



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**INFLUÊNCIA DA VIZINHANÇA NA DETERMINAÇÃO DAS
PRESSÕES DE VENTO EM EDIFICAÇÕES COM O USO DE
SOFTWARE CFD**

LEONARDO AQUILES BORGES SOUSA

São Cristóvão - SE

2021

LEONARDO AQUILES BORGES SOUSA

INFLUÊNCIA DA VIZINHANÇA NA DETERMINAÇÃO DAS PRESSÕES
DE VENTO EM EDIFICAÇÕES COM O USO DE SOFTWARE CFD

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^o.Dr. Emerson Figueiredo dos Santos

São Cristóvão - SE

2021

LEONARDO AQUILES BORGES SOUSA

**INFLUÊNCIA DA VIZINHANÇA NA DETERMINAÇÃO DAS
PRESSÕES DE VENTO EM EDIFICAÇÕES COM O USO DE
SOFTWARE CFD**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Sergipe como
requisito para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Nota:_____

Prof.º.Dr. Emerson Figueiredo dos Santos - Universidade Federal de Sergipe
(Orientador)

Nota:_____

Prof.º.Dr. Jorge Carvalho Costa - Universidade Federal de Sergipe
(Examinador)

Nota:_____

Prof.º. Me. Rodolfo Santos da Conceição - Instituto Federal de Sergipe
(Examinador)

São Cristóvão-SE, ____ de _____ de 2021

Aos meus pais, avós, familiares, amigos,
professores e a todos que se esforçam para fazer
do mundo um lugar melhor.

“A mente pura pode vencer todas as mentiras e
ilusões sem se perder. O coração puro pode
resistir ao veneno do ódio sem ser envenenado”
(Konietzko e DiMartino,2008)

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 2. OBJETIVOS | 14 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 3.1. Importância do estudo do vento | 14 |
| 3.2. Efeitos do vento nas edificações | 15 |
| 3.2.1. Deflexão vertical do vento | 17 |
| 3.2.2. Turbulência de esteira | 17 |
| 3.2.3. Efeito Venturi | 18 |
| 3.2.4. Desprendimento da camada limite | 19 |
| 3.2.5. Desprendimento de vórtices | 21 |
| 3.2.6. Galope | 21 |
| 3.2.7. Martelamento | 22 |
| 3.2.8. Golpe | 22 |
| 3.2.9. Drapejamento (<i>flutter</i>) | 23 |
| 3.2.10. Torção | 23 |
| 3.3. Formulação matemática para fluídos | 24 |
| 3.4. Ensaio em túneis de vento | 25 |
| 3.5. Abordagem normativa | 26 |
| 3.5.1. Determinação da velocidade característica do vento | 27 |
| 3.5.2. Determinação das forças de arrasto | 30 |
| 3.6. Fluidodinâmica computacional – <i>Softwares</i> CFD | 32 |
| 3.6.1. Autodesk CFD | 34 |
| 3.7. Breve comparação entre Ensaio de túnel de vento e CFD | 37 |
| 4. METODOLOGIA | 38 |
| 4.1. Cenário I | 40 |
| 4.1.1. Simulação 1.1: Edifício isolado | 41 |

| | |
|--|----|
| 4.1.2. Simulação 1.2: Edifício com presença de rugosidade do terreno | 41 |
| 4.2. Cenário II | 43 |
| 4.2.1. Simulação 2.1: Edifícios paralelos com a maior dimensão sobreposta ... | 43 |
| 4.2.2. Simulação 2.2: Edifícios paralelos sem sobreposição de dimensão | 44 |
| 4.2.3. Simulação 2.3: Três edifícios sem sobreposição de dimensões | 45 |
| 4.2.4. Simulação 2.4: Representação de <i>urban canyon</i> (desfiladeiro urbano) ... | 46 |
| 4.3. Cenário III | 48 |
| 4.3.1. Simulação 3.1: Edificação vizinha de altura $0,75. h$ | 48 |
| 4.3.2. Simulação 3.2: Edificação vizinha de altura $0,5. h$ | 49 |
| 4.3.3. Simulação 3.3: Edificação vizinha de altura $0,25. h$ | 50 |
| 5. RESULTADOS | 55 |
| 5.1. Simulação 1.1 | 55 |
| 5.2. Simulação 1.2 | 58 |
| 5.3. Simulação 2.1 | 60 |
| 5.4. Simulação 2.2 | 63 |
| 5.5. Simulação 2.3 | 65 |
| 5.6. Simulação 2.4 | 66 |
| 5.7. Simulação 3.1 | 69 |
| 5.8. Simulação 3.2 | 71 |
| 5.9. Simulação 3.3 | 72 |
| 6. CONCLUSÕES | 74 |
| 7. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS | 76 |
| REFERÊNCIAS | 77 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Colapso de estrutura metálica após a passagem de vendaval..... | 14 |
| Figura 2 – Construção do edifício Real Class | 15 |
| Figura 3 – Regime de escoamento de corpo isolado | 16 |
| Figura 4 – Regime de escoamento deslizante | 16 |
| Figura 5 – Regime de escoamento de interferência de esteira..... | 16 |
| Figura 6 – Deflexão vertical do vento | 17 |
| Figura 7 – Turbulência de esteira | 18 |
| Figura 8 – Efeito Venturi | 18 |
| Figura 9 – Desfiladeiro urbano em Nova Iorque | 19 |
| Figura 10 – Esquema representativo da camada limite de um fluido..... | 20 |
| Figura 11 – Descolamento da camada limite..... | 20 |
| Figura 12 – Desprendimento de vórtices. | 21 |
| Figura 13 – Efeito galope | 22 |
| Figura 14 – Efeito de golpe | 22 |
| Figura 15 – Drapejamento em estruturas..... | 23 |
| Figura 16 – Colapso da ponte Tacoma Narrows | 23 |
| Figura 17 – Edifício solicitado à torção..... | 24 |
| Figura 18 – Edifícios em teste no túnel de vento..... | 26 |
| Figura 19 – Isopletas da velocidade básica do vento..... | 27 |
| Figura 20 – Coeficientes de arrasto para edificações paralelepípedicas -Baixa turbulência | 31 |
| Figura 22 – Coeficientes de arrasto para edificações paralelepípedicas -Alta turbulência | 32 |
| Figura 23 – Tela inicial do Autodesk CFD..... | 34 |
| Figura 24 – Exemplo de modelagem | 35 |
| Figura 25 – Visualização de resultados | 36 |
| Figura 26 – Trajetória de partículas | 36 |
| Figura 27 – Modelo utilizado nos ensaios de túnel de vento..... | 37 |
| Figura 28 – Comparação CFD e ensaio de túnel de vento para vento a 0°..... | 38 |
| Figura 29 – Planta baixa do edifício utilizado | 39 |
| Figura 30 – Vista em corte da edificação | 39 |
| Figura 31 – Modelo tridimensional do edifício de referência | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 32 – Simulação 1.1: Modelo tridimensional | 41 |
| Figura 33 – Simulação 1.2: Vista em planta..... | 42 |
| Figura 34 – Simulação 1.2: Modelo tridimensional | 42 |
| Figura 35 – Simulação 2.1: Vista em planta..... | 43 |
| Figura 36 – Simulação 2.1: Modelo tridimensional | 44 |
| Figura 37 – Simulação 2.2: Vista em planta..... | 44 |
| Figura 38 – Simulação 2.2: Modelo tridimensional | 45 |
| Figura 39 – Simulação 2.3: Vista em planta..... | 45 |
| Figura 40 – Simulação 2.3: Modelo tridimensional | 46 |
| Figura 41 – Simulação 2.4: Vista em planta..... | 47 |
| Figura 42 – Simulação 2.4: Modelo tridimensional | 47 |
| Figura 43 – Simulação 3.1: Vista em corte..... | 48 |
| Figura 44 – Simulação 3.1: Modelo tridimensional | 49 |
| Figura 45 – Simulação 3.2: Vista em corte..... | 49 |
| Figura 46 – Simulação 3.2: Modelo tridimensional | 50 |
| Figura 47 – Simulação 3.3: Vista em corte..... | 50 |
| Figura 48 – Simulação 3.3: Modelo tridimensional | 51 |
| Figura 49 – Dimensões em planta do túnel de vento..... | 52 |
| Figura 50 – Modelo envolto por túnel de vento | 52 |
| Figura 51 – Modelo após das condições de contorno..... | 53 |
| Figura 52 – Eixos cartesianos do modelo | 54 |
| Figura 53 – Simulação 1.1: Perfil de velocidade de V_y | 55 |
| Figura 54 - Simulação 1.1: Pressões atuantes..... | 56 |
| Figura 55 – Simulação 1.1: Efeito esteira..... | 56 |
| Figura 56 – Simulação 1.1: Forças de vento..... | 57 |
| Figura 57 – Simulação 1.2: perfil de velocidade de V_y | 58 |
| Figura 58 – Simulação 1.2: Pressões atuantes | 59 |
| Figura 59 – Simulação 1.2: Forças de vento..... | 60 |
| Figura 60 – Simulação 2.1: Perfil de velocidade de V_y | 61 |
| Figura 61 – Simulação 2.1: Pressões atuantes | 62 |
| Figura 62 – Simulação 2.1: Pressões atuantes no Edifício de referência | 62 |
| Figura 63 – Simulação 2.2: perfil de velocidade de V_y | 63 |
| Figura 64 – Simulação 2.2: perfil de velocidade de V_y no Edifício de referência..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 65 – Simulação 2.2: Pressões atuantes | 64 |
| Figura 66 – Simulação 2.3: perfil de velocidade de V_y | 65 |
| Figura 67 – Simulação 2.3: pressões atuantes | 66 |
| Figura 68 – Simulação 2.4: perfil de velocidade de V_y | 67 |
| Figura 69 – Simulação 2.4: perfil de velocidade de V_y : vista longitudinal | 67 |
| Figura 70 – Simulação 2.4: Pressões atuantes -Vista 1 | 68 |
| Figura 71 – Simulação 2.4: Pressões atuantes - Vista 2 | 68 |
| Figura 72 – Simulação 3.1: perfil de velocidade de V_y | 69 |
| Figura 73 – Simulação 3.1: Pressões atuantes | 70 |
| Figura 74 – Simulação 3.2: Perfil de velocidade de V_y | 71 |
| Figura 75 – Simulação 3.2: Pressões atuantes - Vista 2 | 72 |
| Figura 76 – Simulação 3.3: Perfil de velocidade de V_y | 72 |
| Figura 77 – Simulação 3.3: Pressões atuantes | 73 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Parâmetros meteorológicos | 29 |
| Tabela 2 – Valores mínimos para o fator estatístico..... | 30 |
| Tabela 3 – Simulação 1.1: Velocidade característica, pressão e força distribuída | 57 |
| Tabela 4 – Simulação 1.2: Velocidade característica, pressão e força distribuída | 59 |

Resumo

No âmbito da engenharia de estruturas, o vento caracteriza-se como uma ação variável capaz de causar efeitos danosos às edificações e até mesmo levá-las ao colapso. Os efeitos do vento são, em especial, potencialmente nocivos quando se trata de construções altas e/ou esbeltas. Tendo em vista que o ar é um fluido e que seu escoamento é influenciado por diversos fatores – tais como a presença de obstáculos nas áreas adjacentes, as dimensões e a forma da edificação –, o presente trabalho aborda a influência de diferentes condições de vizinhança nos valores de pressão atuantes em uma edificação. Inicialmente, abordam-se os efeitos causados pelo vento quando há interação com obstáculos; na sequência discute-se sobre os ensaios de túnel de vento e simulação CFD para a resolução de problemas que envolvam escoamento de vento; em seguida faz-se a apresentação da metodologia normativa para a determinação das forças devidas ao vento em edificações. Na análise, foram modeladas nove configurações de vizinhança, comuns em centros urbanos, que seguiram para análise fluidodinâmica com o auxílio do *software* Autodesk CFD. Os resultados obtidos foram pós-processados e representados na forma de perfis de velocidade e gráficos tridimensionais de pressão estática. Finalmente, cada simulação foi analisada individualmente e dois dos casos simulados tiveram seus resultados comparados com os valores obtidos de acordo com procedimento da NBR 6123/1988.

Palavras-Chave: Vento, vizinhança, fluidodinâmica computacional, CFD.

Abstract

In the scope of structural engineering, wind is characterized as a variable load capable of causing harmful effects to buildings and being capable of leading them to collapse. Wind effects are especially dangerous when it comes to tall and/or slender buildings. Considering that air is a fluid and its flow is influenced by several factors – such as the presence of obstacles in adjacent areas, dimensions and shape of the building–, the present work aims to analyze the influence of different neighborhood conditions on the pressure values acting in a building. First, the effects caused by wind interaction with solid obstacles are explored, wind tunnel tests and CFD simulation for solving problems involving wind flow are discussed; in the sequence, the normative methodology for the determination of wind forces in buildings is presented. In analysis, nine neighborhood configurations, common in urban centers, were modeled, followed by fluid dynamic analysis using an Autodesk CFD software. The results obtained were post-processed and represented in the form of velocity profiles and three-dimensional static pressure graphs. Lastly, each simulation was individually analyzed and two of the simulated cases had their results compared with the values obtained according to the procedure of NBR 6123/1988.

Keywords: Wind, neighborhood, computational fluid dynamics, CFD.

1. INTRODUÇÃO

A garantia de segurança e conforto dos usuários de edificações são as principais preocupações da engenharia de estruturas. Para tanto, parte fundamental do projeto estrutural consiste na determinação dos esforços que atuarão na edificação analisada. Cargas como o peso próprio, os carregamentos de utilização e as sobrecargas decorrentes de equipamentos e usos especiais são abordados por normas específicas - como a NBR 6120/2019 -, servindo de referência para os projetistas. No entanto, quando as cargas atuantes são aleatórias, a complexidade da determinação dos esforços solicitantes aumenta consideravelmente.

Verifica-se que, em se tratando de edificações altas e esbeltas, a determinação das forças de vento é de grande importância, dado o caráter desestabilizante de sua componente horizontal. Estruturas como galpões e hangares, por conta de seu reduzido peso próprio, também se tornam mais susceptíveis aos efeitos danosos do vento.

Além do caráter aleatório do vento, soma-se o fato de o ar ser classificado como um fluido. Tal característica dificulta a determinação de parâmetros como velocidade e pressão, por conta da complexidade matemática inerente ao estudo dessas substâncias.

Tendo como objetivo auxiliar engenheiros a estudar a interação do ar com sólidos, os ensaios de túnel de vento figuram como uma ferramenta importante para analisar o comportamento de determinado modelo ante a presença de ventos e, aliado a isso, fornecer parâmetros úteis para a etapa de dimensionamento. Além disso, a partir da década de 60, as simulações computacionais de problemas envolvendo fluidos também passaram a ser amplamente utilizadas no âmbito da engenharia.

Apesar de existir uma norma para auxiliar na determinação das cargas devidas ao vento em edificações (NBR 6123/1988), suas aplicações são restritas a determinadas geometrias e alturas da edificação, havendo também limitações no que tange a condições de rugosidade do terreno e presença de construções vizinhas.

Reiterando a importância da análise de vento para a área da engenharia de estruturas, o presente trabalho utiliza a análise fluidodinâmica computacional (*computational fluid dynamics*) – abreviada pela sigla CFD – para analisar o comportamento do ar e sua interação com uma edificação de estudo. São simuladas diferentes condições de vizinhança, rugosidade do terreno e alturas de obstáculos, visando representar situações do meio urbano.

Após a simulação, são obtidas representações gráficas e relatórios de dados para pressão, velocidade e força do vento. Os resultados obtidos são então analisados para os diferentes cenários modelados.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho objetiva analisar a influência das mudanças de vizinhança do terreno no que se diz respeito aos perfis de velocidade, pressão e força do vento em uma edificação, com o auxílio de *software* CFD.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Importância do estudo do vento

Não são incomuns casos de edificações que, após a passagem de ventos mais fortes, sofrem danos (destelhamento, deslocamento de fachada, deslocamentos desconfortáveis para usuários) ou até mesmo chegaram à ruína total ou parcial da estrutura (Figura 1).



Figura 1 – Colapso de estrutura metálica após a passagem de vendaval

Fonte: NDM (2021)

Um exemplo de colapso estrutural devido às forças de vento ocorreu em 2011, na construção do edifício Real Class, localizado na cidade de Belém-PA. O prédio contava com 35 pavimentos e ruiu após a passagem de ventos com velocidades na faixa de 39 m/s. A perícia constatou que uma das causas do acidente foi o subdimensionamento da estrutura para resistir a esforços horizontais causados pelos ventos da região e, além disso, a não consideração dos efeitos de segunda ordem causados pelo deslocamento horizontal.



Figura 2 – Construção do edifício Real Class

Fonte: OLIVEIRA e RIBEIRO (2018)

Diante do exposto, é de grande interesse da engenharia estrutural o estudo dos efeitos causados pelos ventos, em especial quando se trata de regiões com incidências de ventos fortes e quando são projetadas estruturas altas e/ou esbeltas.

3.2. Efeitos do vento nas edificações

De forma geral, as construções civis constituem obstáculos para o fluxo do ar, influenciando diretamente nas características do seu escoamento. Parâmetros como altura, dimensões em planta e formato das edificações colaboram para o surgimento de fenômenos aerodinâmicos como regiões de baixa velocidade, pressões de sucção, vórtices e zonas de turbulência.

Segundo Cook (1990 *apud* LIMA E SANTOS, 2019), no momento em que há a perturbação do escoamento por parte de uma edificação, existem três regimes de escoamento possíveis: de corpo isolado, deslizante e de interferência de esteira.

- Escoamento de corpo isolado

Nesse escoamento, as construções encontram-se afastadas por uma distância x suficientemente grande, fazendo com que o vento atue de maneira independente em cada edifício. Segundo Carpeggiani (2004 *apud* LIMA E SANTOS, 2019), o vento atua de maneira independente em cada edifício, como se as edificações estivessem isoladas, havendo a formação completa da esteira para as duas construções.

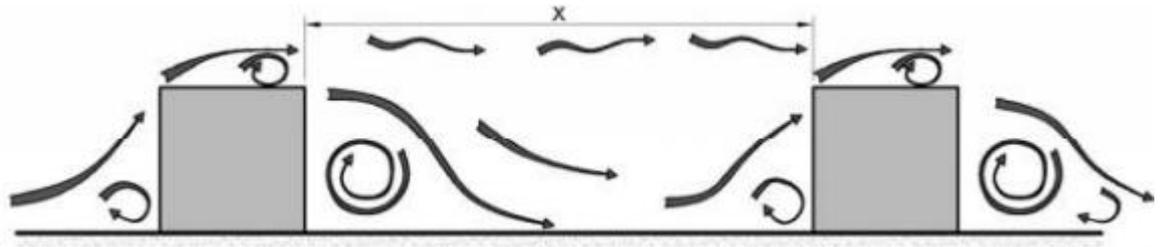


Figura 3 – Regime de escoamento de corpo isolado

Fonte: CARPEGGIANI (2004 *apud* LIMA E SANTOS, 2019)

- Escoamento deslizando

As edificações estão próximas o suficiente para formação de um vórtice estável entre elas, fazendo com que o vento flua pelo topo das estruturas como se fossem um único obstáculo. A edificação a sotavento, por estar situada na esteira do primeiro obstáculo, apresenta-se sujeita à ação de forças muito pequenas (CARPEGGIANI, 2004 *apud* LIMA E SANTOS, 2019),

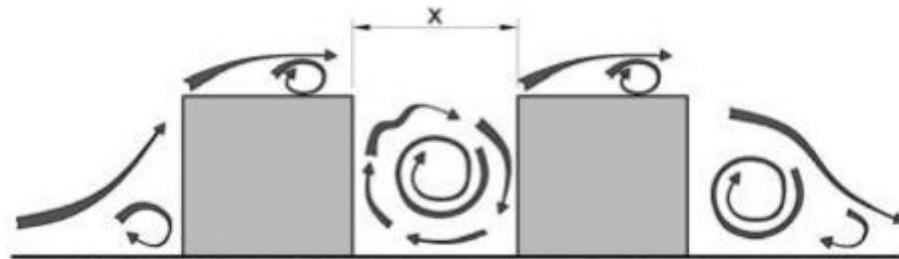


Figura 4 – Regime de escoamento deslizando

Fonte: CARPEGGIANI (2004 *apud* LIMA E SANTOS, 2019)

- Escoamento de interferência de esteira

O último tipo de regime de escoamento constitui uma situação intermediária entre os casos anteriores em que a distância x é demasiadamente pequena para a formação completa da esteira e grande demais para que haja a estabilização do vórtice formado (CARPEGGIANI, 2004 *apud* LIMA E SANTOS, 2019).

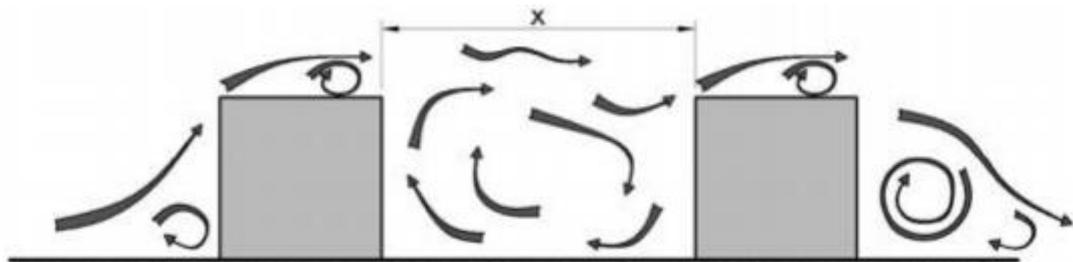


Figura 5 – Regime de escoamento de interferência de esteira

Fonte: CARPEGGIANI (2004 *apud* LIMA E SANTOS, 2019)

As construções vizinhas também são relevantes no estudo do vento. Segundo Gonçalves *et al* (1994), a influência de edifícios adjacentes no campo aerodinâmico de uma edificação pode induzir a alterações significativas na velocidade do vento que irá incidir sobre a construção analisada, modificações nas pressões atuantes, desconforto a transeuntes nas regiões próximas da edificação e, em alguns casos, pode agir a favor da segurança estrutural por conta da redução das forças de vento.

Alguns dos efeitos causados pela vizinhança são descritos a seguir.

3.2.1. Deflexão vertical do vento

Ocorre quando o vento encontra um obstáculo a barlavento da edificação de estudo, ocasionando uma mudança de direção em parte do escoamento e gerando uma zona de maior velocidade próxima do terreno (Figura 6), podendo criar zonas de sucção na região (GONÇALVES *et al*, 1994).

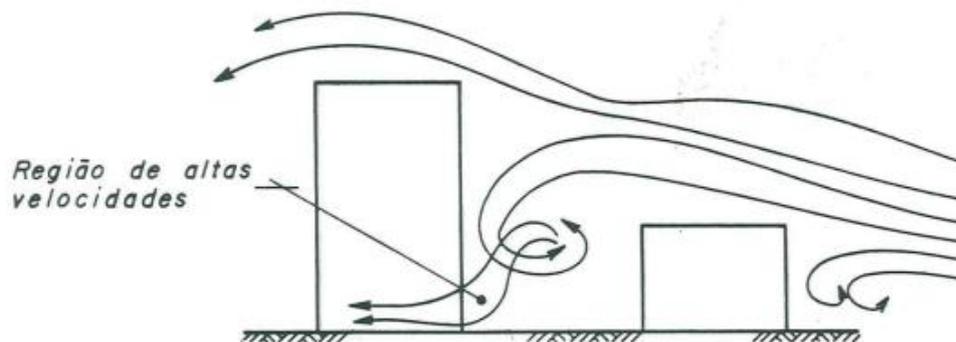


Figura 6 – Deflexão vertical do vento

Fonte: GONÇALVES *et al* (1994)

3.2.2. Turbulência de esteira

Segundo Gonçalves *et al* (1994), quando há, a barlavento de uma edificação analisada, a presença de uma outra construção, a incidência de ventos sobre a última faz com que a esteira criada a sotavento cause efeitos dinâmicos e alterações na pressão atuante na primeira.

A Figura 7 ilustra o fenômeno descrito.

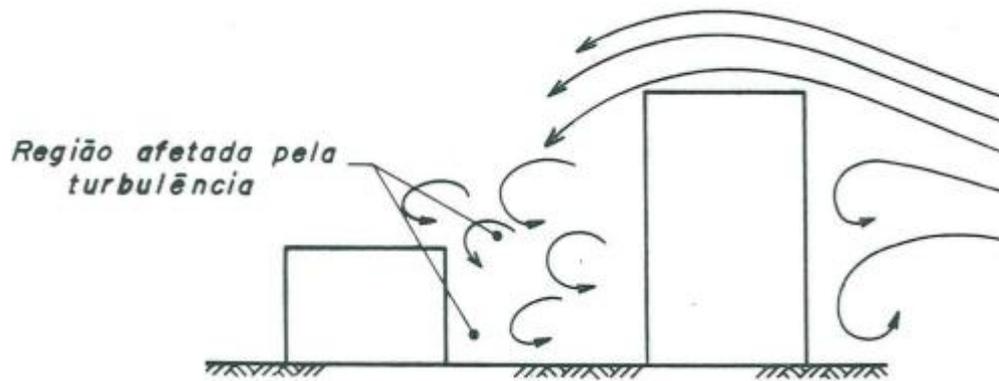


Figura 7 – Turbulência de esteira

Fonte: GONÇALVES *et al* (1994)

3.2.3. Efeito Venturi

Conforme define a NBR 6123/1988, que trata do vento em edificações, a presença de edificações vizinhas pode causar o afunilamento do vento, acelerando-o (Figura 8). Esse efeito é influenciado pelas dimensões, formas e orientação das construções adjacentes. Conforme salienta Gonçalves *et al* (1994), edificações muito próximas com faces paralelas podem experimentar valores altos de sucção.

A manifestação do efeito Venturi é mais perceptível em centros urbanos. A alta densidade de edificações, em locais conhecidos como *urban canyons* (desfiladeiros urbanos), como mostrado na Figura 9.

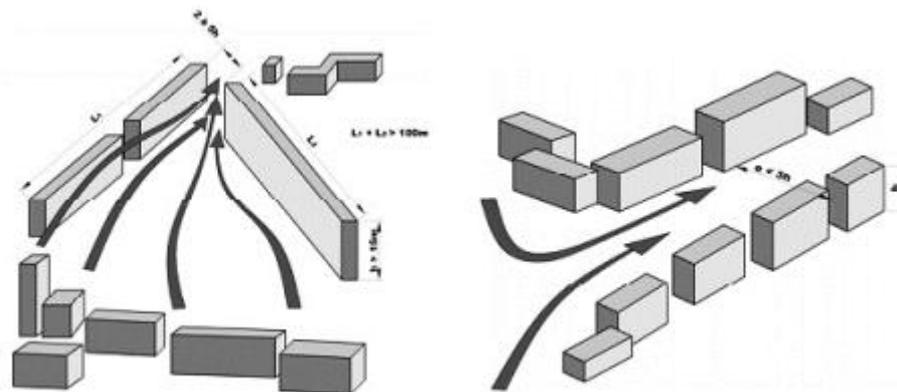


Figura 8 – Efeito Venturi

Fonte: CARPEGIANNI *et al* (2004 *apud* LIMA e SANTOS ,2019)



Figura 9 – Desfiladeiro urbano em Nova Iorque

Fonte: MESKENS (2009)

Além dos efeitos de vizinhança, o vento induz fenômenos dinâmicos que não podem ser desprezados pois, conforme expõe Gonçalves *et al* (1994), os efeitos causados aumentam consideravelmente as solicitações, elevando a possibilidade de ruína estrutural.

3.2.4. Desprendimento da camada limite

De maneira preliminar à explicação do efeito, é válido definir o conceito de camada limite.

Quando um fluido escoar sobre um sólido, uma parte do primeiro adere-se à superfície do último, resultando em uma velocidade nula nos pontos de contato. Conforme o fluido se afasta dessa região de contato, a sua velocidade aumenta. Prandtl (1904 *apud* Blessman,1990), demonstrou que, para fluidos de baixa viscosidade, como água e ar, os efeitos da viscosidade são significantes apenas em uma fina camada sobre a superfície sólida, sendo pequenos e passíveis de serem desprezados em pontos mais distantes desta. A fina camada descrita é denominada camada limite.

A Figura 10 ilustra a forma da camada limite.

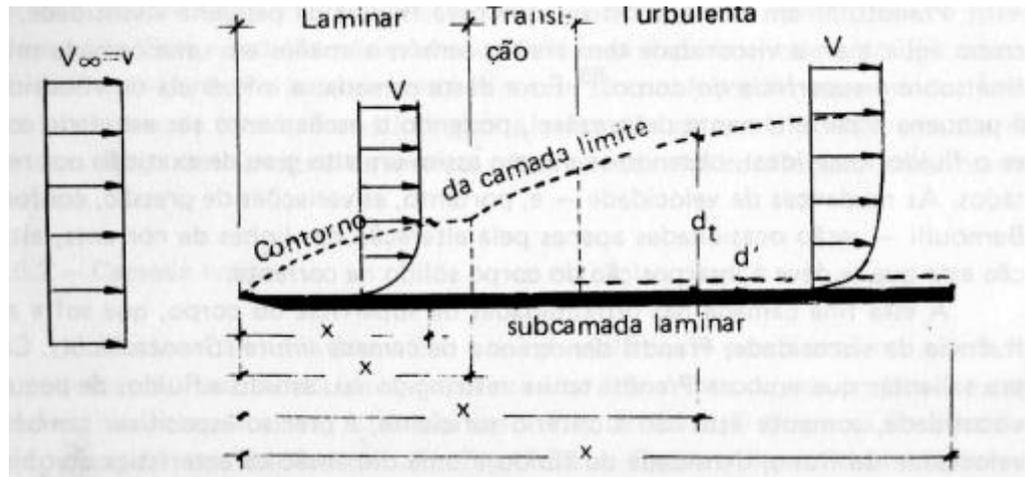


Figura 10 – Esquema representativo da camada limite de um fluido

Fonte: BLESSMANN (1990)

Na Figura 10, um fluido escoa com velocidade constante igual a v e aproxima-se de uma placa sólida fina. O ponto de contato marca o início da camada limite. Em um primeiro momento, o escoamento é laminar, podendo ser turbulento caso a superfície de contato seja demasiadamente áspera (BLESSMANN, 1990). Em seguida, há uma zona de transição, caracterizada por velocidades variáveis e por um aumento acentuado de espessura da camada limite. Finalmente, desenvolve-se uma região turbulenta que, caso a superfície da placa não sofra alterações, prolongar-se-á indefinidamente.

Conforme o exposto, a Figura 11 ilustra o mecanismo de desprendimento (ou descolamento) da camada limite. Considerando um escoamento não viscoso, partículas de fluido são aceleradas entre os pontos D e E, e desaceleradas de E até F. A pressão decresce entre D e E e aumenta novamente entre E e F (RIBEIRO, 2002).

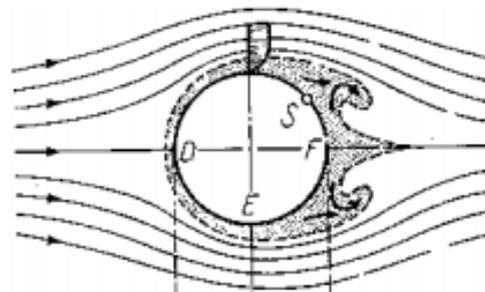


Figura 11 – Descolamento da camada limite

Fonte: RIBEIRO (2002)

Segundo Ribeiro (2002), as forças de atrito na camada limite são elevadas e, devido ao fato de uma partícula de fluido consumir muita energia cinética para se deslocar de D até E, a energia restante é insuficiente para superar o aumento de pressão entre E e F e, por não

conseguir se mover ao longo dessa trajetória, a partícula fica eventualmente presa nessa região. A partir desse momento, a partícula de fluido fica sujeita à ação da pressão externa à camada limite, podendo resultar em um movimento contrário ao sentido do escoamento.

Conforme define Blessmann (1990), o fenômeno do descolamento da camada limite é o responsável pelo aparecimento de zonas de pressão menor, geralmente negativas, a sotavento do desprendimento (regiões de esteira). Regiões a barlavento também podem ser afetadas, mas em escala inferior. Com isso, as pressões não mais se equilibram, gerando uma força resultante denominada de resistência (ou força) de forma.

3.2.5. Desprendimento de vórtices

O desprendimento de vórtices pode acontecer a sotavento da edificação, levando ao surgimento de forças periódicas e produzindo vibrações transversais à direção do vento, sendo particularmente perigoso quando a sua frequência de desprendimentos alternados fica próxima à frequência natural da estrutura. (GONÇALVES *et al*, 1994). Vale ressaltar que os desprendimentos de vórtices podem ocorrer de forma simétrica (Figura 12), pois dependem da velocidade do fluido e da forma do obstáculo.

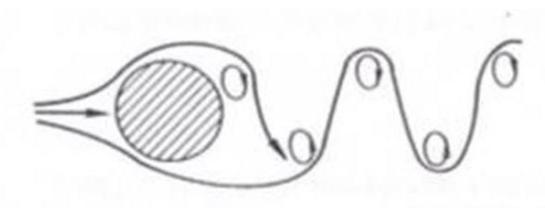


Figura 12 – Desprendimento de vórtices.

Fonte: BLESSMANN (1998)

3.2.6. Galope

Gonçalves *et al* (1994) descreve que estruturas muito leves e de baixo amortecimento, tais como pilares de seção vazada, pontes pênses e viadutos de grande altura, estão sujeitos a esse efeito, que tem como característica induzir a estrutura a oscilações transversais à direção do vento causando instabilidade dinâmica. A amplitude das oscilações aumenta conforme a velocidade do vento.

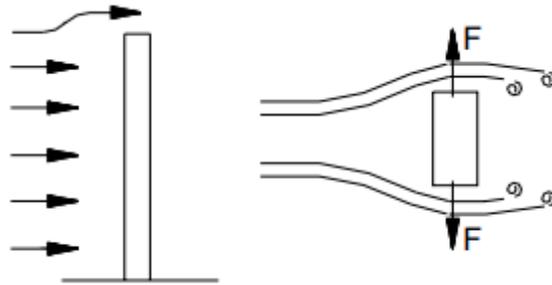


Figura 13 – Efeito galope

Fonte: PRAVIA (2018)

3.2.7. Martelamento

A presença de uma edificação na esteira de uma ou mais construções de dimensões semelhantes pode gerar, a depender das posições dos edifícios envolvidos, a ação compassada de turbilhões de vento, gerados pelos obstáculos a barlavento, na região a sotavento. Nesse sentido, surgem forças excitadoras periódicas que podem induzir a outros fenômenos dinâmicos e, caso a frequência natural da edificação coincida com a frequência dominante nos turbilhões, tais efeitos podem ser potencializados (BLESSMANN,1998).

3.2.8. Golpe

Quando uma edificação está situada na esteira de outra, devido à turbulência gerada, os vórtices desprendidos da construção a barlavento solicitarão a edificação de maneira sucessiva, podendo gerar oscilações. (GONÇALVES *et al*,1994)

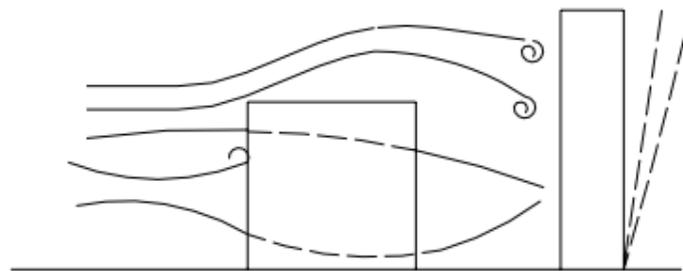


Figura 14 – Efeito de golpe

Fonte: PRAVIA (2018)

3.2.9. Drapejamento (*flutter*)

Segundo Gonçalves *et al* (1994), em estruturas onde existem dois ou mais graus de liberdade, a passagem do vento induz ao acoplamento de vibrações nas direções livres.

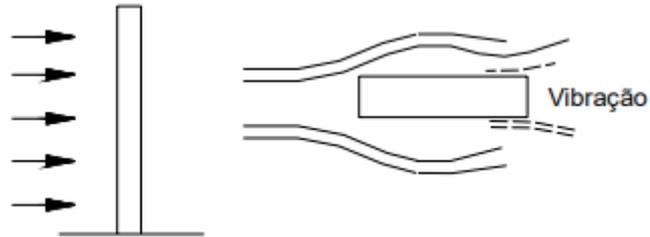


Figura 15 – Drapejamento em estruturas

Fonte: PRAVIA (2018)

Um dos casos mais famosos de falha estrutural devido ao drapejamento é o da ponte Tacoma Narrows, ocorrido em 1940 nos Estados Unidos. Na ocasião, a presença de ventos constantes, com velocidades médias de 65 km/h e de frequências de excitação próximas à frequência natural da estrutura, induziu a movimentos oscilatórios no tabuleiro, levando-o ao colapso.



Figura 16 – Colapso da ponte Tacoma Narrows

Fonte: University of Washington (2021)

3.2.10. Torção

O efeito de torção é ocasionado devido à assimetria de carregamento na direção horizontal, o que leva a uma rotação em torno do eixo da altura. A diferença na distribuição de pressão e assimetrias na arquitetura da construção também podem ocasionar o surgimento do efeito em questão (FONTES, 2003 *apud* LIMA e SANTOS, 2019).

Segundo Ching *et al* (2010 *apud* LIMA e SANTOS, 2019), construções de qualquer altura podem estar sujeitas a esse esforço, entretanto seus efeitos em edificações altas são mais acentuados. Para os autores, neste tipo de edifício, a torção atua sobre vários pavimentos, resultando na rotação total da estrutura (Figura 17).

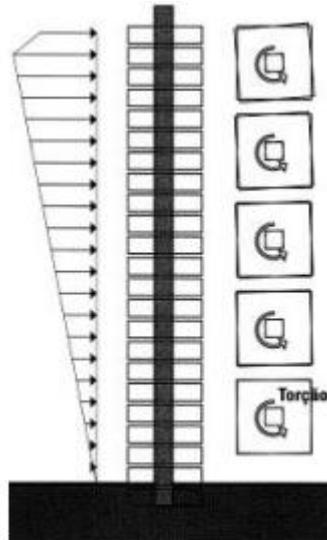


Figura 17 – Edifício solicitado à torção

Fonte: CHING *et al* (2010 *apud* LIMA e SANTOS ,2019)

3.3. Formulação matemática para fluídos

Um fluído pode ser definido como uma substância que escoar e se deforma continuamente enquanto estiver submetido a tensões de cisalhamento (WHITE, 2011). Nesse sentido, líquidos e gases são abrangidos por essa definição.

Sendo assim, os problemas que envolvem o vento são estudados à luz da teoria da dinâmica dos fluídos, campo da mecânica dos fluídos que analisa fluídos em movimento.

Segundo White (2011), grandes avanços nesse campo foram iniciados a partir da postulação das leis do movimento e lei da viscosidade de fluídos lineares por Isaac Newton, no ano de 1687.

Tendo como base as equações de Newton e o princípio de conservação da massa em um escoamento, Claude-Louis Navier e George Gabriel Stokes deduziram as chamadas Equações de Navier-Stokes (equações (1),(2) e (3)) que, juntamente com a equação da continuidade da massa (equação (4)), permitem definir os campos de velocidade e pressão do escoamento de qualquer fluído.

$$\rho \cdot f_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

$$\rho \cdot f_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2)$$

$$\rho \cdot f_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \cdot \frac{\partial w}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

em que:

u, v, w – componentes escalares do vetor velocidade para os eixos x, y e z , respectivamente;

ρ – densidade do fluido;

P – pressão;

f – forças de campo;

μ – viscosidade dinâmica;

t – tempo.

Não é o objetivo do presente trabalho o aprofundamento nos termos e na dedução matemática das equações anteriores, sendo de interesse apenas as suas aplicações.

As incógnitas a serem obtidas são as componentes do vetor velocidade (u, v, w) e a pressão (P), resultando em um sistema com quatro equações e quatro variáveis. Segundo White (2011), são conhecidos um número limitado de soluções analíticas para as equações, obtidos através de considerações e simplificações de alguns dos termos. Contudo, com o avanço da computação, os computadores passaram a ser utilizado na obtenção de soluções numéricas em problemas de escoamento, conforme será exposto no item 3.6.

3.4. Ensaios em túneis de vento

Em vista da complexidade do estudo dos ventos e da necessidade de compreender melhor a sua interação com sólidos, no início do século XX foram desenvolvidos os primeiros túneis de vento, inicialmente usados para a aviação (CHANETZ, 2017).

Os túneis de vento são equipamentos capazes de simular o movimento de correntes de ar, com condições controladas e previamente definidas, e assim analisar a interação deste com modelos, normalmente em escala reduzida (POPE e GOIN, 1965). Os resultados experimentais fornecidos pelo ensaio são cruciais para análise de aeronaves, construções civis, veículos, entre outros.

A Figura 18 mostra o ensaio em túnel de vento de edificações. Ao fundo nota-se a hélice responsável por movimentar o ar, seguida de um modelo em escala reduzida a ser ensaiado.



Figura 18 – Edifícios em teste no túnel de vento

Fonte: UFJF (2021)

No âmbito da construção civil, ensaios de túnel de vento são demandados no estudo de edifícios altos e/ou esbeltos, de projetos que apresentam geometrias que fogem das abrangidas pela norma vigente, situações em que a vizinhança pode contribuir para perturbações importantes no escoamento e ainda em casos de obras que serão situadas em locais com ventos de grande magnitude.

3.5. Abordagem normativa

Gonçalves *et al* (1994) afirma que uma das grandes dificuldades no estudo do vento é a quantificação da sua velocidade, que sofre alterações em seu valor médio tanto por conta de sua natureza aleatória quanto por sensibilidade a fatores como rugosidade e nível do terreno bem como a altura da edificação. Assim, tais flutuações de valores originam efeitos dinâmicos que superpõem os efeitos estáticos causados pela velocidade média (WAHRHAFTIG,2017).

A NBR 6123/1988 é a norma brasileira que abrange a determinação de forças devido ao vento em edificações, oferecendo as diretrizes de cálculo para obtenção dos esforços solicitantes que serão usados no dimensionamento da estrutura. Em seu conteúdo, são abrangidas as forças devido à ação estática e dinâmica dos ventos.

Tratando-se da ação estática, a referida norma dispõe de metodologias de cálculo para a obtenção de forças internas ou externas à edificação.

Para os objetivos deste trabalho, será abordada a obtenção das forças de arrasto devidas à ação estática dos ventos. Conforme define Gonçalves *et al* (1994), a força de arrasto é a

componente da força global (força resultante das pressões horizontais de vento) que atua em sentido paralelo ao da direção do vento, sendo particularmente importante pelo fato de ser utilizada para a determinação de esforços globais.

3.5.1. Determinação da velocidade característica do vento

A velocidade característica do vento (V_k) é calculada a partir da seguinte expressão:

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$$

onde:

V_0 – Velocidade básica do vento;

S_1 - Fator topográfico;

S_2 - Fator rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno;

S_3 - Fator estatístico.

- Velocidade básica do vento

Segundo a definição de norma, a velocidade básica é a velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida em média uma vez a cada 50 anos considerando uma altura de 10 metros acima do terreno, em campo aberto, plano e sem obstruções.

Devido às variações das velocidades do vento em cada região, a norma dispõe de um mapa de isopletas, obtido a partir de dados de estações meteorológicas tratados estatisticamente. As isopletas de velocidade básica são mostradas na Figura 19.

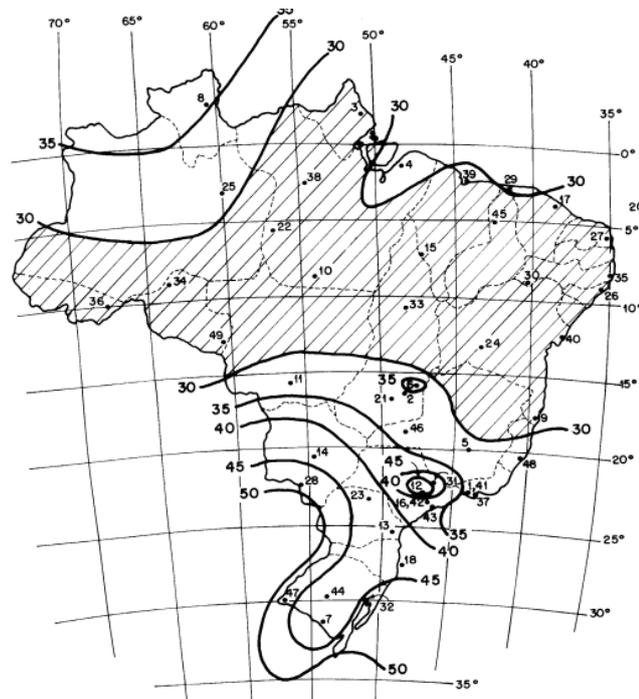


Figura 19 – Isopletas da velocidade básica do vento

Fonte: ABNT (1988)

- Fator topográfico

As variações do relevo e do terreno onde a edificação está situada podem aumentar ou diminuir a velocidade básica. Assim, o fator S_1 leva em consideração as variabilidades topográficas através de três situações: terreno plano ou pouco ondulado, taludes e morros e vales profundos protegidos do vento.

Para terrenos planos e vales profundos protegidos do vento, o fator S_1 vale 1 e 0,9, respectivamente. Para taludes e morros, a norma oferece o cálculo do fator levando em conta a inclinação média do talude ou encosta do morro e a diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro.

- Fator rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno

O fator S_2 abrange as particularidades da edificação levando em conta as suas dimensões, a rugosidade do terreno no qual se encontra e a variação da velocidade do vento conforme a altura.

As dimensões da edificação influenciam no tamanho do turbilhão de vento que a envolverá de forma que, quanto maior a edificação, maior o turbilhão e menor a velocidade média do vento (GONÇALVES *et al*, 1994). Assim, a norma propõe três classes de edificações, transcritas abaixo:

- “Classe A: Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.
- Classe B: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.
- Classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.”

A rugosidade do terreno, seja na forma de obstáculos naturais ou artificiais, modifica o perfil de velocidade do vento. A NBR 6123/1988 classifica o terreno em cinco categorias de rugosidade. São elas:

- Categoria I: engloba superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente;
- Categoria II: contempla terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1,0 m.

- Categoria III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos nos quais a cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0 m.
- Categoria IV: abrange terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10 m. Esta categoria também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na categoria V.
- Categoria V: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados, com cota média do topo dos obstáculos igual ou superior a 25 m

O fator S_2 pode ser calculado da forma que se segue.

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

em que

b – Parâmetro de correção da classe da edificação;

F_r - Fator de rajada;

z - Altura acima do terreno (limitado à altura gradiente);

p – Parâmetro meteorológico.

Os valores de b , p e F_r são obtidos a partir da Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros meteorológicos

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

Fonte: ABNT (1988)

- Fator estatístico

O fator S_3 considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação analisada, utilizando conceitos estatísticos e considerando a ocupação da construção.

A Tabela 2 mostra os valores de S_3 de acordo com o grupo e descrição da edificação.

Tabela 2 – Valores mínimos para o fator estatístico

| 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)

3.5.2. Determinação das forças de arrasto

A partir de V_k , pode-se obter a pressão dinâmica a partir da relação:

$$q = 0,613 \cdot V_k^2$$

com q em N/m².

Obtida a pressão dinâmica, as forças de arrasto (F_a) podem ser obtidas conforme a expressão a seguir:

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A$$

em que:

F_a – Força de arrasto (N);

C_a – Coeficiente de arrasto;

q – Pressão dinâmica do vento (N/m²);

A – Área de atuação da força (m²).

Os coeficientes de arrasto são obtidos em função das dimensões em planta e da altura da edificação analisada. A NBR 6123/1988 salienta que os coeficientes são válidos apenas para edifícios de seção retangular constante ou fracamente variável.

Sendo a e b a maior e a menor dimensão em planta, respectivamente, e h a altura do edifício, o coeficiente de arrasto é obtido, para ventos de baixa turbulência, na Figura 20 e, para o caso de ventos de alta turbulência, com o auxílio da Figura 21.

A classificação dos ventos em baixa ou alta turbulência é feita pela norma considerando a altura do edifício analisado em relação à altura média da vizinhança e também levando em consideração a distância pela qual as edificações vizinhas se estendem na direção e sentido do vento analisado.

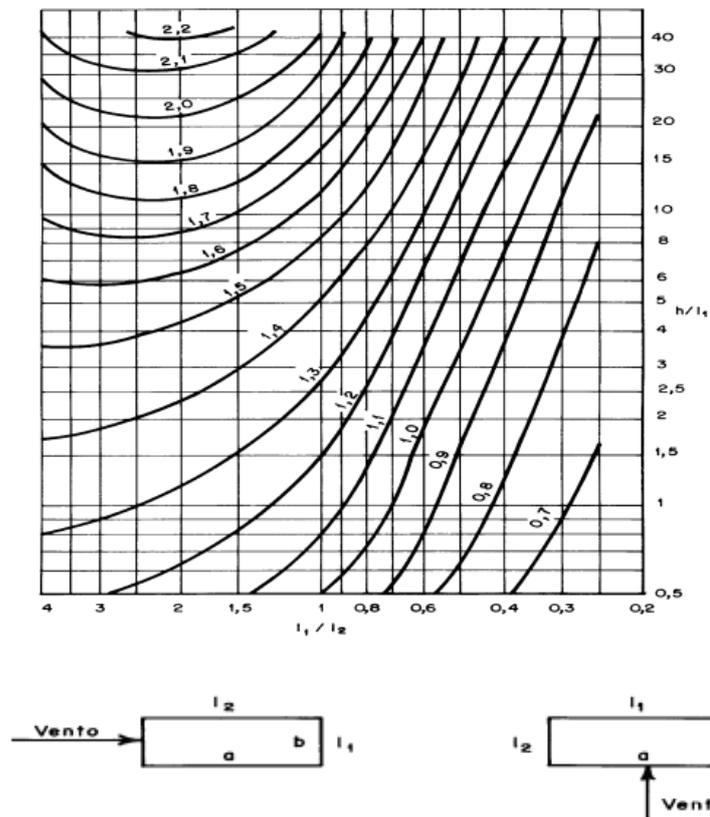


Figura 20 – Coeficientes de arrasto para edificações paralelepípedicas -Baixa turbulência

Fonte: ABNT (1988)

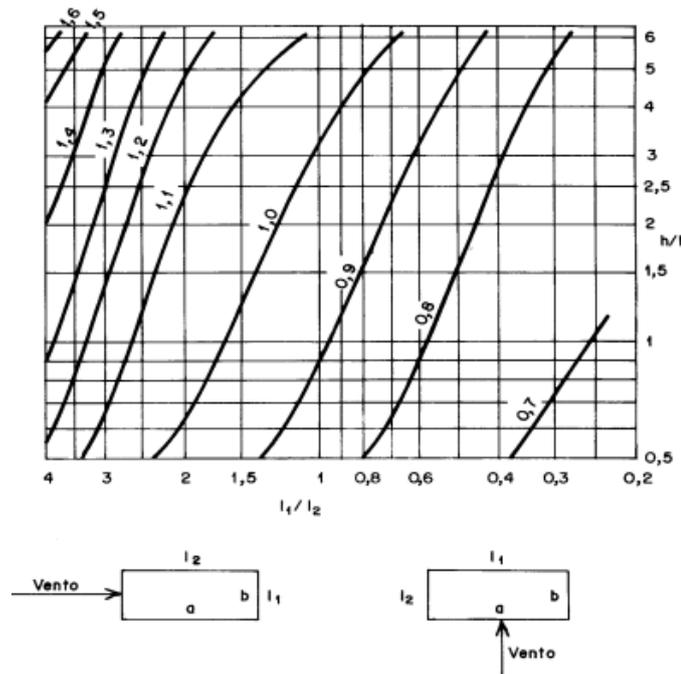


Figura 21 – Coeficientes de arrasto para edificações paralelepípedicas -Alta turbulência

Fonte: ABNT (1988)

A consequência mais significativa do vento turbulento na edificação é a diminuição da sucção na parede de sotavento (GONÇALVES *et al*, 2004). Como salienta o autor, esse tipo de vento é mais comum em grandes centros urbanos, em terrenos de classe IV e V.

Obtidas as forças de arrasto para cada uma das direções, procede-se para a fase de análise estrutural da edificação, onde são obtidos os esforços solicitantes, seguido do dimensionamento das peças estruturais e, por fim, as análises de estabilidade.

Já existem no mercado *softwares* que determinam as forças devido ao vento a partir das considerações normativas. Para o presente trabalho, será utilizado o *software* Ciclone, desenvolvido por discentes da Escola de Estruturas de São Carlos e distribuído de forma gratuita pela instituição.

3.6. Fluidodinâmica computacional – *Softwares* CFD

O uso de computadores para a resolução de problemas envolvendo fluídos iniciou-se na década de 1960, sendo primeiro aplicada na indústria aeroespacial no estudo da interação de aeronaves com o ar (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007). A partir daí, avanços no campo da matemática, especialmente no desenvolvimento de métodos numéricos, aliados ao aprimoramento dos computadores e o desenvolvimento de linguagens de programação que tornam a interface entre a máquina e o usuário mais amigáveis, possibilitaram a utilização do

computador para a resolução de problemas em campos da engenharia e da indústria. Surge assim a Fluidodinâmica Computacional.

Como discutido em 3.3, as equações que governam os fluídos não possuem soluções analíticas gerais, sendo conhecidas apenas soluções para alguns escoamentos particulares. Nesse sentido, os softwares CFD são desenvolvidos com base em algoritmos numéricos que são capazes de discretizar os problemas envolvendo escoamentos (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

Baskharan e Collins (2002) definem que a ideia central do CFD é a de redefinir o domínio de um problema contínuo por um domínio discreto através do uso da discretização de elementos. Simplificadamente, o problema analisado é dividido em partes menores, relacionadas entre si através de condições de contorno, e resolvidos individualmente, obtendo assim as variáveis de interesse para cada ponto do domínio discreto.

Tendo em vista que grande parte dos problemas com fluídos ocorrem no espaço tridimensional, a discretização do problema é feita subdividindo o escoamento em volumes menores, denominados volumes de controle ou células. A forma desses volumes é particular de cada algoritmo, sendo comuns tetraedros e hexaedros, todavia, *softwares* mais recentes utilizam poliedros arbitrários (APSLEY, 2020).

A quantidade de volumes de controle gerados exerce influência na precisão do resultado final. Malhas pobres em células podem gerar soluções pouco precisas ao passo que malhas com muitos elementos geram soluções com menos incertezas, porém requerem maior poder de processamento computacional.

Versteeg e Malalasekera (2007) descrevem que um programa CFD é composto por três elementos fundamentais: pré-processador, *solver* e pós-processador.

O pré-processador é responsável por apresentar uma interface ao usuário que permita a este modelar o problema desejado. No pré-processamento são definidas as características do escoamento, geometria do problema, propriedades dos fluídos envolvidos e condições de contorno (LOMAX *et al* 1999). Outra atividade importante executada nessa etapa é a geração da malha de elementos para discretização matemática do problema (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

O próximo passo é realizado pelo *solver*, que irá interpretar os dados da etapa anterior, definir as equações que governam o problema e, através de métodos numéricos, realizar o processo iterativo de resolução deste. Com relação à solução numérica, Lomax *et al* (1999) afirmam que os métodos numéricos geralmente empregados em análises CFD podem ser

classificados como diferenças finitas, volumes finitos, ou métodos espectrais. De forma geral, os métodos citados transformam as EDP's que regem cada volume de controle em equações algébricas, que são resolvidas de forma iterativa.

Conforme explica Moukalled *et al* (2015), o método dos volumes finitos (MVF) prova-se adequado para grande parte dos problemas envolvendo fluídos por oferecer uma maior facilidade para a imposição de condições de contorno, adequar-se bem a malhas irregulares (onde os elementos não são iguais nem simétricos), mas principalmente por conseguir conservar propriedades físicas relevantes para cada célula da malha, oferecendo resultados mais precisos.

Por fim, o pós-processador é o componente do *software* que apresenta os resultados encontrados na etapa de cálculo. Nessa fase, são gerados gráficos 2D e 3D das variáveis de interesse, trajetórias de partículas, forças em superfícies e momentos gerados por elas, tensões e deformações e, em *softwares* mais recentes, a possibilidade de gerar animações (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

3.6.1. Autodesk CFD

Em 2018, a Autodesk descontinuou o *software* Autodesk Flow Design, programa antes utilizado para simulações fluidodinâmicas, e apresentou o Autodesk CFD.

A gama de aplicabilidades do Autodesk CFD abrange a modelagem de sistemas, com fluídos e com transferência de calor, análise térmica de ambientes civis e componentes de máquinas, estudo aerodinâmico de edificações e modelos mecânicos e ainda para a otimização de problemas que envolvam fluídos.

A Figura 22 mostra a interface da tela inicial do programa Autodesk CFD.

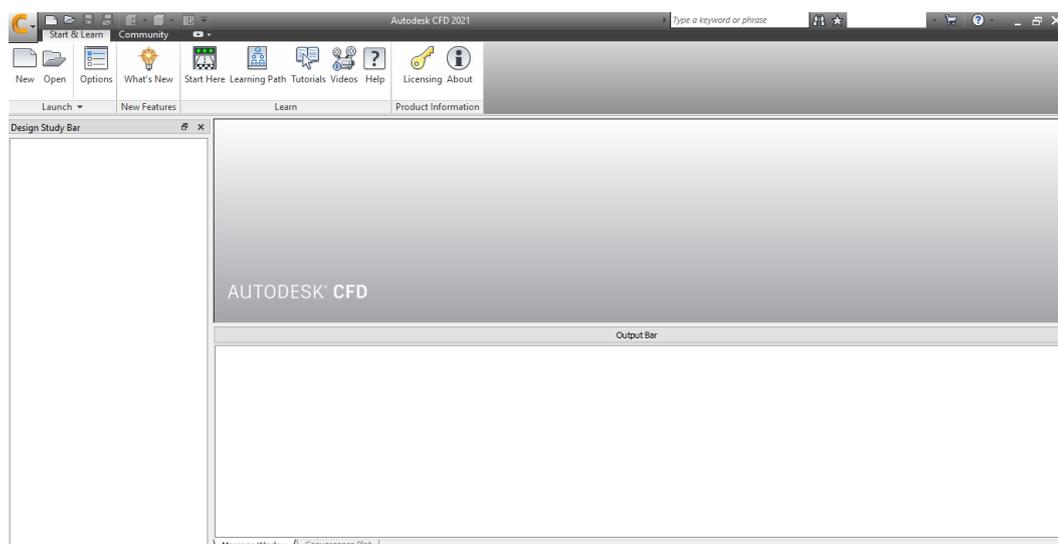


Figura 22 – Tela inicial do Autodesk CFD

Fonte: AUTODESK (2021)

O pré-processamento inicia-se com a importação da geometria. O programa não dispõe de ferramentas de modelagem de geometrias, sendo necessário importar os modelos a serem analisados. Para facilitar a importação, o *software* aceita extensões de grande número de programas como REVIT, ROBOT, SolidWorks, SketchUp, entre outros.

Importada a geometria, procede-se para a definição de materiais e aplicação das condições de contorno. Para a geração da malha de elementos, o programa oferece a possibilidade de uma geração automática ou a opção de ser definida pelo usuário.

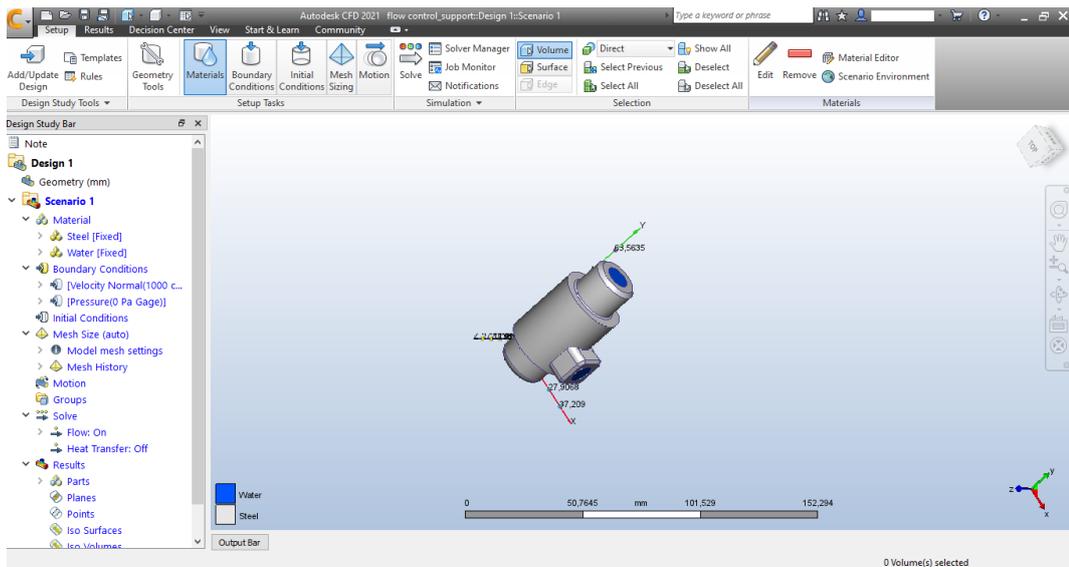


Figura 23 – Exemplo de modelagem

Fonte: AUTODESK (2021)

Antes de partir para a etapa de resolução, o usuário deve definir o número de iterações que devem ser realizadas. Após isso, inicia-se o processo iterativo. O *solver* utilizado no Autodesk CFD utiliza o método dos elementos finitos para a transformação das equações diferenciais parciais em equações algébricas.

Na etapa de pós-processamento, os resultados podem ser representados através de planos de corte, visualização tridimensional, gráficos e trajetórias de partículas. Grandezas como velocidade, pressão, temperatura, tensão cisalhante e forças atuantes podem ser obtidos nessa etapa. Além disso, o programa oferece relatórios detalhados para superfícies isoladas ou volumes, que podem ser exportados na forma de texto.

A Figura 24 ilustra um gráfico tridimensional para visualização da velocidade e Figura 25 um exemplo com trajetória de partículas.

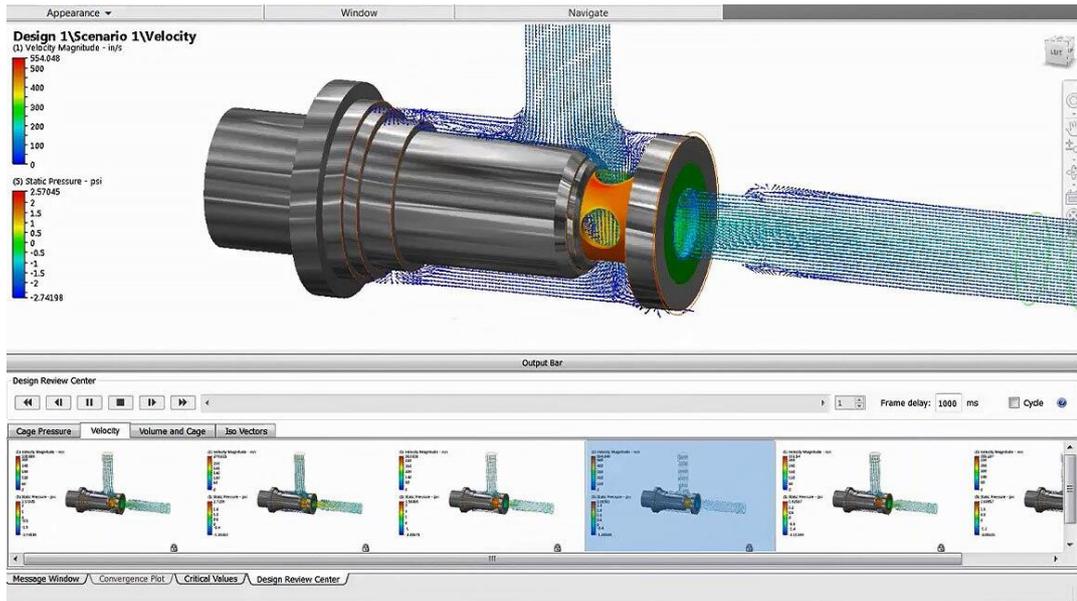


Figura 24 – Visualização de resultados

Fonte: AUTODESK (2021)

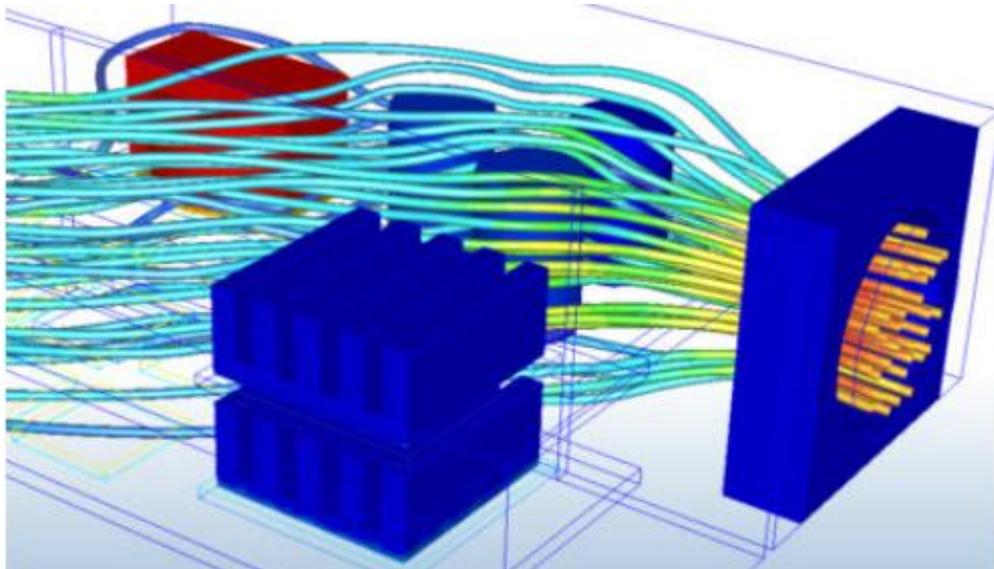


Figura 25 – Trajetória de partículas

Fonte: AUTODESK (2021)

As simulações realizadas no presente trabalho foram modeladas no ambiente do programa Autodesk CFD.

3.7. Breve comparação entre Ensaios de túnel de vento e CFD

Diante do exposto, é fato que a análise do vento é essencial para a segurança e desempenho da edificação. Nesse contexto, os ensaios de túnel de vento e simulações CFD surgem como ferramentas para auxiliar os engenheiros em projetos e tomada de decisões.

Com o avanço da computação e levando em conta os custos dos ensaios em túnel de vento, existem discussões acerca da substituição desses ensaios pelas simulações via *softwares* CFD.

Visando comparar os dois métodos, Li *et al* (2018) ensaiaram um modelo de vizinhança, constituído por um edifício cercado obstáculos menores (Figura 26), em um túnel de vento e modelaram o mesmo cenário em três *softwares* CFD: Autodesk CFD, OpenFOAM e UrbaWind.

Foram posicionados sensores em pontos de interesse no modelo de escala reduzida, visando mensurar a velocidade do vento em diferentes pontos. Testou-se ventos nas direções 0°; 22,5° e 45°.



Figura 26 – Modelo utilizado nos ensaios de túnel de vento

Fonte: LI *et al* (2018)

Os resultados obtidos em cada um dos programas foram comparados com os obtidos no ensaio de túnel de vento para cada uma das direções de incidência. A Figura 27 mostra os resultados encontrados para o vento a 0°.

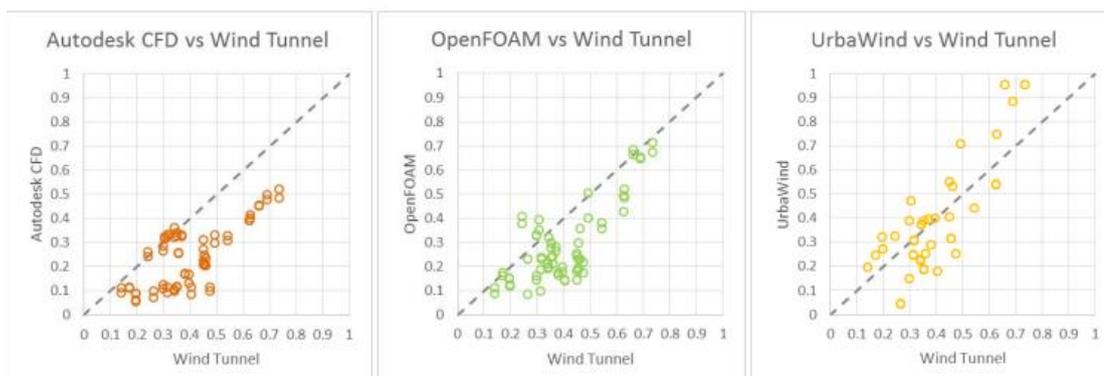


Figura 27 – Comparação CFD e ensaio de túnel de vento para vento a 0°

Fonte: LI *et al* (2018)

A partir dos resultados, os autores chegaram às seguintes conclusões:

- O programa OpenFOAM, por oferecer a possibilidade de ajustar a densidade da malha, apresentou maior eficiência no cálculo;
- Para as direções do vento de 0° e 22.5° , os softwares apresentaram melhor correlação com os resultados do ensaio de túnel de vento do que os obtidos para a direção de 45° ;
- Os resultados do Autodesk CFD e do OpenFOAM para a região em torno do edifício central estão em conformidade com os obtidos através do ensaio;
- Na zona de esteira dos obstáculos, os resultados das simulações não apresentaram boa correlação com os ensaios;

De forma geral, apesar de boa correlação para alguns locais e direções do vento, os autores consideraram que os resultados obtidos pelos três programas ainda não são satisfatórios o suficiente em comparação com os obtidos no ensaio de túnel de vento, principalmente nas zonas de esteira dos obstáculos.

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para realizar as análises de vento consistiu, inicialmente, na modelagem de uma edificação de referência.

A construção a ser analisada consiste em um edifício residencial de dimensões em planta $7,10 \times 23,20$ metros ($b \times l$), conforme indica a Figura 28, com uma altura (h), entre o térreo e a cobertura, de 27 metros. É composta por nove pavimentos e, em seu último nível, possui um reservatório de água, resultando em uma altura total de 30,60m. A Figura 29 mostra um corte transversal do edifício.

O sistema estrutural da construção é do tipo convencional composto por vigas, pilares e lajes maciças, com todos os elementos estruturais executados em concreto armado.

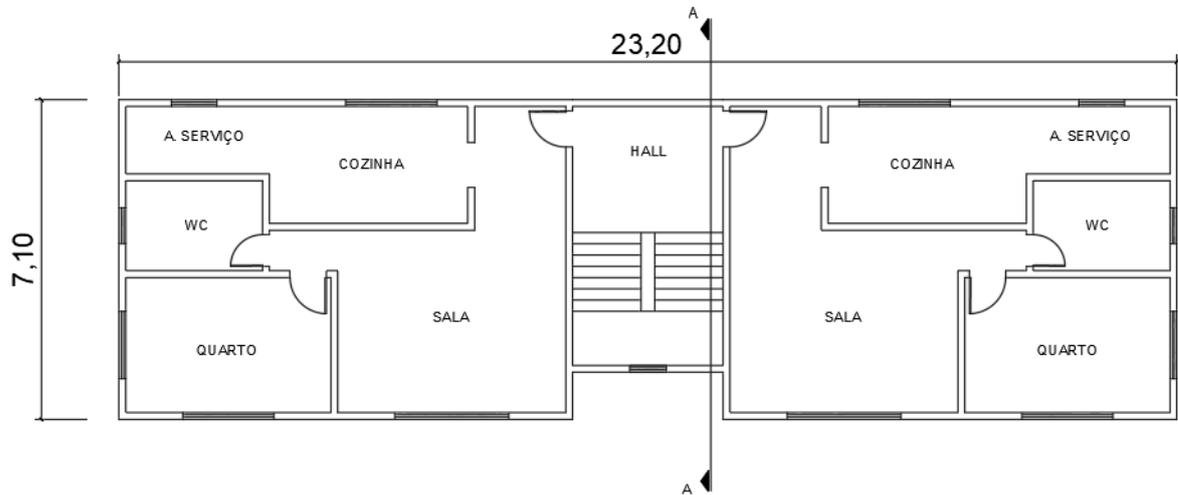


Figura 28 – Planta baixa do edifício utilizado

Fonte: Autor

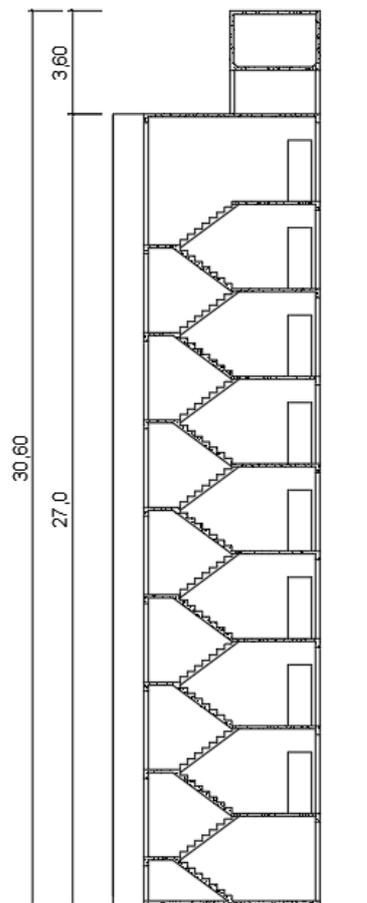


Figura 29 – Vista em corte da edificação

Fonte: Autor

A modelagem do edifício foi realizada através do *software* Autodesk REVIT. A Figura 30 ilustra o modelo tridimensional gerado.

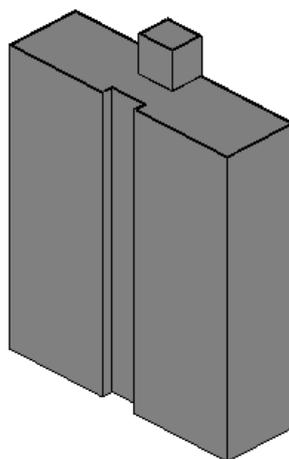


Figura 30 – Modelo tridimensional do edifício de referência

Fonte: Autor via *software* REVIT

O edifício não recebeu as aberturas de esquadrias devido ao fato de que, para a análise CFD, a forma da edificação tem maior influência do que a presença de aberturas. Vale ressaltar que o *software* realiza uma análise aerodinâmica, ou seja, com modelo indeformável, dispensando a modelagem dos elementos estruturais.

Com o edifício modelado, procedeu-se com a introdução de elementos no entorno da edificação de forma a reproduzir diferentes condições de rugosidade, gerando assim cenários de simulação diversificados.

A princípio analisou-se o prédio de forma isolada e, em seguida, houve a inserção de rugosidade no terreno de forma a simular casas e pequenos edifícios. Após isso, foram adicionadas edificações de altura igual à do prédio modelado e variou-se a posição deste em relação às vizinhas. Por fim, modificou-se a altura dos edifícios adjacentes. Todos os modelos foram gerados também com o auxílio do *software* Autodesk REVIT.

As simulações realizadas foram divididas em três cenários principais, descritos a seguir.

4.1. Cenário I

Contempla apenas o edifício de referência, sem construções de altura igual ou parecida em seu entorno. Foram geradas duas simulações: edifício isolado e edifício com inserção de rugosidade.

4.1.1. Simulação 1.1: Edifício isolado

Analisa-se o edifício de forma isolada, sem rugosidade no terreno em seu entorno, conforme representado na Figura 31/Figura 30. Dessa forma, o vento que incidisse sobre a edificação não teria influência de construções presentes nos arredores.

Essa situação de terreno pode ser caracterizada, de acordo com a classificação da NBR 6123/1988, como categoria I.

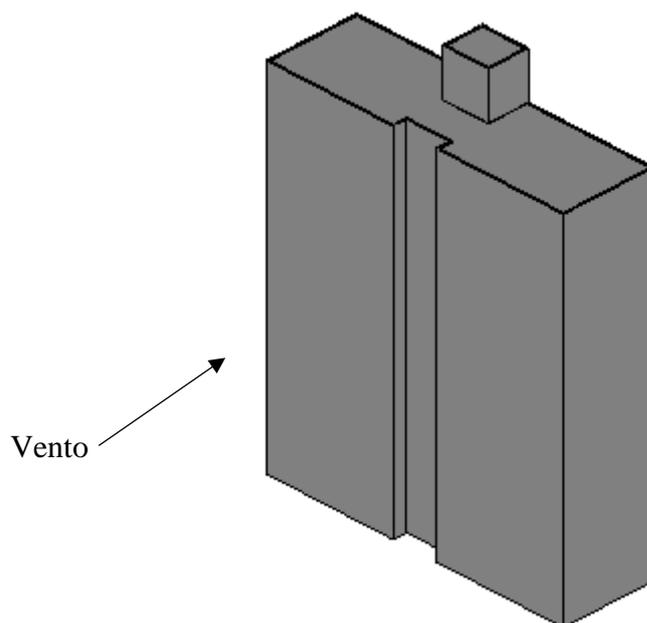


Figura 31 – Simulação 1.1: Modelo tridimensional

Fonte: Autor via *software* REVIT

4.1.2. Simulação 1.2: Edifício com presença de rugosidade do terreno

Inseriu-se cubos de dimensões 3,0m, 4,0m, 5,0m e 6,0m, distribuídas de forma aleatória e paralelamente à maior dimensão do edifício. Pretendeu-se, com isso, simular condições de vizinhança de casas e edificações de pequeno porte.

A distância entre a fachada da edificação e a última linha de cubos foi adotada como sendo igual a $3b$, ou seja, 21,30 metros.

As disposições construtivas em planta e uma visão tridimensional são mostradas na Figura 32 e Figura 33, respectivamente.

A inserção da rugosidade faz com que o terreno receba a classificação quanto à rugosidade, de acordo com a NBR 6123/1988, como Categoria III.

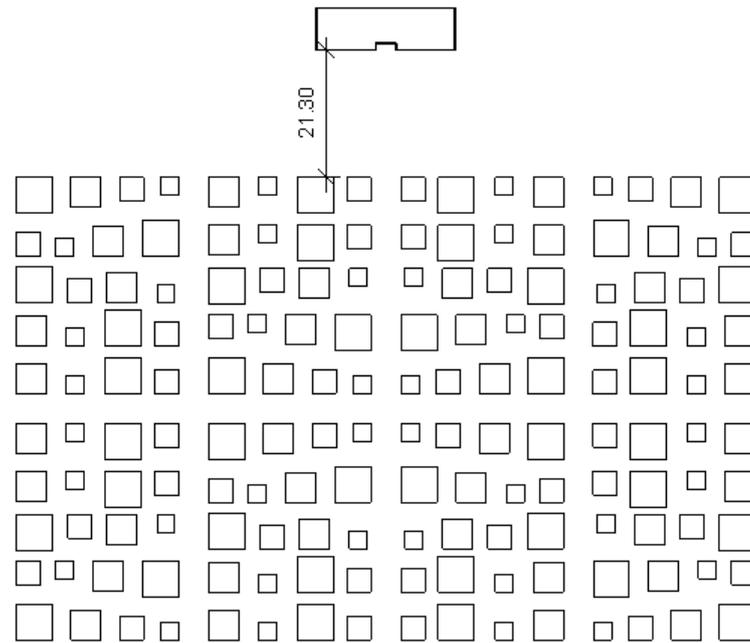


Figura 32 – Simulação 1.2: Vista em planta

Fonte: Autor via *software* REVIT

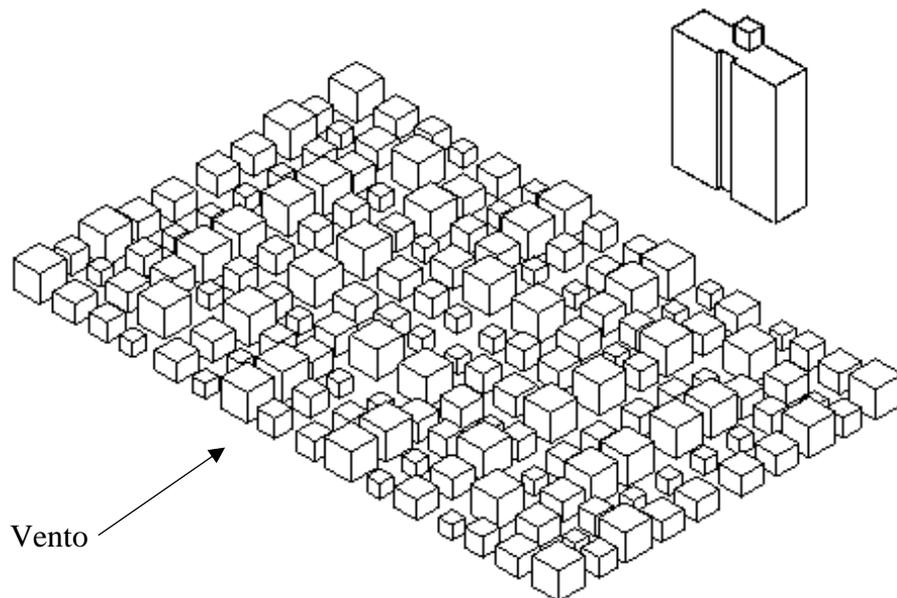


Figura 33 – Simulação 1.2: Modelo tridimensional

Fonte: Autor via *software* REVIT

4.2. Cenário II

Neste cenário, são adicionadas edificações de altura igual à do edifício de referência e, em cada simulação, altera-se a posição dos dois elementos de forma a representar situações comuns em centros urbanos.

Devido à inserção de edificações semelhantes no modelo, o edifício de referência, para o qual serão analisados os resultados da simulação, é destacado na cor vermelha.

4.2.1. Simulação 2.1: Edifícios paralelos com a maior dimensão sobreposta

Os edifícios são espaçados horizontalmente por uma distância de $3b$ e há uma sobreposição de dimensões igual à metade da maior dimensão. A configuração descrita é mostrada, em planta, na Figura 34 e o modelo tridimensional é ilustrado na Figura 35.

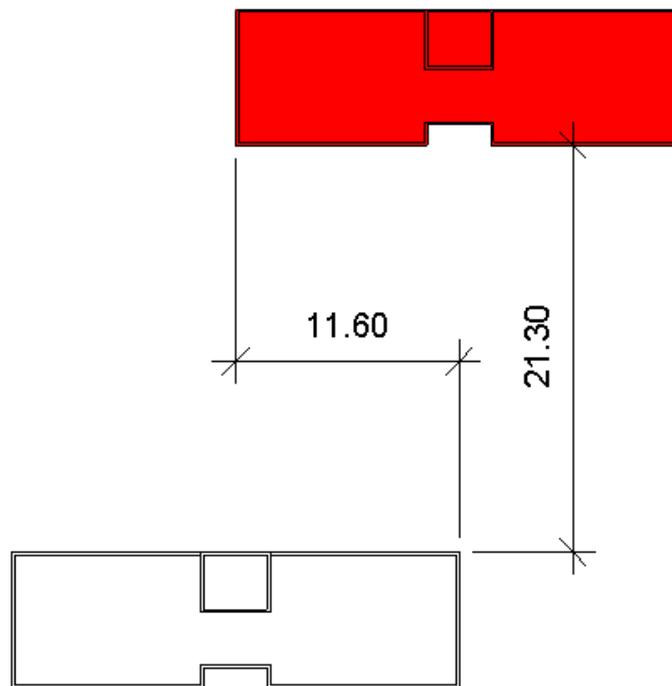


Figura 34 – Simulação 2.1: Vista em planta

Fonte: Autor via *software* REVIT

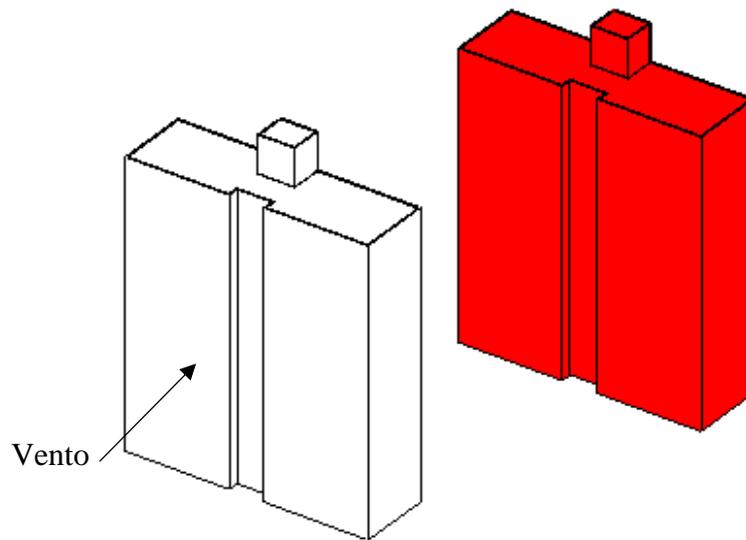


Figura 35 – Simulação 2.1: Modelo tridimensional

Fonte: Autor via *software* REVIT

4.2.2. Simulação 2.2: Edifícios paralelos sem sobreposição de dimensão

A distância horizontal entre os edifícios mantém-se igual a $3b$ e desloca-se o edifício de referência de forma que não haja sobreposição da maior dimensão.

A configuração descrita é representada, em planta, na Figura 36 e o modelo tridimensional é ilustrado na Figura 37.

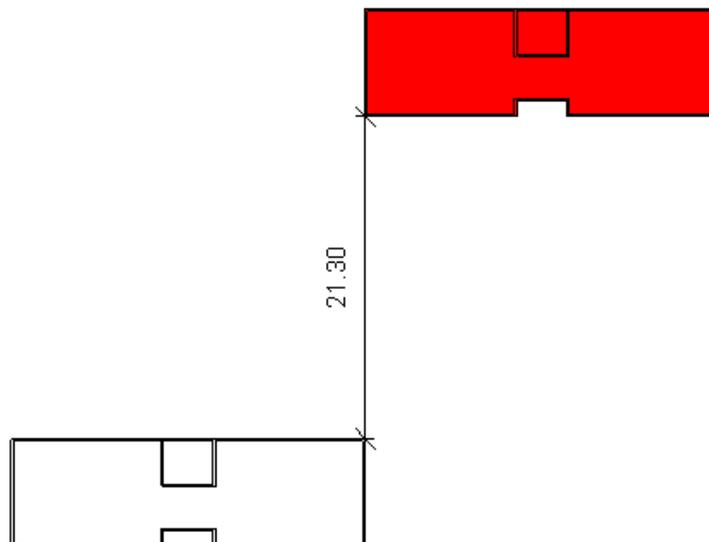


Figura 36 – Simulação 2.2: Vista em planta

Fonte: Autor via *software* REVIT

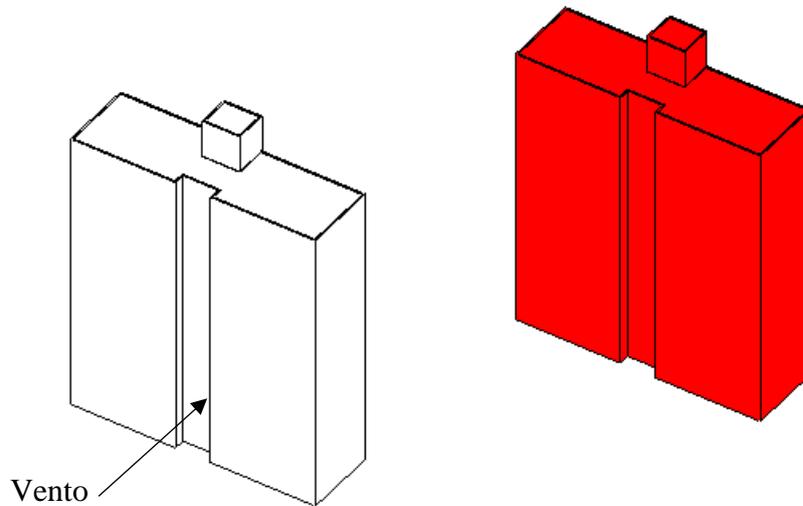


Figura 37 – Simulação 2.2: Modelo tridimensional

Fonte: Autor via *software* REVIT

4.2.3. Simulação 2.3: Três edifícios sem sobreposição de dimensões

Inseriu-se um terceiro edifício, idêntico aos outros, que dista $3b$ das duas edificações adjacentes. Nessa simulação, não há a sobreposição da maior dimensão.

A vista em planta da configuração descrita é ilustrada na Figura 38 e a Figura 39 mostra o modelo em três dimensões.

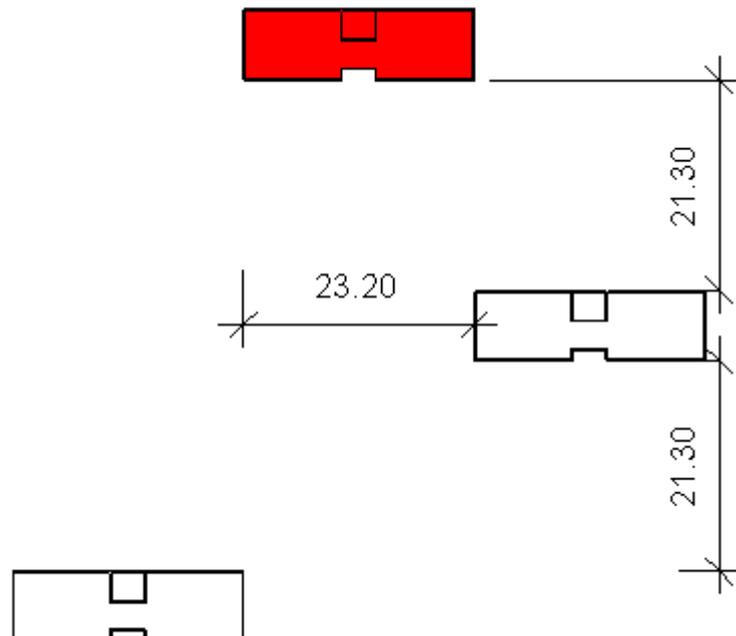


Figura 38 – Simulação 2.3: Vista em planta

Fonte: Autor via *software* REVIT

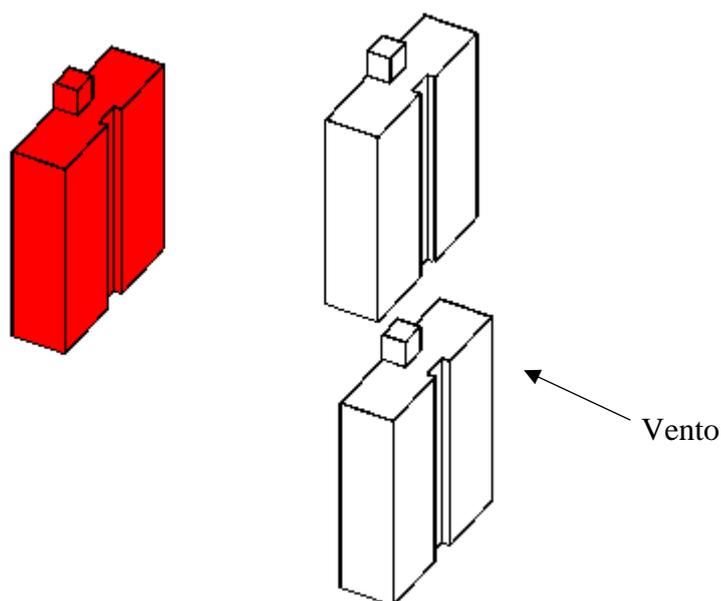


Figura 39 – Simulação 2.3: Modelo tridimensional

Fonte: Autor via *software* REVIT

4.2.4. Simulação 2.4: Representação de *urban canyon* (desfiladeiro urbano)

A maior dimensão edifício de referência encontra-se perpendicular aos prédios vizinhos e estes, por estarem paralelos, configuram uma situação semelhante à de um *urban canyon*.

As edificações são separadas por uma distância de $3b$, conforme mostrado na Figura 40 e o modelo tridimensional é representado na Figura 41.

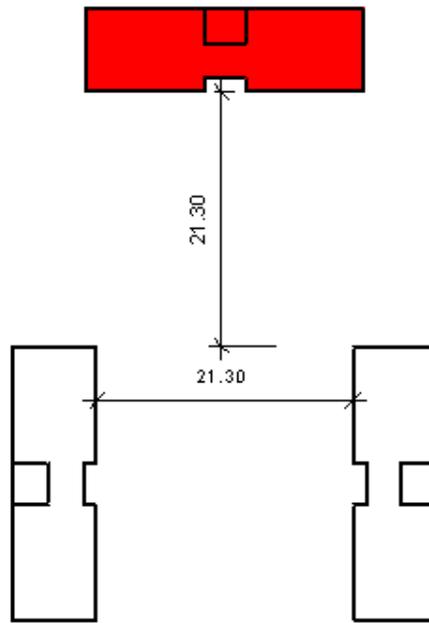


Figura 40 – Simulação 2.4: Vista em planta

Fonte: Autor via *software* REVIT

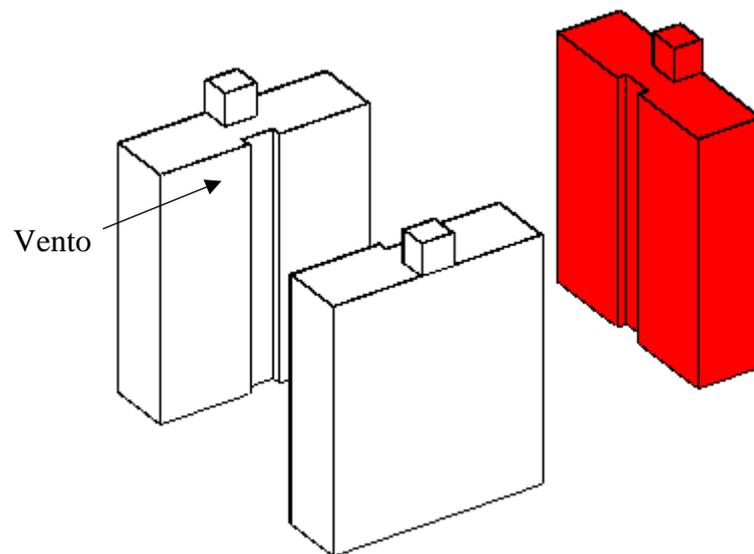


Figura 41 – Simulação 2.4: Modelo tridimensional

Fonte: Autor via *software* REVIT

4.3. Cenário III

Diferentemente do Cenário II, as edificações adjacentes possuem diferença de altura em relação ao edifício de referência.

A altura total do edifício de referência foi conservada (30,70m) e as edificações inseridas possuem alturas múltiplas do valor de h .

O edifício de referência, para o qual serão analisados os resultados da simulação, é destacado na cor vermelha.

4.3.1. Simulação 3.1: Edificação vizinha de altura $0,75 \cdot h$

Os edifícios são espaçados horizontalmente por uma distância de $4b$ e têm a maior dimensão paralela.

A vista em corte da configuração pode ser visualizada na Figura 42 e o modelo tridimensional é ilustrado na Figura 43.

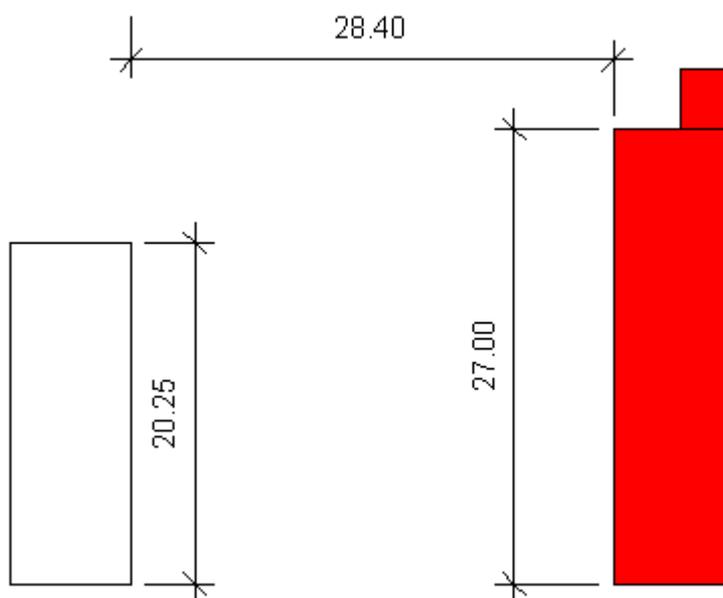


Figura 42 – Simulação 3.1: Vista em corte

Fonte: Autor via *software* REVIT

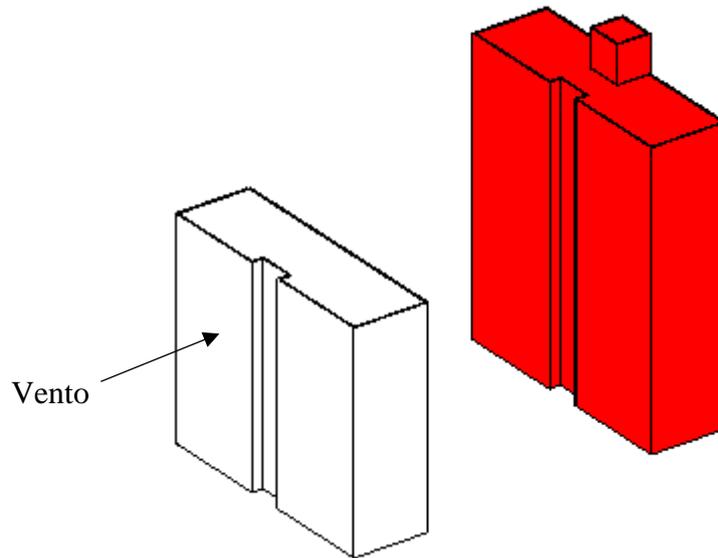


Figura 43 – Simulação 3.1: Modelo tridimensional

Fonte: Autor via *software* REVIT

4.3.2. Simulação 3.2: Edificação vizinha de altura $0,5 \cdot h$

Os edifícios continuam espaçados horizontalmente por uma distância de $4b$ e com a maior dimensão paralela.

A vista em corte da configuração é mostrada na Figura 44 e a Figura 45 ilustra o modelo tridimensional.

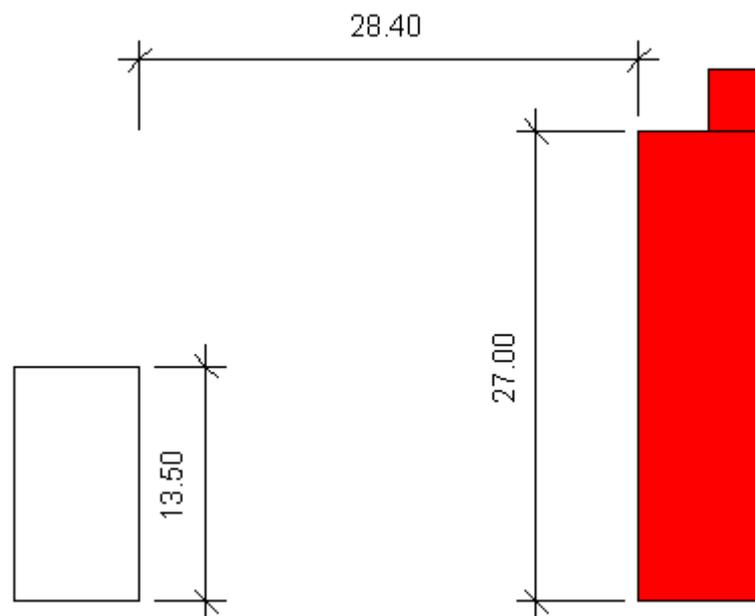


Figura 44 – Simulação 3.2: Vista em corte

Fonte: Autor via *software* REVIT

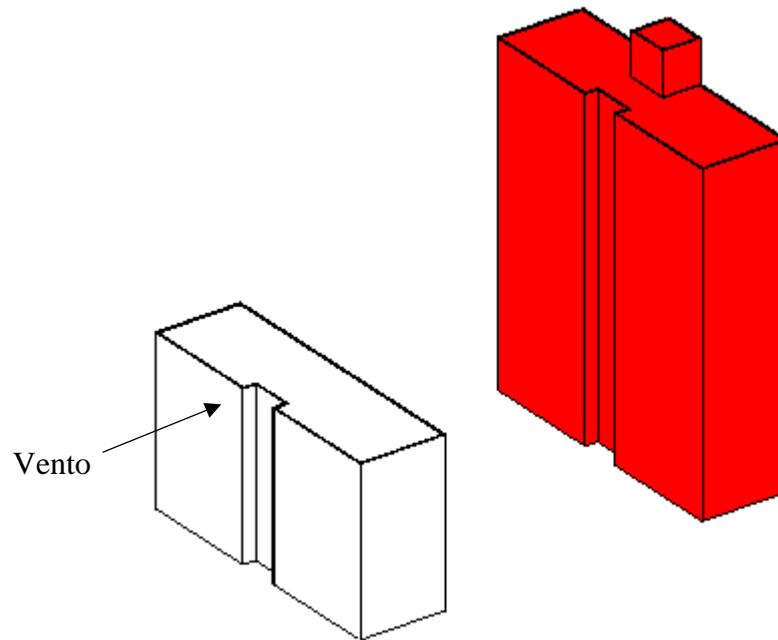


Figura 45 – Simulação 3.2: Modelo tridimensional

Fonte: Autor via *software* REVIT

4.3.3. Simulação 3.3: Edificação vizinha de altura $0,25 \cdot h$

Manteve-se o espaçamento horizontal de $4b$ entre as edificações e a condição de paralelismo da maior dimensão.

A vista em corte e a o modelo em três dimensões da configuração descrita são mostrados na Figura 46 e Figura 47, respectivamente.

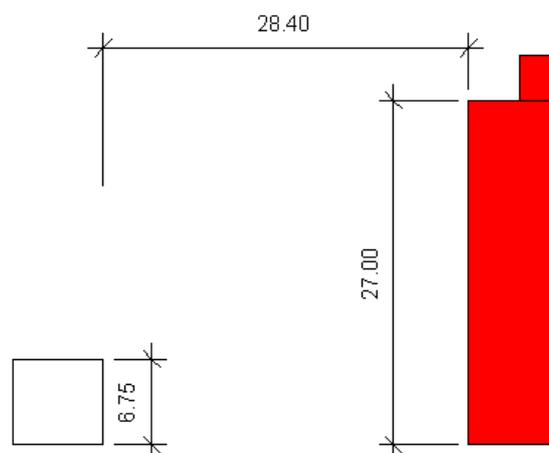


Figura 46 – Simulação 3.3: Vista em corte

Fonte: Autor via *software* REVIT

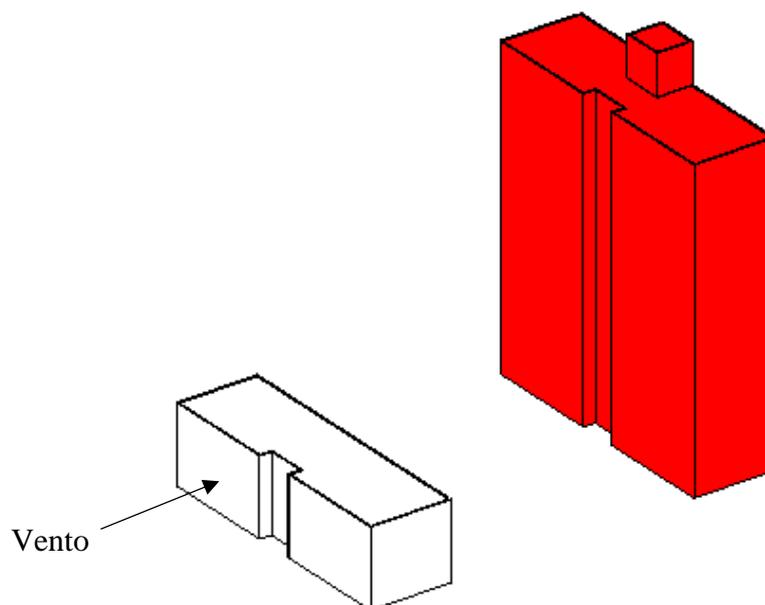


Figura 47 – Simulação 3.3: Modelo tridimensional

Fonte: Autor via *software* REVIT

Com todas as simulações devidamente modeladas no ambiente do programa Autodesk REVIT, efetuou-se a importação para o *software* Autodesk CFD. Esse processo é realizado através da instalação da extensão (*plug-in*) CFD na aba de suplementos do REVIT. Assim, o arquivo .rvt (formato nativo do REVIT) é convertido em um arquivo com extensão .cfz (formato suportado pelo Autodesk CFD).

No ambiente do *software* CFD, procede-se para uma segunda etapa de modelagem. Inicialmente, o programa analisa a geometria do modelo importado de forma a verificar a existência de arestas ou pequenos objetos que podem, no momento de geração de malha, levar a inconsistências. Caso sejam localizados, o programa dispõe de uma ferramenta do tipo *merge edges*, que suaviza e/ou elimina os objetos detectados.

Completada a análise inicial da geometria, segue-se para a criação do túnel de vento. No programa, o túnel é modelado como um volume que deve, obrigatoriamente, abranger todo o modelo que se deseja estudar. Em testes preliminares, percebeu-se que as dimensões do túnel interferem de forma significativa nos resultados de saída. Dessa forma, padronizou-se as medidas desse elemento da seguinte maneira: para cada um dos três eixos cartesianos, as faces do túnel de vento devem estar distantes da face do modelo um valor correspondente ao dobro da dimensão deste no respectivo eixo. A Figura 48 exemplifica, em planta, a padronização descrita e a situação tridimensional é ilustrada na Figura 49.

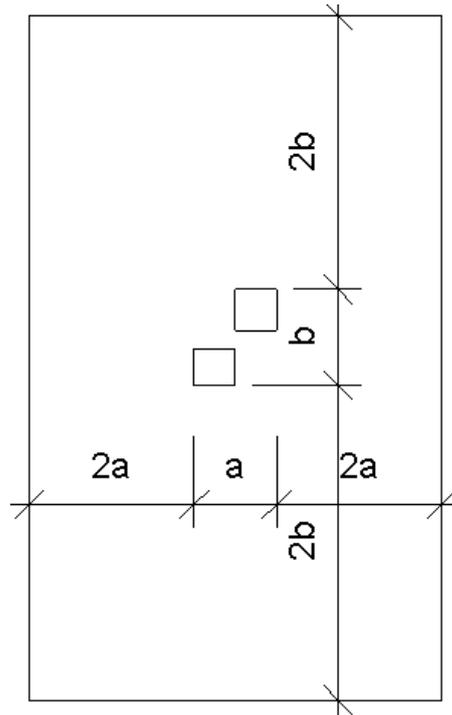


Figura 48 – Dimensões em planta do túnel de vento

Fonte: Autor via *software* REVIT

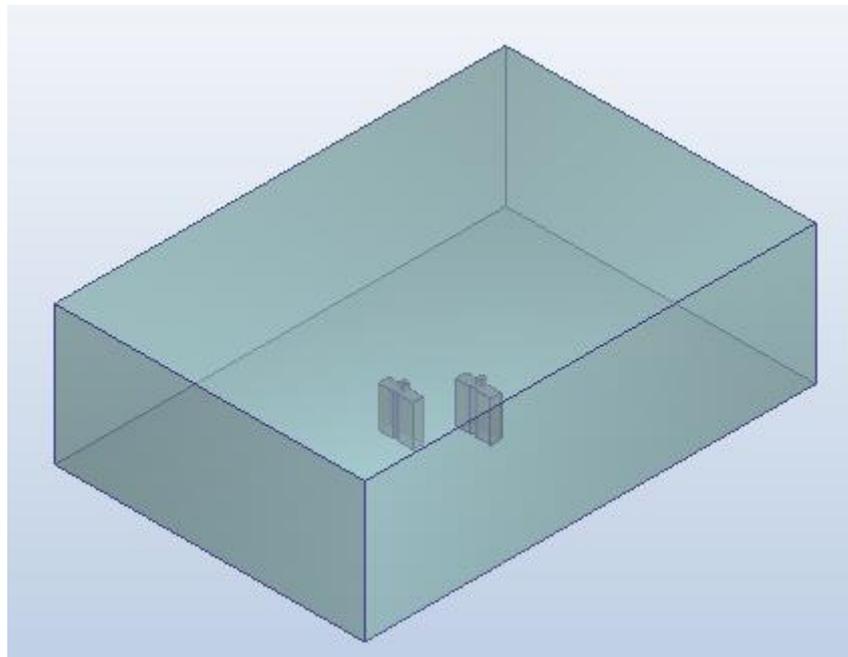


Figura 49 – Modelo envolto por túnel de vento

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

O próximo passo consiste em definir os materiais presentes no cenário de modelagem. Para todos os casos analisados, definiu-se apenas dois materiais: concreto, para os edifícios, e ar para o volume do túnel de vento. Salienta-se que, devido à análise performada pelo *software*

ser aerodinâmica, e não aeroelástica, não se faz necessário definir todos os elementos constituintes do modelo (alvenaria, concreto, aço, esquadrias, etc).

Em seguida, devem ser inseridas no cenário as condições de contorno do problema. Para todas as simulações descritas, foram atribuídas três condições de contorno: velocidade, pressão e condição de deslizamento/simetria.

A fonte de vento atua de forma perpendicular à maior dimensão da edificação, com a velocidade inicial de 30 m/s (valor de velocidade básica do vento para o estado de Sergipe). Assim, definiu-se na face do túnel de vento paralela à dimensão l , uma condição de velocidade igual a 30 m/s.

Na face do túnel de vento oposta à superfície que recebeu a aplicação da condição de velocidade inicial, aplica-se a condição de pressão manométrica igual a zero, ou seja, pressão absoluta igual à pressão atmosférica.

Por fim, nas quatro faces restantes do túnel, impõe-se uma condição de deslizamento/simetria (*slip/symmetry*, em inglês). Isso significa que o fluido se movimentará acompanhando a direção dessas superfícies, porém sem tentar atravessá-las.

A Figura 50 mostra o aspecto do modelo após a atribuição das condições de contorno. Em preto, a face na qual age a condição de velocidade inicial e, oposta a essa, em tom de laranja, a superfície com a condição de pressão relativa igual a zero. Na cor azul, são representadas as faces com a condição de deslizamento/simetria.

A disposição dos eixos cartesianos x, y e z no modelo é mostrada na Figura 51.

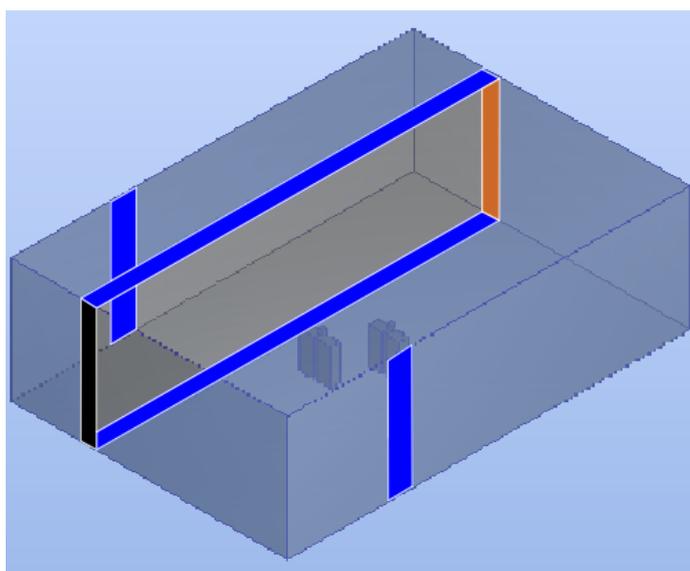


Figura 50 – Modelo após das condições de contorno

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

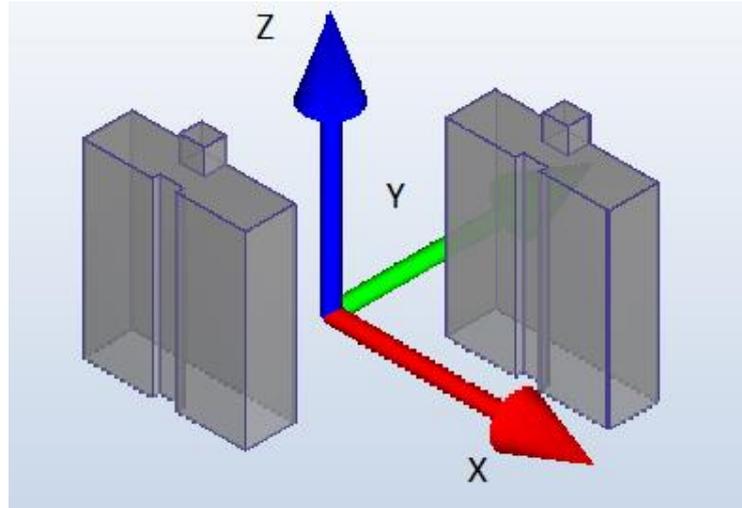


Figura 51 – Eixos cartesianos do modelo

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

A última etapa da modelagem consiste na geração de malha de elementos. Para as simulações analisadas, utilizou-se a função de geração automática de malha, com o posterior ajuste manual do tamanho dos elementos, de modo a aumentar a precisão.

Com isso, procede-se para o cálculo do cenário através do *solver* nativo do programa. Ao executar o *solver*, o programa solicita o número de iterações que devem ser realizados. Esse número foi definido em 1000, todavia, todas as iterações convergiram antes desse valor, ocasionando a parada automática do *solver*.

Após o fim da etapa de solução numérica, é possível visualizar os resultados da simulação. Para os fins deste trabalho, as variáveis analisadas foram a magnitude do vetor de velocidade, as pressões e forças atuante nas superfícies dos edifícios e as coordenadas da força resultante nos eixos cartesianos.

A fim de verificar os valores de força e pressão obtidos a partir da simulação CFD com os resultados calculados a partir da metodologia descrita pela NBR 6123/1988, calculou-se os valores de força de arrasto na direção de incidência do vento a partir do procedimento normativo, com o auxílio do *software* Ciclone. Os valores obtidos foram comparados com os dados de saída das simulações 1 e 2 e calculou-se a diferença relativa da seguinte forma:

$$d (\%) = \frac{|Força_{norma} - Força_{CFD}|}{Força_{norma}} \cdot 100\%$$

Para os demais cenários, realizou-se uma análise qualitativa dos resultados obtidos.

5. RESULTADOS

O programa Autodesk CFD oferece a possibilidade de visualizar os resultados de saída na forma de planos de corte, análise isolada de superfícies e visualização tridimensional.

Os resultados obtidos são descritos a seguir.

5.1. Simulação 1.1

Inicialmente, gerou-se o perfil da componente y do vetor de velocidade (V_y) que, para o caso de um único edifício, pode ser melhor visualizado através de um corte longitudinal que passa no centro da edificação. O resultado obtido é mostrado na Figura 52.

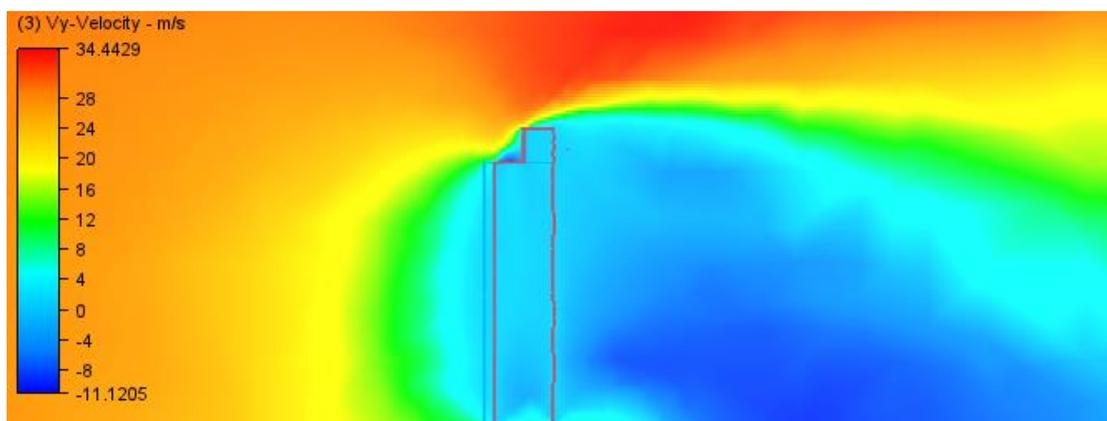


Figura 52 – Simulação 1.1: Perfil de velocidade de V_y

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

A análise da figura permite visualizar que a velocidade do vento parte de um valor próximo de 30 m/s e, à medida que se aproxima do obstáculo (edifício), sua intensidade diminui, devido à quebra da velocidade do fluido nas proximidades do anteparo, chegando a valores inferiores a de 4 m/s. Na aresta do nível da cobertura, é possível visualizar o descolamento da camada limite e, na região entre esta e a parede do reservatório, há o surgimento de velocidades negativas (sucção).

A sotavento do edifício, a componente V_y assume valores negativos, indicando a região da esteira do fluido, caracterizada por turbulência e pressões de sucção.

A Figura 53 mostra a pressão atuante na fachada do edifício. Devido à ausência de obstáculos no terreno, a pressão distribui-se de forma aproximadamente constante, com um valor de aproximadamente 500 Pa. Conforme o vento se aproxima das arestas da edificação, há o descolamento da camada limite e resultante das pressões (resistência de forma) passa a ser negativa, gerando sucção na face com valores de até 1092 Pa.

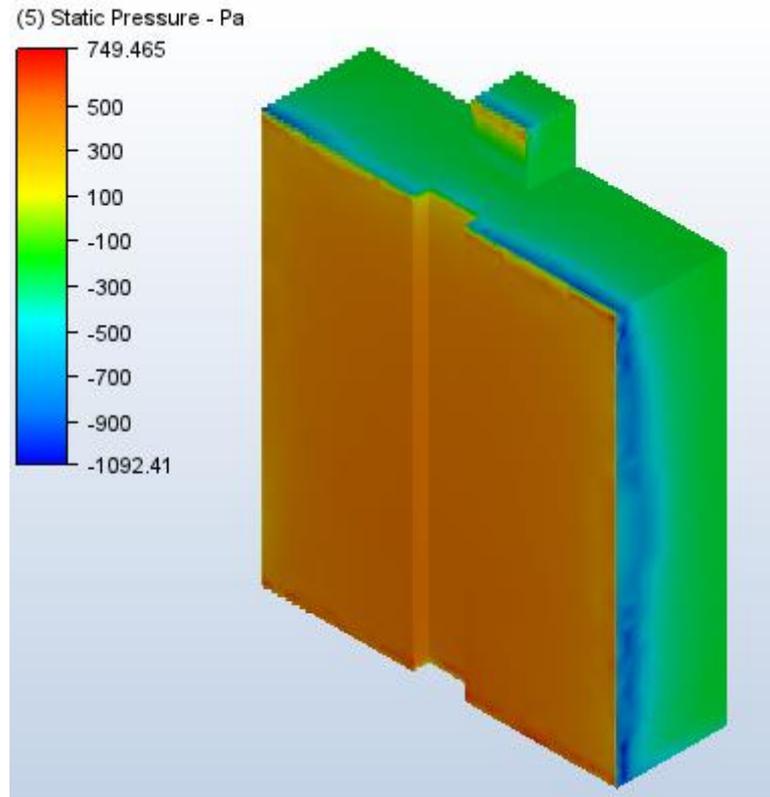


Figura 53 - Simulação 1.1: Pressões atuantes

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

Além disso, devido à geometria do prédio, há a ocorrência do efeito esteira, com surgimento de turbulência e de pressões de sucção na região a sotavento da edificação. Tal efeito pode ser visto na Figura 54.



Figura 54 – Simulação 1.1: Efeito esteira

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

A força resultante na fachada de maior dimensão foi calculada pelo *software* CFD como sendo igual a 406,660 kN, com uma excentricidade em relação à base do modelo de 13,08m.

O cálculo das pressões de vento seguindo o procedimento da NBR 6123/1988, realizado com o *software* Ciclone, resultou nas velocidades e pressões mostradas na Tabela 3. Os parâmetros utilizados para o cálculo foram:

$$V_0 = 30 \text{ m/s}$$

Categoria I

Classe B

Tabela 3 – Simulação 1.1: Velocidade característica, pressão e força distribuída

| Altura | V_k (m/s) | q (kN/m ²) | q_{eq} (kN/m) |
|-----------------|-------------|--------------------------|-----------------|
| 0,00 - 3,00 m | 30,18 | 0,56 | 12,95 |
| 3,00 - 6,00 m | 31,56 | 0,61 | 14,17 |
| 6,00 - 9,00 m | 32,40 | 0,64 | 14,93 |
| 9,00 - 12,00 m | 33,03 | 0,67 | 15,52 |
| 12,00 - 15,00 m | 33,51 | 0,69 | 15,97 |
| 15,00 - 18,00 m | 33,90 | 0,70 | 16,34 |
| 18,00 - 21,00 m | 34,26 | 0,72 | 16,69 |
| 21,00 - 24,00 m | 34,53 | 0,73 | 16,96 |
| 24,00 - 27,00 m | 34,80 | 0,74 | 17,22 |

Fonte: Autor via *software* Ciclone

O coeficiente de arrasto para a geometria analisada é igual a 1,34. Assim, a força distribuída atuante em cada faixa de altura é mostrada na Figura 55, com valores em kN/m.

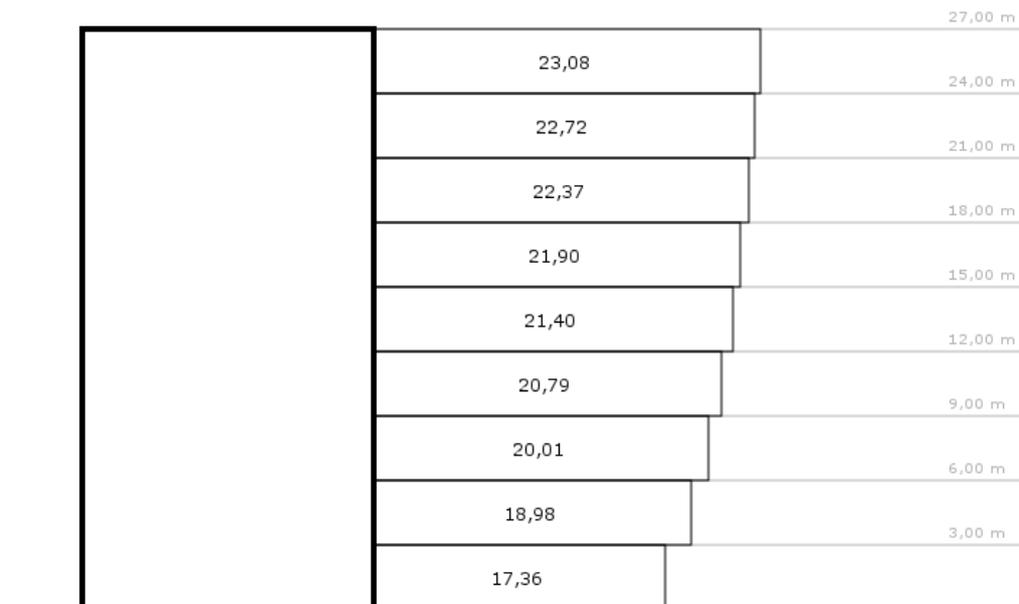


Figura 55 – Simulação 1.1: Forças de vento

Fonte: Autor via *software* Ciclone

Multiplicando-se os valores de q_p pela altura de cada faixa (3,0m), obtém-se as forças, em kN. A força resultante é igual a 565,5 kN e o momento de tombamento causado tem o valor de 7998,1 kN.m, resultando em uma excentricidade em relação à base de 14,14m, o qual ficou muito próximo do encontrado via CFD.

5.2. Simulação 1.2

A inserção de rugosidade no terreno modificou consideravelmente o perfil de velocidade do vento, conforme ilustra a Figura 56.

Em uma altura próxima do topo dos obstáculos inseridos, a componente V_y da velocidade decresce conforme se aproxima do edifício, em uma faixa de 25 m/s até 6 m/s na linha de obstáculos mais próxima do prédio. Como esperado, em cotas superiores, esse valor fica mais próximo ao valor inicial de 30 m/s. No espaço entre os obstáculos e a edificação de referência, pode-se perceber a presença de zonas de baixa velocidade, com valores na faixa de 4 m/s e, mais próximo do nível de base das construções, surgem velocidades negativas de até 10 m/s. Esses valores indicam o surgimento de regiões de pressão negativa.

A presença da rugosidade ocasiona, no edifício, velocidades mais baixas em sua base (inferiores a 5 m/s), que aumentam ao longo da altura.

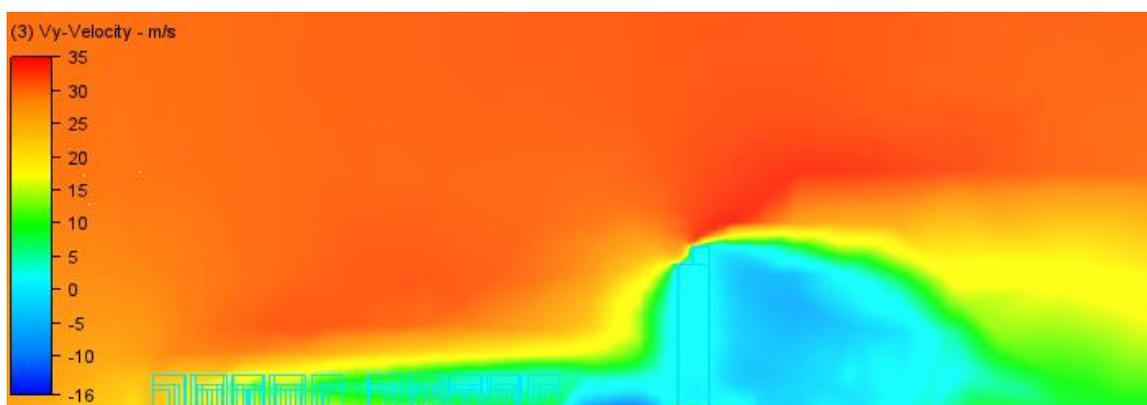


Figura 56 – Simulação 1.2: perfil de velocidade de V_y

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

Os objetos localizados mais próximos de barlavento, são submetidos a maiores pressões, conforme ilustra a Figura 57, com valores entre 500 e 800 Pa. Já na face superior, há o surgimento de pressões de sucção na faixa de 100 Pa.

Quando se analisa a pressão na edificação de referência, nota-se que, diferentemente da simulação 1.1, a distribuição dessa variável não é mais aproximadamente uniforme na fachada. É possível visualizar uma variação de intensidades que, na base do edifício, assumem valores

de aproximadamente 100 Pa (região 1); já no terço médio da altura (região 2) há uma faixa de transição entre 200 e 300 Pa. Por fim, a pressão começa a apresentar uniformidade, com um valor de aproximadamente 450 Pa (região 3).

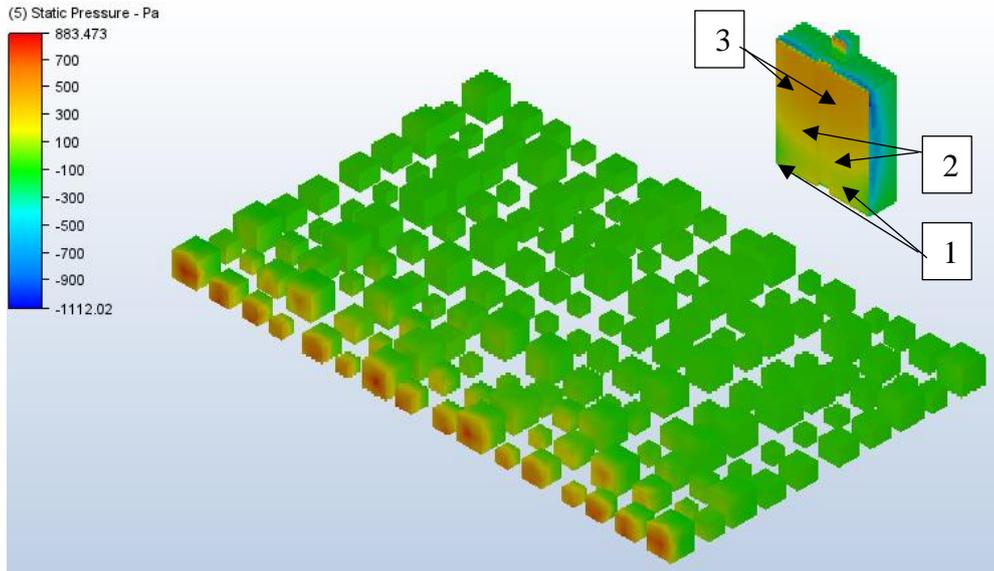


Figura 57 – Simulação 1.2: Pressões atuantes

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

A força resultante na fachada de maior dimensão obtida a partir do *software* CFD foi de 290,297 kN, com uma excentricidade em relação à base do edifício de 15,33m.

A mudança da classificação do terreno para categoria III, de acordo com a classificação da NBR 6123/1988 resultou nas velocidades e pressões mostradas na Tabela 4. Os parâmetros utilizados para o cálculo foram:

$$V_0 = 30 \text{ m/s}$$

Categoria III

Classe B

Tabela 4 – Simulação 1.2: Velocidade característica, pressão e força distribuída

| Altura | V_x (m/s) | q (kN/m ²) | q_{eq} (kN/m) |
|-----------------|-------------|--------------------------|-----------------|
| 0,00 - 3,00 m | 24,36 | 0,36 | 8,44 |
| 3,00 - 6,00 m | 26,19 | 0,42 | 9,75 |
| 6,00 - 9,00 m | 27,33 | 0,46 | 10,62 |
| 9,00 - 12,00 m | 28,17 | 0,49 | 11,29 |
| 12,00 - 15,00 m | 28,83 | 0,51 | 11,82 |
| 15,00 - 18,00 m | 29,40 | 0,53 | 12,29 |
| 18,00 - 21,00 m | 29,88 | 0,55 | 12,70 |
| 21,00 - 24,00 m | 30,30 | 0,56 | 13,06 |
| 24,00 - 27,00 m | 30,66 | 0,58 | 13,37 |

Fonte: Autor via *software* Ciclone

A força distribuída atuante em cada faixa de altura, com valores em kN/m, é mostrada na Figura 58.

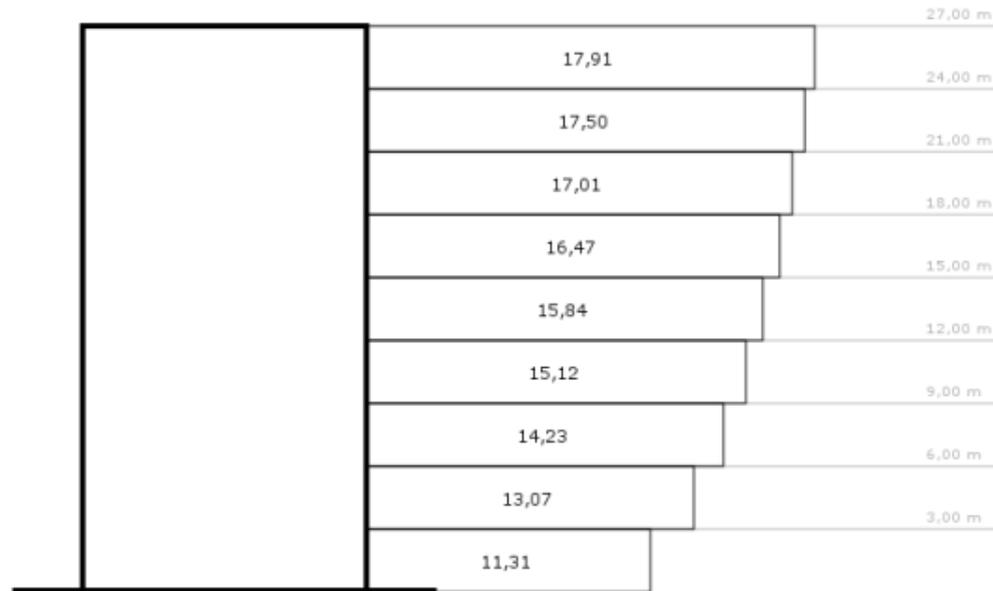


Figura 58 – Simulação 1.2: Forças de vento

Fonte: Autor via *software* Ciclone

A força resultante obtida é igual a 415,4 kN e causa um momento de tombamento igual a 6027,0 kN.m. Assim, a excentricidade da força em relação à base do edifício é de 14,51m, próximo ao determinado via CFD.

5.3. Simulação 2.1

Para melhor visualização da passagem do vento entre os edifícios, definiu-se um plano de corte situado na metade da altura dos prédios. A Figura 59 mostra o resultado obtido.

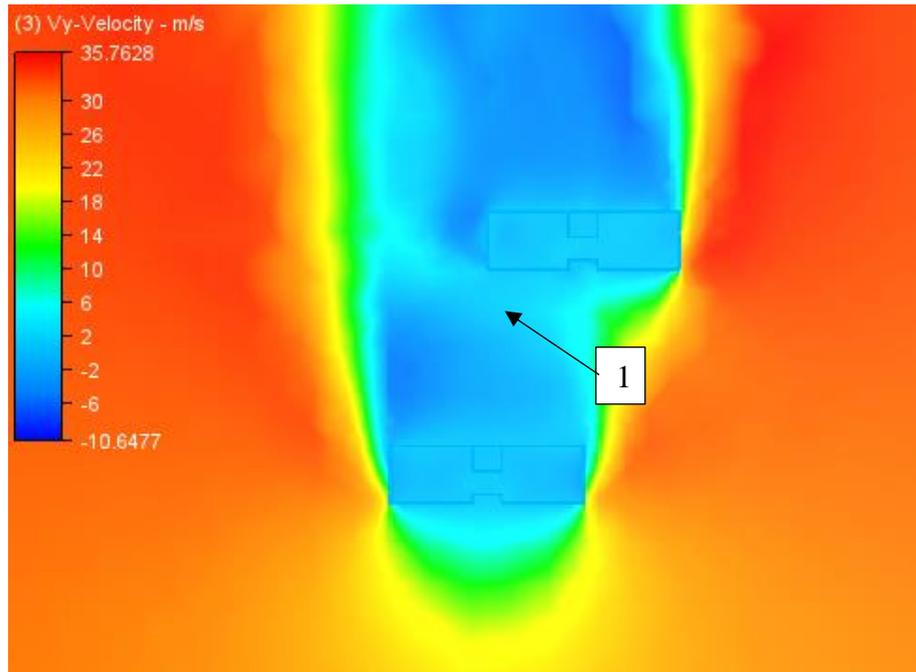


Figura 59 – Simulação 2.1: Perfil de velocidade de V_y

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

Assim como nas simulações anteriores, a sotavento dos obstáculos há a presença do efeito de esteira, onde V_y assume valores negativos. Entretanto, devido à presença de uma segunda obstrução no sentido do fluxo, existe uma região entre a esteira do primeiro prédio e a fachada do segundo na qual o vento flui com velocidades mais baixas, porém positivas (região 1).

A configuração descrita leva ao surgimento de pressões de sucção na parte da fachada do edifício analisado que se encontra sobreposta pelo primeiro prédio. A Figura 60 mostra o comportamento da pressão nas duas edificações e a Figura 61 ilustra, para melhor visualização, o edifício de referência.

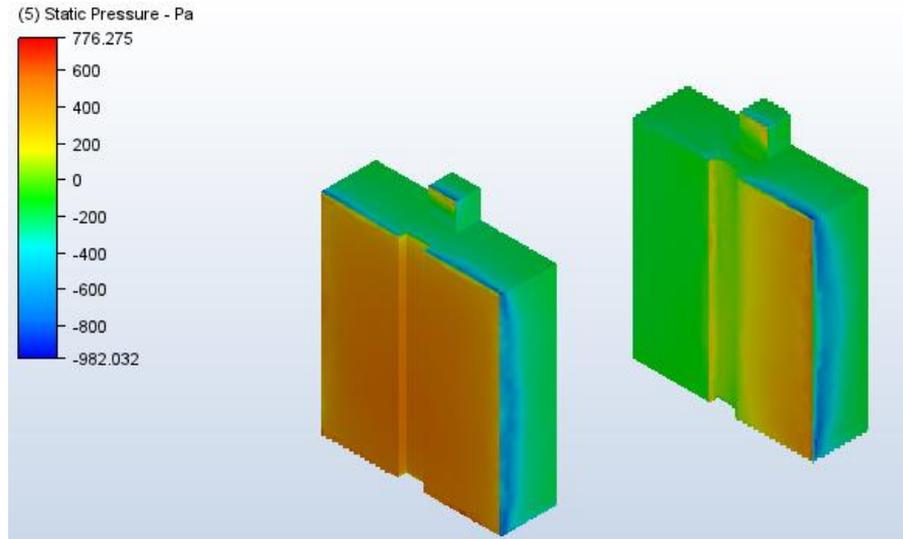


Figura 60 – Simulação 2.1: Pressões atuantes

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

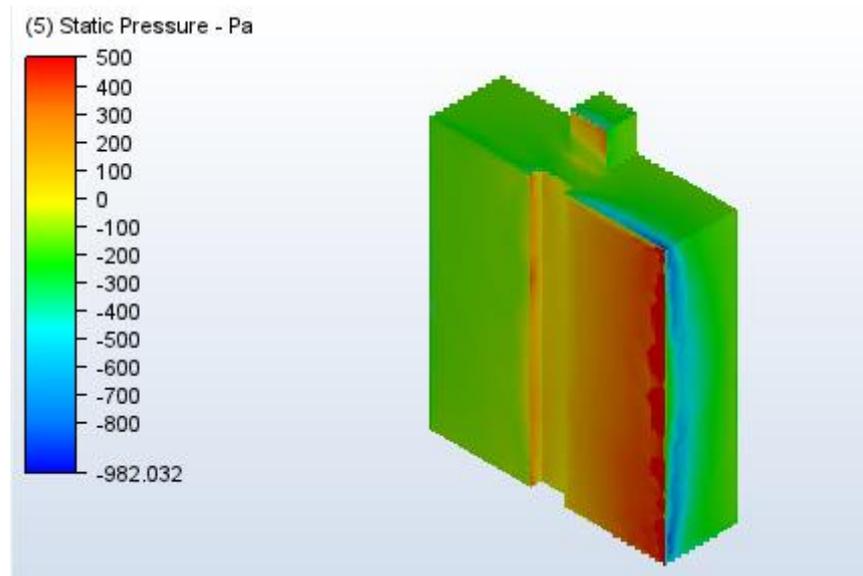


Figura 61 – Simulação 2.1: Pressões atuantes no Edifício de referência

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

Pode-se notar que cada um dos lados da fachada da edificação de referência está submetido a pressões com sentidos de atuação diferentes, com valores médios iguais a -124 Pa e 276 Pa. Com isso, há o surgimento de um efeito de torção em torno do eixo z , solicitando os pilares de cada um dos lados do edifício de formas diferentes.

5.4. Simulação 2.2

De forma semelhante ao realizado na simulação anterior, traça-se um plano de corte na metade da altura do edifício, conforme ilustrado na Figura 62.

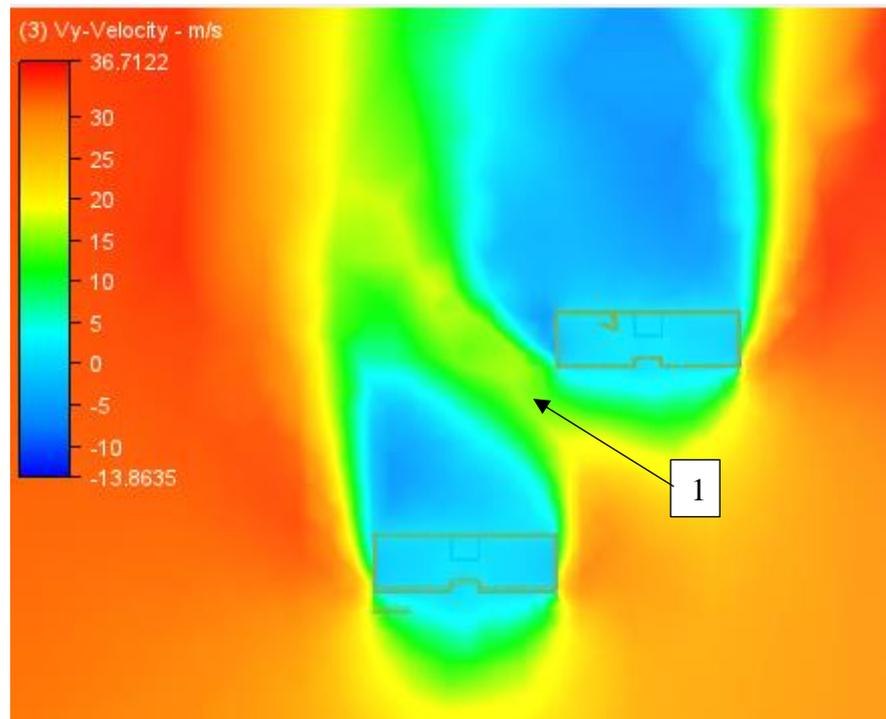


Figura 62 – Simulação 2.2: perfil de velocidade de V_y

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

A não sobreposição das dimensões ocasiona, no espaço entre a esteira do primeiro edifício e a fachada do segundo, uma zona pela qual o vento escoa com velocidades na faixa de 15 m/s (região 1). Essa região apresenta uma transição mais suave entre as velocidades negativas provenientes da esteira do primeiro obstáculo e a perturbação causada pelo segundo objeto.

A figura seguinte mostra, em seção transversal no meio do edifício, o perfil de velocidade V_y apenas na edificação de referência.

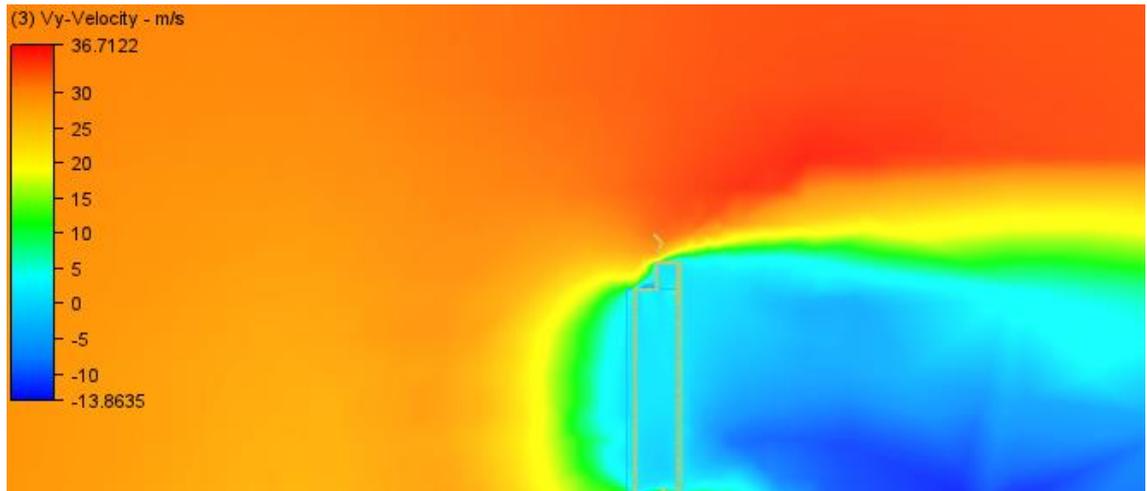


Figura 63 – Simulação 2.2: perfil de velocidade de V_y no Edifício de referência

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

O perfil do escoamento mostra-se bastante semelhante ao obtido para a simulação 1.1, com a diferença de que, devido à presença do primeiro obstáculo, a velocidade é reduzida para valores na faixa de 27 m/s e diminui à medida que se aproxima do edifício.

As pressões atuantes são mostradas na Figura 64. Devido ao espaçamento das edificações, essa variável apresenta uma distribuição quase uniforme, de forma semelhante ao que acontece na simulação 1.1. Todavia, na fachada do edifício de referência mais próxima do primeiro obstáculo, pode-se perceber que há uma diminuição na pressão devido à presença da região vista na Figura 62.

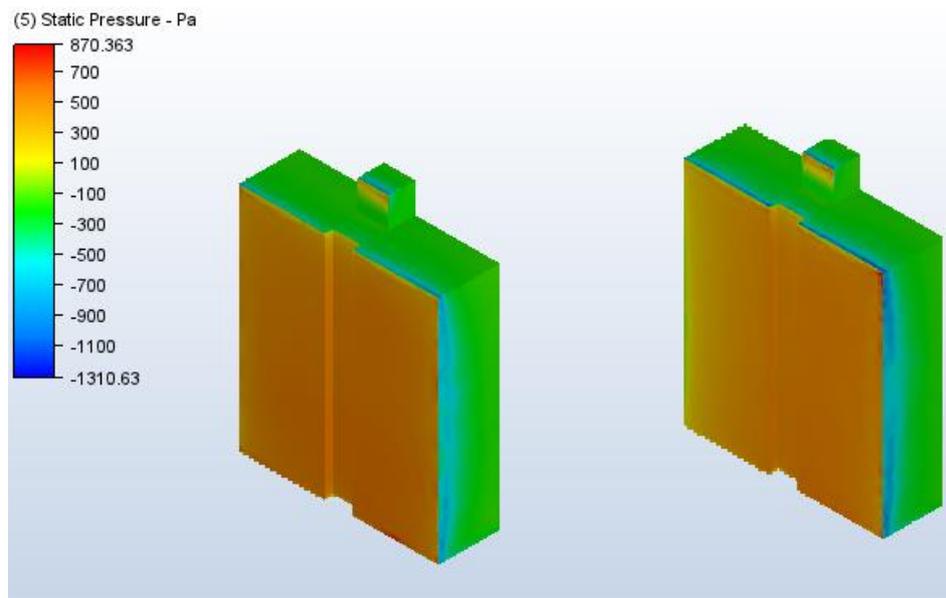


Figura 64 – Simulação 2.2: Pressões atuantes

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

No primeiro edifício, o valor médio da pressão é de 520 Pa. Já na edificação seguinte, na parte da fachada mais afastada do primeiro prédio, o valor médio é de 500 Pa ao passo que, na fachada mais próxima, a pressão média é de 400 Pa.

5.5. Simulação 2.3

A inserção de um terceiro obstáculo ocasiona o perfil de velocidade V_y representado na figura a seguir, obtida por meio de um corte na metade da altura do edifício.

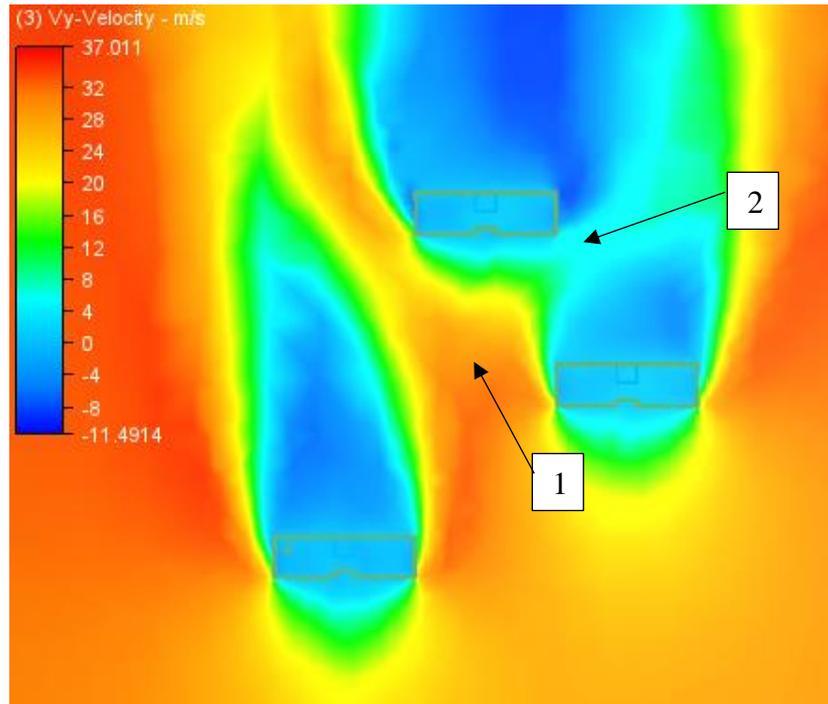


Figura 65 – Simulação 2.3: perfil de velocidade de V_y

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

No centro da imagem (região 1), pode-se perceber uma região de maior velocidade, chegando a ultrapassar os 32 m/s, sendo superior ao valor da velocidade inicial definida. Verifica-se também, entre o segundo e terceiro obstáculo, a presença de uma região similar à formada na simulação 2.1, com a velocidade do vento na faixa de 5 m/s (região 2).

A Figura 66 ilustra o resultado obtido para as pressões.

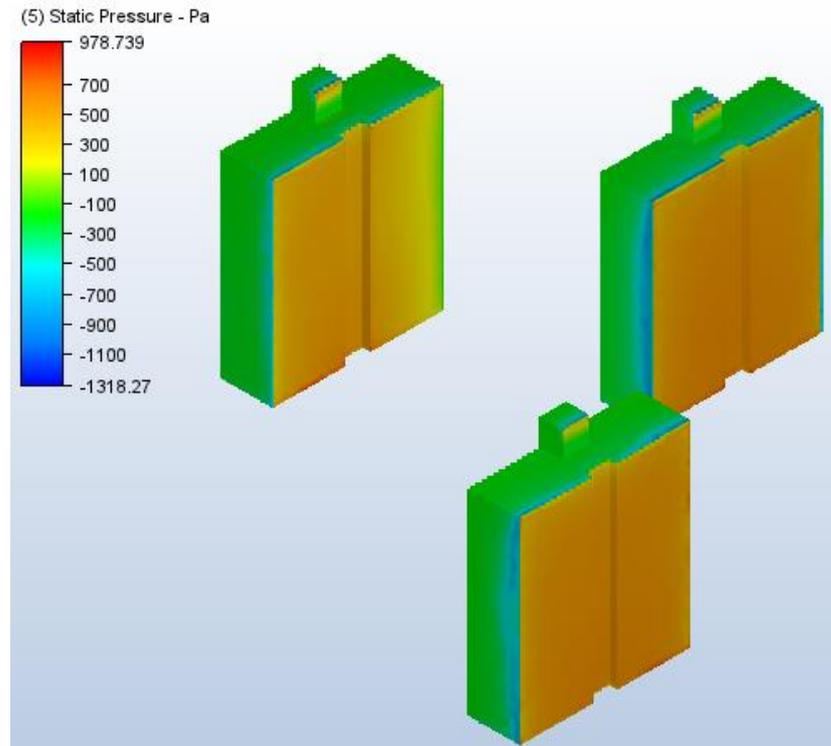


Figura 66 – Simulação 2.3: pressões atuantes

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

O espaçamento entre os dois primeiros obstáculos diminui a influência do primeiro edifício sobre o segundo, com pressões iguais a 520 Pa e 529 Pa, respectivamente, com uma distribuição aproximadamente uniforme. No entanto, no edifício de referência, semelhante ao que acontece na simulação 2.2, o segundo objeto influencia na distribuição de pressões, sendo verificados valores médios na faixa dos 460 Pa para o lado mais distante do segundo edifício e média de 285 Pa na face mais próxima deste.

5.6. Simulação 2.4

O perfil da componente V_y da velocidade é mostrado nas figuras a seguir. Na Figura 67 o comportamento da variável é representado por meio de um plano de corte que secciona o modelo na metade da altura e, na Figura 68, em corte longitudinal que passa pelo centro do edifício de referência.

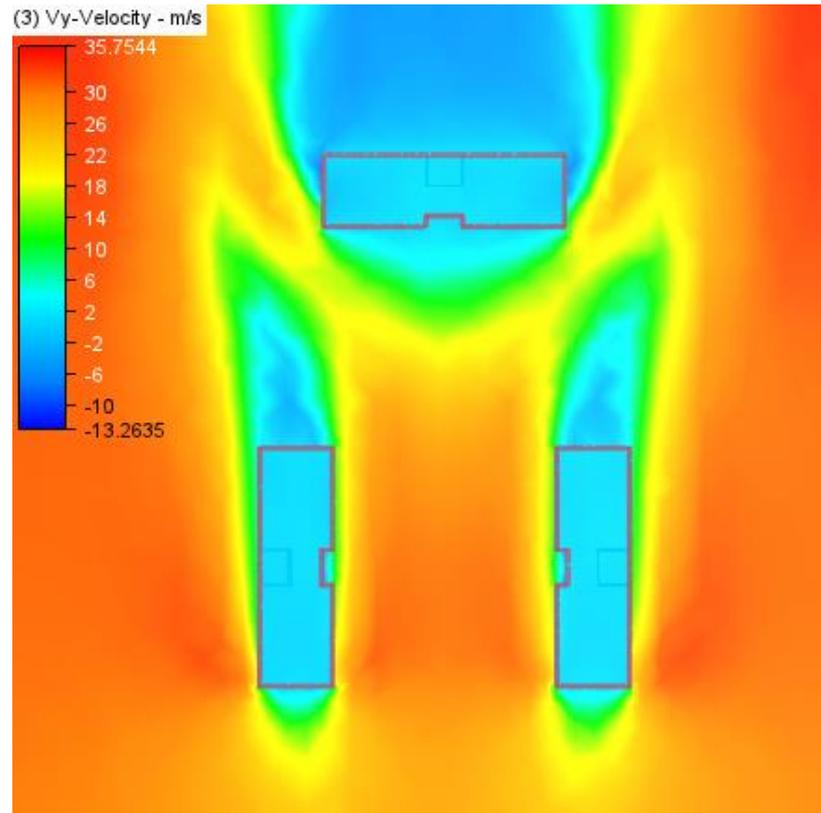


Figura 67 – Simulação 2.4: perfil de velocidade de V_y .

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

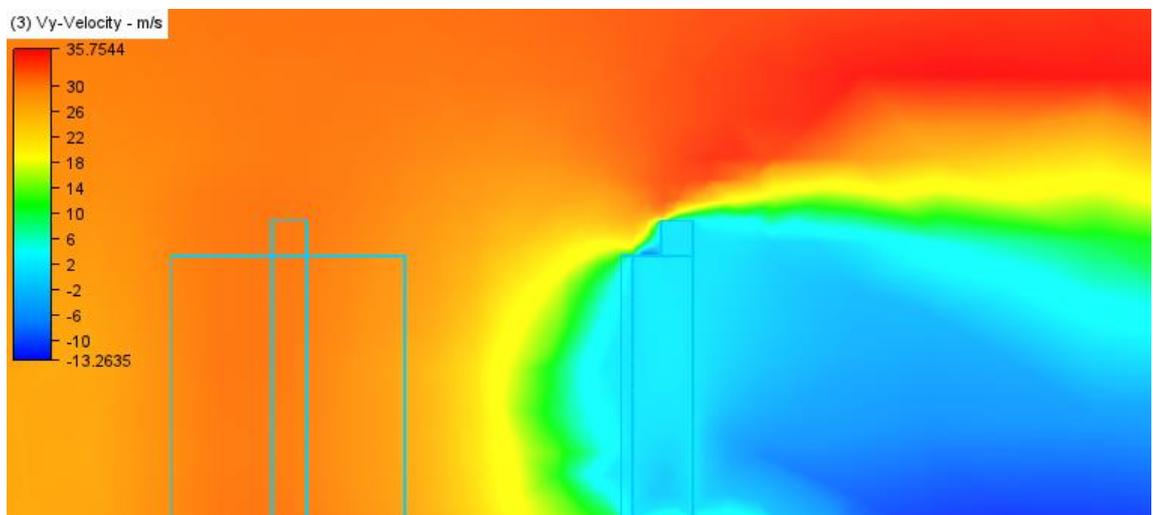


Figura 68 – Simulação 2.4: perfil de velocidade de V_y : vista longitudinal

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

Ao se aproximar dos dois primeiros obstáculos, há uma redução da velocidade V_y para valores na faixa de 27 m/s. Em seguida, enquanto o escoamento flui pelo espaço entre os dois prédios paralelos, verifica-se que V_y aumenta para aproximadamente 30 m/s, chegando a valores próximos de 31 m/s no centro da distância entre os dois edifícios, e, devido à

proximidade do terceiro obstáculo, há novamente um decréscimo em seu valor. Além disso, a sotavento dos dois prédios paralelos, nota-se um desprendimento de vórtices, o que pode induzir um drapejamento.

O aumento da velocidade nessa região interfere diretamente na pressão exercida nos três prédios, conforme ilustra a Figura 69 e a Figura 70, mostradas a seguir. Ambas as imagens representam a mesma variável, porém ângulos distintos, permitindo a visualização de todas as edificações.

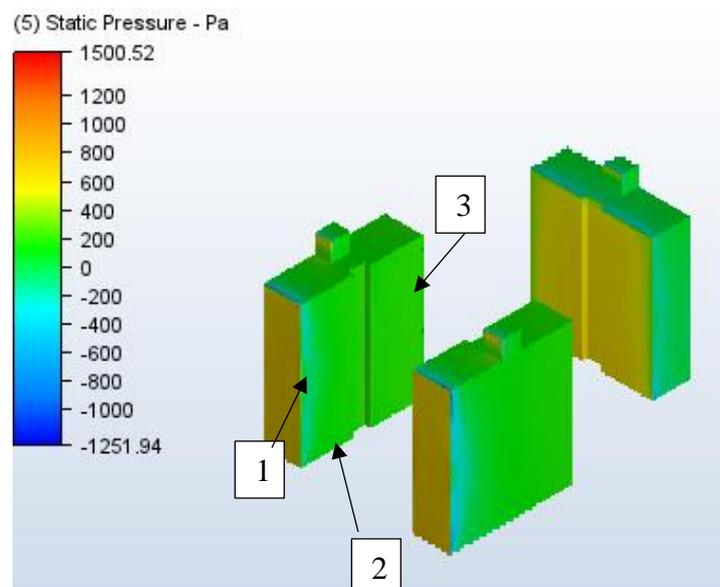


Figura 69 – Simulação 2.4: Pressões atuantes -Vista 1

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

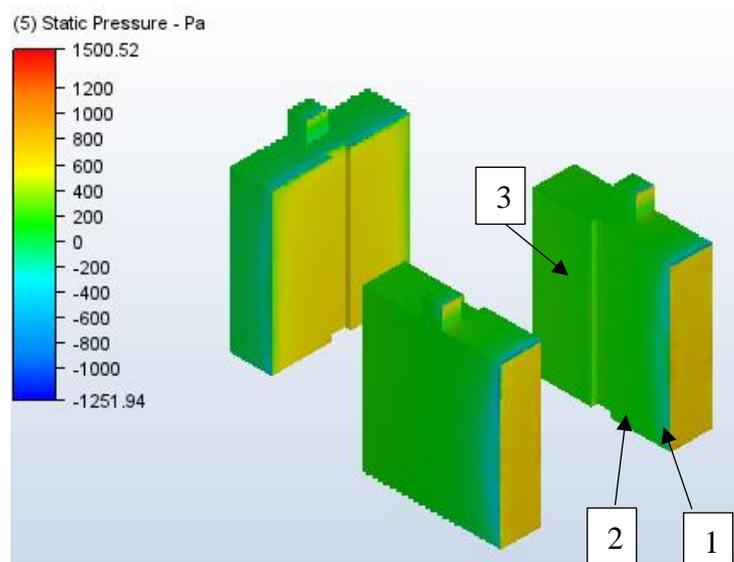


Figura 70 – Simulação 2.4: Pressões atuantes - Vista 2

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

Nos dois primeiros edifícios, a pressão atua na face perpendicular ao sentido do escoamento com valores médios de 550 Pa, apresentando uma distribuição aproximadamente uniforme.

Já na fachada paralela ao fluxo, a pressão se comporta de três maneiras diferentes, indicadas pela numeração 1, 2 e 3 nas duas figuras anteriores. Em 1, devido às pressões de sucção que atuam nas arestas das faces perpendiculares ao sentido do escoamento, a primeira metade das fachadas dos dois edifícios estão sujeitas a pressões negativas, com uma média de 90 Pa. Em seguida, na região 2, já existem pressões positivas com média de 25 Pa. Finalmente, na superfície 3, a pressão atuante tem média igual a 37 Pa.

Analisando agora o edifício de referência, as figuras permitem verificar uma distribuição aproximadamente uniforme das pressões em sua fachada, sendo ligeiramente maiores no centro e decrescendo conforme aproxima-se das arestas onde, devido ao descolamento da camada limite e a resistência de forma, surgem pressões de sucção. O valor médio da pressão na fachada é de 450 Pa.

5.7. Simulação 3.1

Com a inserção de rugosidade de altura próxima à do edifício de referência, obteve-se, através de plano de corte no meio do edifício, o perfil da componente V_y da velocidade mostrado. O resultado obtido é mostrado na Figura 71.

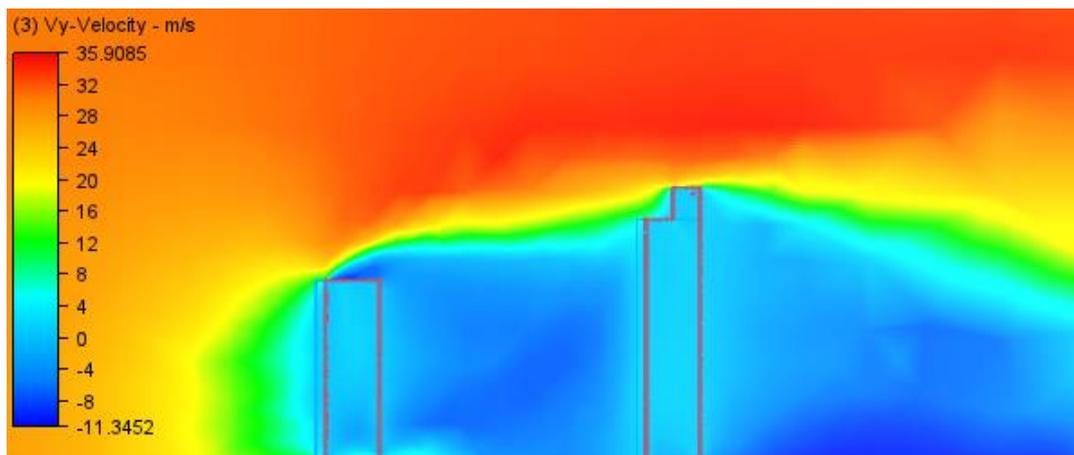


Figura 71 – Simulação 3.1: perfil de velocidade de V_y

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

A velocidade V_y decresce à medida que se aproxima do primeiro obstáculo e assume valores negativos a sotavento dos dois edifícios. É possível notar que, na região compreendida entre os dois prédios, essa variável é negativa, com valor mínimo de 7,5 m/s. No entanto,

diferentemente da simulação 1.2, não há a formação de vórtices no nível mais próximo da base das edificações.

Analisando-se a pressão atuante, foram obtidos os resultados ilustrados na figura a seguir.

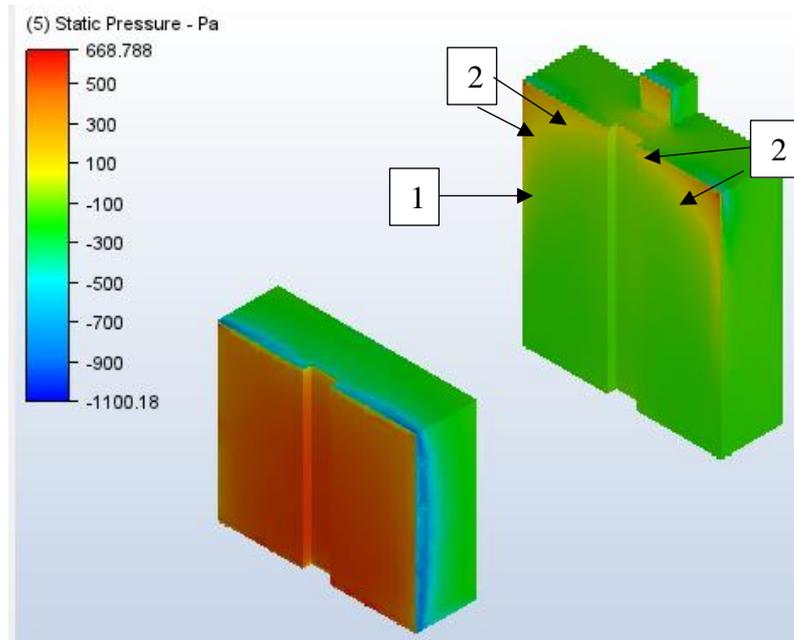


Figura 72 – Simulação 3.1: Pressões atuantes

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

No menor edifício a pressão se distribui de forma quase uniforme, diminuindo conforme se aproxima das arestas. O valor médio da variável nas faces do prédio é de 480 Pa.

Já no edifício de referência, a pressão apresenta um comportamento diferente, com locais sujeitos a pressões positivas e regiões de sucção. Do nível da base do edifício até aproximadamente a altura de 24m, existem pressões negativas agindo na superfície (região 1). O contorno marcado pela nomenclatura 2 destaca uma região curva, mostrado em tons de amarelo, onde nota-se o aparecimento de pressões positivas. Acima desse contorno, as pressões aumentam até decrescerem devido à proximidade com a aresta do topo.

Assim, o maior edifício está sujeito majoritariamente a pressões de sucção.

5.8. Simulação 3.2

A figura a seguir mostra, em corte longitudinal no centro do edifício, o perfil da componente V_y da velocidade.

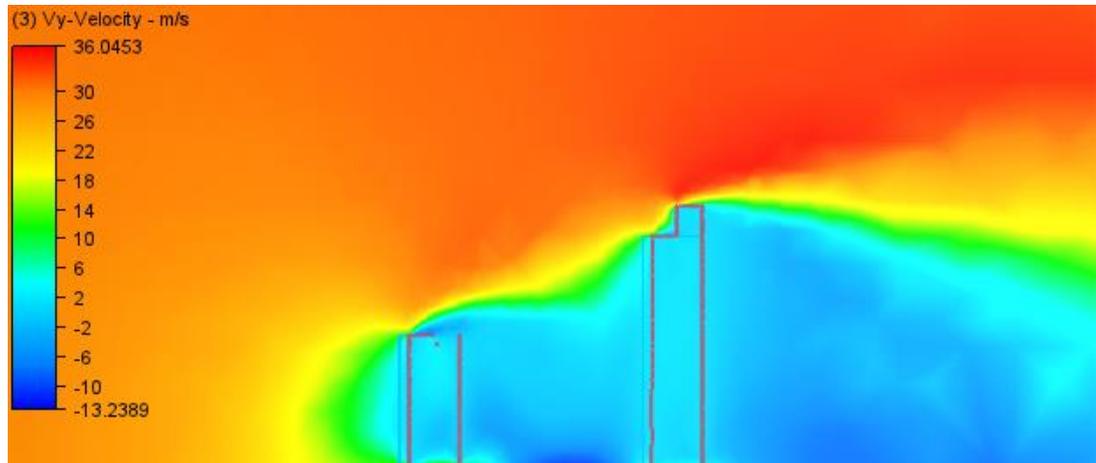


Figura 73 – Simulação 3.2: Perfil de velocidade de V_y

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

O resultado de saída é semelhante ao que acontece na simulação 1.2: velocidades negativas na região da esteira dos dois edifícios e também no espaço entre eles, apresentando valores de até -10 m/s próximo ao nível de base das edificações.

Na primeira edificação, assim como na simulação anterior, devido à ausência de obstáculos a barlavento, a pressão também apresenta uma distribuição aproximadamente uniforme, com média de 480 Pa.

Da mesma forma, a distribuição da pressão no edifício de referência é alterada devido à altura do primeiro obstáculo, sendo possível observar três faixas de valores no decorrer da altura. Da base do edifício até aproximadamente metade da sua altura (região 1), toda a superfície está sujeita a pressões de sucção. Após isso, a partir do contorno em amarelo indicado em 2, a pressão aumenta até valores de 430 Pa (região 3) antes das arestas do topo da edificação, local onde decresce para valores negativos.

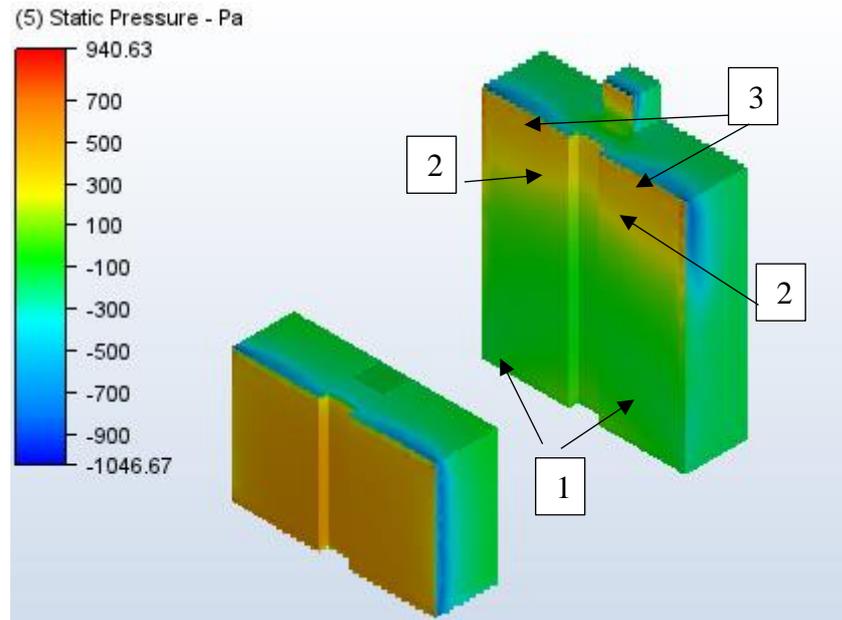


Figura 74 – Simulação 3.2: Pressões atuantes - Vista 2

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

5.9. Simulação 3.3

Na última simulação realizada, obteve-se, a partir de corte longitudinal no centro do edifício, o perfil da componente V_y da velocidade mostrado na Figura 75.

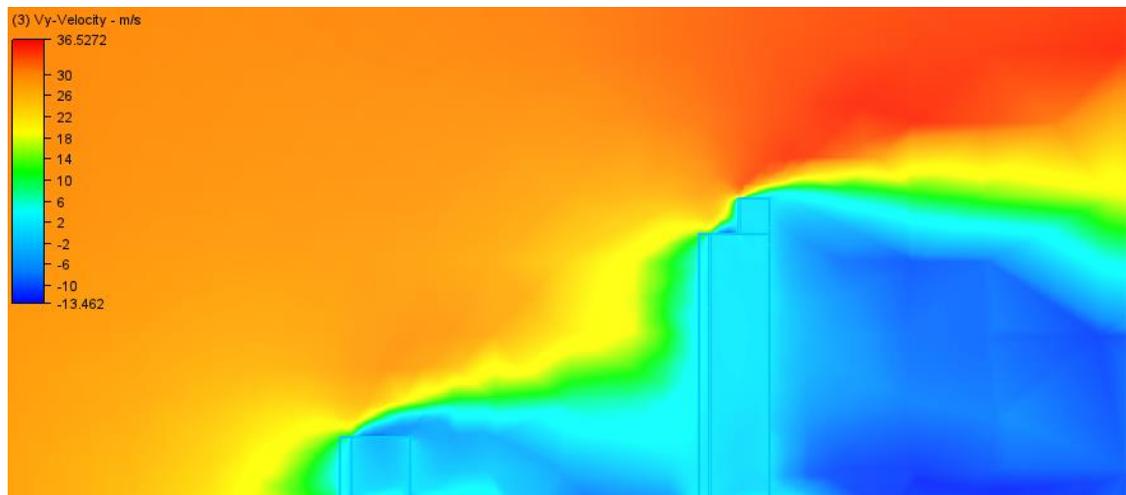


Figura 75 – Simulação 3.3: Perfil de velocidade de V_y

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

Na zona de esteira do primeiro obstáculo, a velocidade assume valores negativos de até 3 m/s. No entanto, conforme o escoamento se aproxima do edifício de referência, surge uma região que apresenta velocidades de até 10 m/s, próximo ao nível de base das edificações. A situação assemelha-se à encontrada na simulação 1.2, com a diferença de que a zona com menores velocidades está mais próxima do maior edifício.

A Figura 76 apresenta a distribuição de pressões obtida.

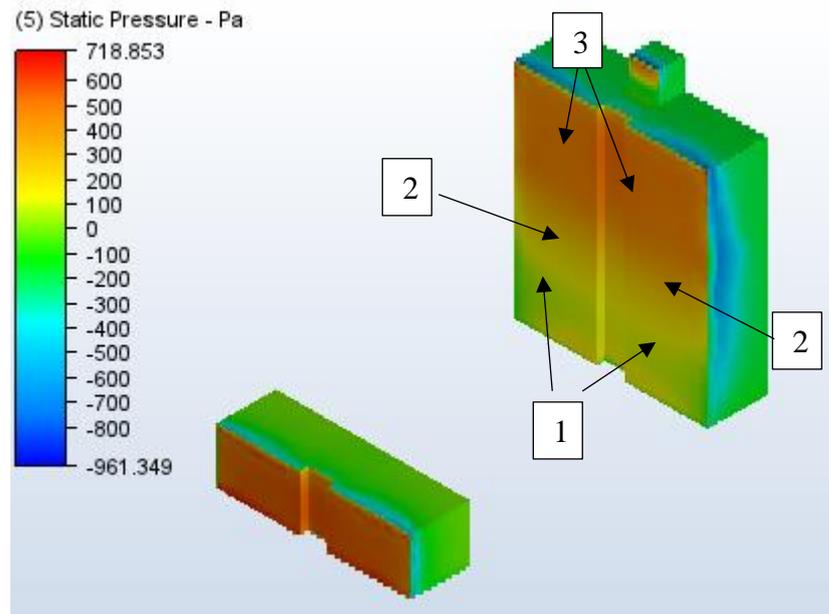


Figura 76 – Simulação 3.3: Pressões atuantes

Fonte: Autor via *software* Autodesk CFD

A edificação a barlavento apresenta uma pressão média de 520 Pa, valor superior ao das outras duas simulações do cenário. Devido ao fato de a edificação ser consideravelmente mais baixa em relação ao edifício de referência, o vento é menos turbulento, havendo menor diminuição da velocidade na parte superior do edifício

O edifício de referência, por sua vez, não se encontra sujeito a pressões de sucção na fachada a barlavento, apresentando pressões maiores à medida que a altura aumenta. Na região 1, que tem uma altura aproximadamente igual à do primeiro obstáculo, atuam pressões na faixa de 100 Pa. Em seguida, na região 2, a pressão atuante aumenta para valores na faixa de 220 Pa e, por fim, na zona 3, são obtidos valores de pressão na faixa de 460 Pa.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou a influência de diferentes condições de vizinhança no comportamento do vento, reproduzindo situações presentes em centros urbanos. A análise dos cenários com o auxílio de um *software* CFD, permitiu a visualização de perfis de velocidade, distribuição de pressões e cálculo de forças atuantes.

De forma geral, devido à forma rombosa da edificação, com a presença de arestas vivas em seu contorno, há uma perturbação no escoamento, ocasionando o descolamento da camada limite em suas arestas, gerando zonas de sucção e, a sotavento do edifício, a formação do efeito esteira.

Quando se trata da edificação de forma isolada (simulação 1.1), a pressão distribui-se de forma aproximadamente uniforme em pontos de mesma altura na superfície perpendicular ao sentido do vento, conforme a hipótese de cálculo presente na NBR 6123/1988. A força obtida pelo programa CFD mostrou-se próxima ao resultado calculado através do procedimento normativo, apresentando uma diferença de 28%. Além disso, as excentricidades em relação à base do edifício obtidas via CFD e pelo cálculo de norma mostram-se próximas.

A inserção de rugosidade realizada na simulação 1.2, modificou o perfil do escoamento. Os obstáculos inseridos reduzem a velocidade do vento e, por consequência, a pressão que atua no edifício de referência, chegando a gerar pressões de sucção na fachada. A força de arrasto obtida pela simulação CFD apresentou uma diferença de 30% em relação ao resultado calculado pelo procedimento de norma, apresentando também uma excentricidade próxima à obtida a partir do cálculo normativo.

As diferenças encontradas nas simulações 1 e 2, quando comparadas com o procedimento de norma, podem ser provenientes dos perfis de velocidade obtidos para cada cenário, que acabam por impactar na distribuição de pressões. Além disso, as imprecisões inerentes tanto à simulação numérica quanto ao processo normativo, podem colaborar para os diferentes valores obtidos para a força atuante. Vale ressaltar que a posição da força resultante, obtida tanto pela norma quanto via CFD, apresentou pouca variação. Tais resultados podem indicar a necessidade de uma análise paramétrica com ajustes nas dimensões e quantidade dos obstáculos para uma melhor comparação com a NBR6123/1988.

As simulações do cenário II evidenciaram a influência da vizinhança na análise do vento de uma edificação. A configuração dos edifícios na simulação 2.1 provocou uma assimetria na distribuição das pressões na edificação analisada, havendo uma superfície onde atuam pressões positivas e outra sujeita à sucção, configurando um efeito de torção em torno do eixo da altura.

Como evidenciado na simulação 2.2, o espaçamento entre os edifícios e a ausência de sobreposição de dimensões, diminui a influência do primeiro edifício no campo de pressões e de velocidades do segundo. Apesar de ainda existir uma assimetria nos valores das pressões atuantes no edifício de referência, não surgem pressões de sucção. De forma geral, a distribuição da pressão nas duas edificações é semelhante.

A inserção de um terceiro edifício no entorno (simulação 2.3), provoca alterações mais perceptíveis no escoamento do vento. Nessa configuração, a edificação analisada, mesmo não estando sobreposta por nenhum dos obstáculos, tem um dos seus lados sujeito às menores pressões causadas pela região de esteira do segundo edifício, resultando em uma diferença de aproximadamente 175 Pa entre as pressões médias atuantes nas duas faces do edifício. Além disso, nota-se que a velocidade do vento aumenta em uma região intermediária entre os dois primeiros obstáculos.

Na última simulação do cenário, a velocidade do vento aumenta em até 1 m/s na região entre os prédios paralelos. A variação da velocidade nessa região altera a pressão atuante nas fachadas paralelas dos dois primeiros obstáculos, sendo inicialmente negativa (sucção) e aumentando gradativamente até valores positivos. São notados também vórtices na região de esteira dos primeiros obstáculos. Já no edifício de referência, a pressão atuante apresenta-se aproximadamente constante, sendo maior no centro e diminuindo à medida que se aproximam as arestas da edificação. A redução pode ser consequência das menores pressões provenientes da esteira dos primeiros edifícios.

As simulações do cenário III objetivaram analisar a influência da altura das construções no escoamento do vento. Inicialmente, na simulação 3.1, nota-se que a presença de um obstáculo com altura e dimensões próximas das do edifício analisado faz com que o último esteja quase que totalmente submetido à ação de pressões de sucção. As simulações 3.2 e 3.3 mostram que, conforme a altura do obstáculo diminui, a área sujeita a pressões negativas no edifício de referência também diminui, de forma que, para um obstáculo com altura correspondente a 25% da altura do edifício analisado, a zona de sucção é inexistente.

Os diferentes resultados obtidos em cada cenário evidenciam a influência da vizinhança na análise de vento de uma edificação. Nesse sentido, a distância entre as construções, altura dos obstáculos adjacentes e o posicionamento dos edifícios colaboram para alterações no escoamento do vento, ocasionando alterações na velocidade, pressão e força de arrasto que, conforme visto no cenário I, levam a resultados diferentes dos valores obtidos através da norma.

7. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista o constante aprimoramento das ferramentas de simulação computacional, sugere-se para trabalhos e linhas de pesquisa futuras a realização de simulações de diferentes modelos de construções nas versões mais recentes dos *softwares* disponíveis, abordando configurações de vizinhança não contempladas no presente trabalho.

A análise CFD pode ser estendida a outras estruturas como pontes e edifícios com formas não paralelepípedicas. Além disso, pode ser estudado o caso de edificações situadas em vizinhanças com diferença de nível.

Aliado a isso, estudos comparativos podem ser realizados a partir da publicação da nova versão da norma NBR 6123/1988 que, até a data de realização deste trabalho, encontra-se sob revisão.

Por fim, os resultados de força e pressão atuantes podem ser levados a *softwares* de análise e dimensionamento estrutural de forma a verificar se a assimetria da distribuição de pressões ocasiona esforços adicionais nas peças estruturais.

REFERÊNCIAS

APSLEY, David. **Pre- and post-processing: Stages of CFD analysis**. Disponível em:<
<https://personalpages.manchester.ac.uk/staff/david.d.apsley/lectures/comphydr/cfdprocess.pdf>
>. Acesso em 10/08/2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123: Forças devido ao vento em edificações**. Rio de Janeiro. 1988.

AUTODESK. **Computational fluid dynamics simulation software**. Disponível em:<
<https://www.autodesk.com/products/cfd/overview>>. Acesso em 28/07/2021

BHASKARAN, Rajesh; COLLINS, Lance. **Introduction to CFD basics**. Cornell University-Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, p. 1-21, 2002.

Blessmann, J. **Aerodinâmica das construções**. 2ª edição. Ed. Sagra. 1990.

Blessmann, J. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. 1ª edição. Ed. Universidade/UFRGS. 1998

CHANETZ, Bruno. **A century of wind tunnels since Eiffel**. Comptes Rendus Mécanique, v. 345, n. 8, p. 581-594, 2017.

GONÇALVES, Roberto Martins; MUNAIAR NETO, Jorge; SALES, José Jairo de; MALITE, Maximiliano. **Ação do vento nas edificações: teoria e exemplos**. São Carlos, 1994.

LI, Jing et al. **Validation and comparison of different CFD simulation software predictions of urban wind environment based on AIJ wind tunnel benchmarks**. Apresentado em: Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design. 2018. p. 1-7.

LIMA, Fellype Augustto Ramos de; SANTOS, Raphael de Souza. **Análise da ação do vento na estrutura de edificações**. Trabalho de conclusão de curso. Unievangélica. Anápolis, 2019.

LOMAX, Harvard; PULLIAM, Thomas H.; ZINGG, David W. **Fundamentals of computational fluid dynamics**. Springer Science & Business Media, 2013.

MESKENS, Ad. **Outra perspectiva do desfiladeiro urbano da Rua 42, Manhattan, Nova Iorque**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Desfiladeiro_urbano#/media/Ficheiro:42nd_st_canyon.jpg>. Acesso em 04/08/2021

MOUKALLED, Fadl et al. **The finite volume method in computational fluid dynamics**. Berlin, Germany:: Springer, 2016.

NDM. **Vendaval derruba galpão de transportadora em Tijuca**. Disponível em: <<https://ndmais.com.br/tempo/vendaval-derruba-galpao-de-transportadora-em-tijucas/>>. Acesso em 23/08/2021

POPE, Alan; GOIN, Kenneth L. **High Speed Wind Tunnel Testing**. John Wiley & Sons, Londres. 1965. 474 p

PRAVIA, Zacarias Martin Chamberlain. **Ações do vento em edificações**. 2018. Disponível em: <http://usuarios.upf.br/~zacarias/acoes_vento.pdf> . Acesso em: 08/08/2021.

RIBEIRO, Paulo Augusto Rodrigues. **Desprendimento de vórtices e controle em esteira de cilindros por simulação numérica direta**. UFRGS. Porto Alegre, 2002.

RIBEIRO, Renan José da Costa; OLIVEIRA, Dênio Ramam Carvalho de. **The collapse of Real Class building**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 11, p. 357-388, 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA (UFJF). **Projeto túnel de vento**. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/ecos/projetos-vinculados/projeto-tunel-de-vento/>>.

University of Washington. **Howard Clifford running off the Tacoma Narrows Bridge during collapse, Tacoma, Washington, November 7, 1940.** Disponível em:<https://www.flickr.com/photos/uw_digital_images/4861196144>. Acesso em 02/08/2021

VERSTEEG, Henk Kaarle; MALALASEKERA, Weeratunge. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method.** 2ª ed. Pearson education, 2007.

WAHRHAFTIG, Alexandre de Macêdo. **Ação do vento: em estruturas esbeltas com efeito geométrico.** 2ª edição. Blucher Open Access, 2017.

WHITE, Frank M. **Mecânica dos fluidos.** 6ª edição. McGraw Hill Brasil, 2011.