. Cambridge University Press. Cambridge, 2002
- FOX, A. T. McDonald e P. J. Pritchard, Introdução à Mecânica dos Fluidos, 8ª. Edição, LTC Editora, 2014
- GONÇALVES, Roberto Martins et al. Ação do Vento nas Edificações: Teoria e Exemplos. 2. ed. São Carlos: Departamento de Engenharia e Estruturas - Eesc, 2004.
- MAKOWSKI, Daniela Grau. Ação do Vento em Coberturas isoladas. 2004. 112 p. – UFRS, Porto Alegre
- BRASIL POSTOS. O novo espaço no mercado para postos bandeira branca.16/10/2019. Disponível em: <https://www.brasilpostos.com.br/noticias/bandeira-branca/novo-espaco-no-mercado-para-postos-bandeira-branca/>. Acesso em:22/05/2023
- PITTA, João Alfredo Azzi. Ações devidas ao vento em edificações. São Carlos: Editora da Universidade Federal de São Carlos, 2002. 47 p.
- PASQUAL, S. Um Estudo Sobre a Ação do Vento nas Estruturas de Membrana. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2011.
- SILVA, L. F. L., MEDRONHO, R. A., KLEIN, E. S. Análise da Formação do Profissional em Fluidodinâmica Computacional. I Congresso Brasileiro de Fluidodinâmica Computacional. Campina Grande. Jun. 2016.
- VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA. W. An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method. 1ed. Editora Longman Scientific & Technical, 1995.