

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

CRISTIANO MACIEL

**ESTUDO DOS EFEITOS DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO SOBRE
EDIFÍCIOS ALTOS MEDIANTE USO DE DINÂMICA DOS FLUIDOS
COMPUTACIONAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2019**

CRISTIANO MACIEL

**ESTUDO DOS EFEITOS DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO SOBRE
EDIFÍCIOS ALTOS MEDIANTE USO DE DINÂMICA DOS FLUIDOS
COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado como requisito parcial à obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil, do Departamento
Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Fernando Oliveira de Andrade

CURITIBA

2019



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Campus Curitiba – Sede Ecoville
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Curso de Engenharia Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DOS EFEITOS DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO SOBRE EDIFÍCIOS ALTOS MEDIANTE USO DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

Por

CRISTIANO MACIEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido segundo semestre de 2019 e aprovado pela seguinte banca de avaliação presente:

Orientador – Prof. Fernando Oliveira de Andrade, Dr.
UTFPR

Profa. Profa. Erica Fernanda Akimura, Dra.
UTFPR

Prof. Prof. Roberto Carlos Moro Filho, Dr.
UTFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso

RESUMO

MACIEL, Cristiano. **Estudo dos efeitos do escoamento atmosférico sobre edifícios altos mediante uso de dinâmica dos fluidos computacional**. 2019. 57 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

Nesse trabalho foi realizado um estudo de fluidodinâmica computacional com os objetivos de avaliar os efeitos de vizinhança em edifícios altos. Para avaliar tais efeitos foi utilizada a abordagem de dinâmica dos fluidos computacional conhecida como RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), modelando a turbulência mediante o uso do modelo de duas equações do tipo $k - \varepsilon$. Foram simulados dois cenários de posicionamento de edifícios. O primeiro cenário consistiu na configuração isolada de um edifício modelo e o segundo cenário foi composto pelo edifício modelo com uma vizinhança selecionada, de modo que ambos foram analisados para ângulos de incidência de ventos de zero, 45 e 90 graus. Os resultados numéricos foram obtidos em termos de coeficientes de pressão, coeficientes de força e fatores de vizinhança, sendo comparados com dados experimentais. Os resultados dos coeficientes simulados se mostraram mais coincidentes com os dados medidos para os casos de vento perpendicular as fachadas analisadas. Os fatores de vizinhança simulados e experimentais apresentaram boa coincidência entre si. Se concluiu também que a norma brasileira para cálculo de fator de vizinhança necessita ser atualizada.

Palavras chave: Efeito de vizinhança, Dinâmica dos Fluidos Computacional, RANS

ABSTRACT

MACIEL, Cristiano. **Study of the effects of atmospheric flow on high rise buildings through the use of computer fluid dynamics.** 2019. 57 pages. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Civil – Federal Technology University - Paraná, Curitiba, 2019.

This work presents a computational fluid dynamics study to evaluate the neighboring effects on tall buildings. To evaluate such effects, it was used the RANS approach to solve the CFD equations, modelling the turbulence using the two equations model $k - \varepsilon$. It was simulated two different configurations of buildings, the first model was the isolated standard testing building, the second model had a configuration of the standard testing building and a selected neighborhood. Both models were analyzed for three different angles of attack of the wind. 0° , 45° and 90° . The numeric results were collected as pressure coefficients, force coefficients and neighboring factor. The numerical results were then compared to experimental data. The simulated model's data turned out to be more consistent with the experimental data when the wind direction was perpendicular to the analyzed faced. The simulated neighboring factors and its experimental counterparts were compatible. In this study is also noted that the Brazilian standards for wind calculations, specially within the neighboring factor chapter are not compatible with the experimental or analytical studies, therefore, it is concluded that the standards need a revision to continue to be relevant.

Key-words: RANS, CFD, turbulence model, neighboring effect.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Geometria de edifícios conflitantes.	11
Figura 2: Geometria do efeito Venturi.	13
Figura 3: Coeficiente de arrasto, C_a , para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência.	18
Figura 4: Coeficiente de arrasto, C_a , para edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência.	19
Figura 5: Modelo Geométrico do CAARC Standard Tall Building Model.	22
Figura 6: Análise comparativa da distribuição dos coeficientes de pressão médio para as faces do edifício CAARC analisado para os casos: Isolado e com seu entorno.	24
Figura 7: Desenho esquemático de um túnel de vento com sistema de ventilação aberto.	26
Figura 8: Desenho esquemático de um túnel de vento com sistema de ventilação fechado.	26
Figura 9: Característica do perfil do vento simulado: a) Perfil da velocidade média relativa à velocidade no eixo de 450mm. B) Intensidade da componente longitudinal da turbulência. c) Macroescala da componente longitudinal da turbulência.	34
Figura 10: Disposição dos pontos de tomada de pressão.	35
Figura 11: Disposição da nomenclatura de fachadas em referência a angulação de ataque do vento.	36
Figura 12: Posicionamento da configuração isolada, denominada como malha base.	37
Figura 13: Composição do cenário V1.	38
Figura 14: Domínio computacional usado para o caso do edifício modelo isolado, mostrando os contornos e de forma ilustrativa a dimensão das faces dos volumes de controle no piso.	40
Figura 15: Domínio computacional usado para o caso do edifício modelo com a vizinhança V1, mostrando os contornos e de forma ilustrativa a dimensão dos volumes de controle no piso.	41
Figura 16: Linhas horizontais que representam as alturas onde foram realizadas as tomadas de pressão para comparação com dados experimentais. Dimensões de protótipo em metros.	43

Figura 17: Colunas verticais que representam as posições em planta onde foram realizadas as tomadas de pressão para comparação com dados experimentais. Dimensões de protótipo em metros.	44
Figura 18: Distribuição dos coeficientes de pressão para o caso isolado com incidência a 0°	49
Figura 19: Distribuição dos coeficientes de pressão para o caso isolado com incidência a 90°	50

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1: Resumo dos cenários de simulação.....	38
Tabela 2: Coeficientes de pressão para a incidência de 0°.....	45
Tabela 3: Coeficientes de pressão para ângulo de 45°.....	46
Tabela 4: Coeficientes de pressão para ângulo de 90°.....	47
Tabela 5: Tabela resumo de diferenças escalares de coeficientes de pressão.....	48
Tabela 6: Tabela Resumo de Resultados de Coeficientes de Arrasto.....	51
Tabela 7: Tabela de Resumo de Resultados de Coeficientes de Arrasto para o edifício com vizinhança.....	52
Tabela 8: Tabela de Fatores de Vizinhança.....	52

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. OBJETIVOS GERAIS	8
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1.3. JUSTIFICATIVA.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. EFEITO DE VIZINHANÇA.....	10
2.2. COEFICIENTES AERODINÂMICOS	15
2.3. EDIFÍCIO PADRÃO	21
2.4. ESTUDOS DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	22
2.5. ESTUDOS EXPERIMENTAIS.....	25
3. METODOLOGIA	29
3.1. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	29
3.2. BASE DE DADOS EXPERIMENTAIS.....	33
3.3. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1. DOMÍNIO COMPUTACIONAL E CONDIÇÕES DE CONTORNO	39
4.2. CENÁRIO ISOLADO.....	41
4.3. CENÁRIO DE VIZINHANÇA V1.....	52
5. CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

A massiva urbanização decorrente do êxodo rural em todo o planeta influencia cada vez mais na verticalização urbana. Grandes centros urbanos acumulam recursos, o que atrai e incentiva o desenvolvimento do mercado imobiliário, de modo que tal valorização torna suscetível a empreitada de edificações cada vez mais esbeltas em uma configuração cada vez mais densa.

A densidade e posicionamento das edificações influencia, de uma forma significativa, as características do escoamento atmosférico a jusante. Estas influências já eram consideradas desde os anos 30. Segundo J.Blesmann (1985), quando posicionados dois blocos prismáticos a montante do edifício Empire States, constatou-se que o carregamento de torção devido a ação do vento era dobrado em comparação à sua configuração isolada. Isso demonstra que, através de inúmeros fenômenos, a densidade e posicionamento dos obstáculos a montante podem impactar na concepção estrutural de uma edificação de uma maneira bastante significativa.

Os parâmetros e discussão sobre as implicações do escoamento atmosférico sobre edificações são trazidos pela NBR6123/88, onde ela desenvolve e fixa condições mínimas exigíveis para a análise das forças implicadas pelas ações estáticas ou dinâmicas do vento que atuam em edificações consideradas padrões. O conceito do efeito de vizinhanças é abordado pela norma a partir do ANEXO G, onde o documento discorre sobre o desenvolvimento de coeficientes de vizinhança que podem aumentar (quando maiores de 1,0) ou diminuir (quando menores que 1,0) o efeito de um determinado coeficiente aerodinâmico analisado, comparando a sua configuração isolada com sua configuração considerando o seu entorno.

As formas de mensurar esse impacto podem ser numéricas ou experimentais, com a primeira desenvolvendo modelos computacionais que, com assistência de softwares especializados, resolvem-se equações de conservação de massa e quantidade de movimento, mediante uso de métodos tais como o dos volumes finitos. A segunda forma, utiliza da teoria da semelhança de escoamentos e, construindo modelos reduzidos em túnel de vento, consegue identificar parâmetros que definem o carregamento decorrente da ação dos ventos em edifícios.

A proposta desse estudo é desenvolver um modelo computacional, utilizando técnicas de CFD (Computational Fluid Dynamics), para analisar o efeito de vizinhança

em um edifício padrão, o *CAARC Standard Tall Building Model*, que é o edifício tomado como a norma para calibrar modelagens aerodinâmicas. Com o modelo geométrico pronto, as simulações serão realizadas mediante uso de ferramenta de CFD, obtendo valores de coeficientes aerodinâmicos, tais como coeficientes de arrasto, pressão e momentos, e analisando os resultados obtidos, com o objetivo de comparar a configuração isolada, do edifício modelo, com diferentes configurações de vizinhanças.

1.1. Objetivos Gerais

Esse documento tem como um objetivo geral desenvolver um modelo de dinâmica dos fluidos computacional, para estudar o comportamento do escoamento atmosférico e seus efeitos de sobrecarga sobre modelos reduzidos de edifícios altos padrão quando estes em configurações agrupadas de suas vizinhanças.

1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- 1) Realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre aplicação de modelagem computacional para escoamento atmosférico ao redor de edifícios.
- 2) Determinar os cenários em que serão desenvolvidos os modelos, com base no trabalho experimental previamente selecionado na revisão bibliográfica.
- 3) Elaborar as geometrias baseadas nos cenários escolhidos.
- 4) Construir as malhas computacionais para a geometrias elaboradas.
- 5) Realizar as simulações numéricas mediante uso do software CFD.
- 6) Analisar os efeitos do escoamento atmosférico sobre os edifícios com base nos resultados obtidos em termos de coeficientes aerodinâmicos e fatores de vizinhança.
- 7) Comparar os resultados simulados com os dados experimentais selecionados.

1.3. Justificativa

A análise dos efeitos de vizinhança determina coeficientes de majoração ou minoração quando comparado a uma análise de configuração isolada de determinadas edificações. Esses coeficientes determinam um aumento ou diminuição nas cargas. Essas cargas geram esforços internos na estrutura, quais são a base do dimensionamento dos seus elementos.

Os esforços internos são fatores determinantes para a viabilidade do empreendimento, por que suas condições indicam os elementos estruturais, quanto maiores os esforços internos da estrutura, maior a necessidade de serem usados elementos estruturais mais robustos e, conseqüentemente, mais caros, portanto, a análise dos efeitos de vizinhança pode ter uma influência significativa na segurança e viabilidade financeira de um determinado empreendimento.

A existência de um modelo computacional fluidodinâmico confirmado para edifícios padrões, apresenta a opção de uma concepção estrutural mais dinâmica e barata, comparando a sua opção experimental, qual pode ser morosa de um ponto de vista da indústria da construção civil, portanto, a confirmação equivalência de um modelo CFD pode trazer agilidade no processo de concepção estrutural para edifícios altos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais aspectos envolvidos na ação do vento sobre edificações, se concentrando nos efeitos de vizinhança, nos coeficientes aerodinâmicos usualmente utilizados durante o desenvolvimento de projetos, e em alguns exemplos de aplicações de simulação numérica nesta área. A norma brasileira NBR6123 que define as metodologias para estudo da ação do vento sobre edificações altas também é revisada em detalhes.

2.1. Efeito de vizinhança

A norma brasileira que rege a composição das forças estáticas e dinâmicas devidas a ação do vento é a NBR-6123 de junho de 1988. Esta norma tem o objetivo de fixar as condições exigidas para a aplicação das forças derivadas do vento. Entretanto a NBR-6123, se limita a edifícios de formas e dimensões padrões, de forma que edifícios com dimensões ou formas fora dos padrões estabelecidos, deverão, por norma, fazer uma análise experimental em túnel de vento, a qual sirva a suas características e suas dimensões.

O efeito de vizinhança entre edifícios é apresentado pelo anexo G dessa norma. O efeito de vizinhança se dá pela interferência do fluxo de escoamento, causado por obstáculos a montante, resultando em um fluxo diferente do fluxo atuante em um edifício isolado. Segundo a norma, um edifício interfere no fluxo a jusante a partir de 3 fenômenos: pelo efeito Venturi, por deflexão do vento no eixo vertical ou por turbulência de esteira. Os efeitos citados serão desenvolvidos de uma maneira mais extensiva subsequentemente.

A definição numérica do efeito de vizinhança não pode ser dada a partir de um método genérico devido a particularidade de cada caso, portanto, para concluir com precisão os efeitos de vizinhança, é necessário desenvolver um estudo a partir de modelos em escala reduzidas, com simulações em túneis de vento, emulando as características naturais do vento local. A partir de dados coletados, tais como velocidade e pressão estática nas faces do edifício, em ambas as configurações, tanto a isolada quanto a considerando o seu entorno, é possível desenvolver um fator matemático, conhecido como fator de efeito de vizinhança. Tal fator, presente da NBR 6123:88, é demonstrado abaixo:

$$FV = \frac{\text{Coeficiente na configuração com vizinhança}}{\text{Coeficiente na configuração isolada}}$$

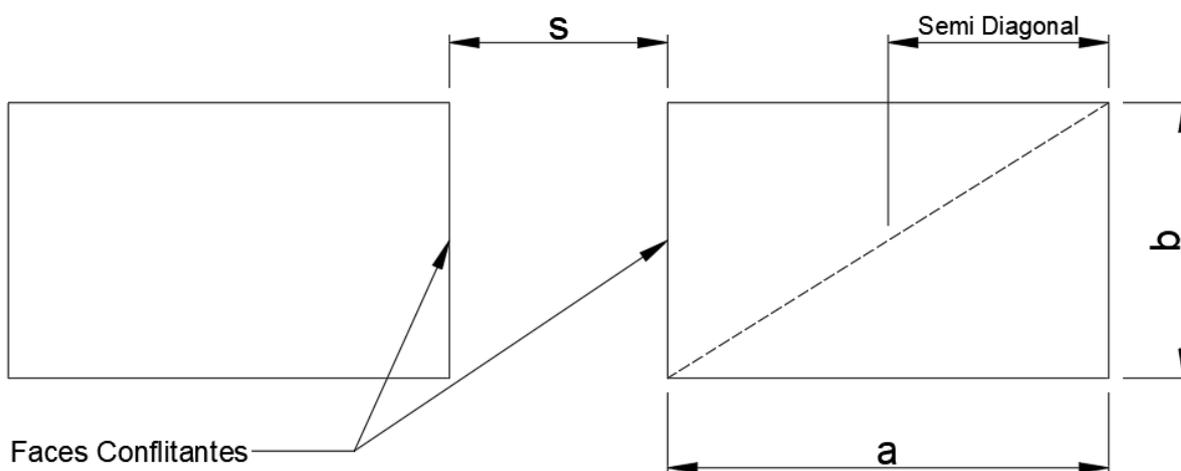
Ou seja, o fator de vizinhança FV, fornece uma razão entre coeficientes de forças aerodinâmicas para o caso da edificação com vizinhança em relação a edificações isoladas. A NBR 6123:88 fornece uma indicação aproximada do fator de vizinhança dependendo da geometria específica dos edifícios a serem analisados. Considere as seguintes variáveis:

s = afastamento entre os planos das faces confrontantes de duas edificações altas vizinhas, considerando $a \times b$ as dimensões em planta nas edificações.

d = a menor dentre as duas dimensões:

- Lado menor b ;
- Semi diagonal ($\frac{1}{2}\sqrt{a^2 + b^2}$)

Figura 1: Geometria de edifícios conflitantes.



Fonte: Autoria própria.

Para coeficiente de arrasto, de forma e de pressão em paredes confrontantes

- $s/d \leq 1,0$ FV = 1,3
- $s/d \geq 3,0$ FV = 1,0

Para coeficiente de forma e de pressão na cobertura:

- $s/d \leq 0,5$ FV = 1,3
- $s/d \geq 3,0$ FV = 1,0

Os valores de FV devem ser interpolados linearmente de acordo com o valor encontrado do fator s/d.

2.1.1. O efeito Venturi

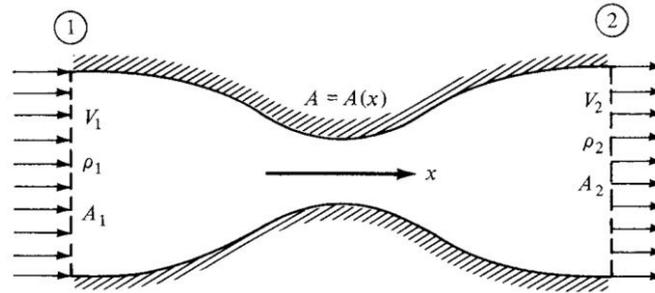
O efeito Venturi pode ser descrito como um evento onde um escoamento que atravessa um conduto não regular em relação a sua secção ortogonal tem sua velocidade e pressão alteradas, comparando diferentes sessões, as quais tenham diferentes áreas. Considerando um escoamento em um duto com uma forma tridimensional, a rigor, devemos analisá-lo em 3 dimensões, como um corpo sólido. Entretanto, D. Anderson, Jr. (2007, p. 211-212) desenvolve que, com variações de área pequenas onde, tal área é definida como $A = A(x)$, é razoável afirmar que as linhas de corrente do escoamento são paralelas. Em escoamentos como esse, onde as variações dos parâmetros são somente assumidas como verdadeiras ao longo do eixo “x” [portanto, $A = A(x)$, $\rho = \rho(x)$ e $V = V(x)$], é possível considerar o escoamento *uni-dimensional* como uma forma de limitar a complexidade de um problema, assumindo esse fenômeno como unidimensional. Considerando a equação da conservação de massa, em sua forma integral, em um escoamento em regime permanente, temos:

$$\oiint_S \rho V \cdot dS = 0, \quad (2.1)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, V é a velocidade média na direção x e dS é o elemento de área de seção transversal.

Dado um volume de controle em um duto de convergência, onde ocorre o efeito venturi, podemos definir a área de *inlet*, ou área 1, como a seção imediatamente anterior ao início do estreitamento do tubo, onde sua área é máxima e o fluxo de escoamento é positivo. A área de *outlet*, ou área 2, é definida como seção imediatamente posterior ao seu estreitamento, onde sua área é mínima e o fluxo de escoamento é negativo, como ilustra a figura 2 abaixo.

Figura 2: Geometria do efeito Venturi.



Fonte: D. Anderson, Jr. (2007).

Considerando que o fluxo do escoamento é tangente as outras faces, quais denominaremos de paredes do duto, podemos concluir que o fluxo nas mesmas é nulo, portanto, aplicando a equação de continuidade nessas faces, encontraremos que os termos para as paredes do duto, nessa equação, serão equivalentes a zero. Aplicando a equação (1) da continuidade no dado volume de controle, temos:

$$\iint_{A_1} \rho_1 V_1 \cdot dS_1 + \iint_{A_2} \rho_2 V_2 \cdot dS_2 = 0, \quad (2.2)$$

Resolvendo a equação acima para as áreas do conduto e, considerando que o fluxo de *inlet* é positivo, enquanto o fluxo de *outlet* é negativo, temos a seguinte equivalência:

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2. \quad (2.3)$$

Por definição, o ar atmosférico, sob baixas velocidades, é considerado como um fluxo incompressível, portanto, $\rho_1 = \rho_2$. Aplicando-se a igualdade na equação (3), temos como a equação de continuidade *quase-uni-dimensional* para um escoamento incompressível:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2. \quad (2.4)$$

Isso significa, em termos físicos, que a relação entre as velocidades é diretamente proporcional a relação entre as áreas, portanto, quanto maior a diferença entre as seções, maior será a diferença entre as velocidades de escoamento. Escrevendo a equação de Bernoulli para o volume de controle, temos que:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2, \quad (2.5)$$

onde p é a pressão estática que age externamente no volume de controle. A partir da equação de Bernoulli, sabemos que pressão é inversamente proporcional ao quadrado da velocidade, em um escoamento de um fluido ideal incompressível e em regime permanente. Esse conhecimento nos é útil pois, analisando o fenômeno venturi sob a ótica dos *canyons* urbanos, podemos concluir que a pressão sobre os edifícios será maior em locais anteriores a uma convergência ou posteriores a uma divergência da seção transversal do dado *canyon*, enquanto haverá um alívio da pressão dinâmica da atmosfera na menor seção, devido a maior velocidade do escoamento.

2.1.2. Turbulência de esteira

O número de Reynolds é um parâmetro adimensional que pode ser teoricamente determinado através do teorema adimensional π de Vaschy-Buckingham. Seu significado físico representa um quociente entre as forças inerciais e as forças viscosas atuantes sobre o fluido. Seu valor representa a estabilidade de velocidade do escoamento de um determinado fluido, quanto maior, mais caótico será o escoamento, indicando se este é laminar (com baixos números de Reynolds) ou turbulento (com altos valores para o número de Reynolds).

$$Re = \frac{\rho V l}{\mu}, \quad (2.6)$$

onde l é o comprimento característico da análise e μ a viscosidade cinemática do fluido. A turbulência de esteira é um fenômeno onde vórtices se desprendem, de forma alternada, de um corpo esbelto sob a influência de um escoamento, formando assim, a partir do fluido, um carregamento instável no corpo. Um padrão de desprendimento de vórtices em uma mesma frequência a jusante de um corpo sólido é reconhecido como vórtices de Von Karman. Em casos práticos a frequência do desprendimento é modificada de acordo com a turbulência do escoamento, portanto, varia de acordo com o número de Reynolds.

Para uma estrutura com vibrações desprezíveis, a distância entre os vórtices desprendidos de um mesmo lado, definida como l , deve ser proporcional a dimensão, D , referente a face perpendicular ao escoamento. Portanto, o tempo entre o desprendimento de dois vórtices de um mesmo lado é equivalente à distância l ,

dividida pela velocidade dos vórtices, isso significa que a frequência n dos carregamentos laterais causados pelo desprendimento de vórtices é equivalente a U/l , o que é proporcional a U/D . Esse fator de proporcionalidade é chamado de número de Strouhal (St) (DYRBYE,1997), portanto, temos n definido abaixo:

$$n = St \frac{V}{D}. \quad (2.7)$$

A turbulência de esteira é uma característica de uma esteira muito comum no escoamento a sotavento de estruturas com seções transversais não aerodinâmicas, tendo como principal influência o desprendimento de vórtices (Oudheusden, et al. 2005). A turbulência de esteira e o desprendimento de vórtices gera flutuações nos carregamentos aerodinâmicos do edifício e a sotavento da esteira, essas flutuações afetam a estrutura, tendo em vista que esse tipo de carregamento cíclico, também conhecido como martelamento, além de causar desconforto para os usuários, pode levar o material da estrutura a fadiga.

As características de uma esteira turbulenta podem ser medidas experimentalmente ou numericamente, com técnicas de ponta como *Particle Image Velocimetry* (PIV) para estudos experimentais ou Large Eddy Simulation (LES) como uma metodologia para análises numéricas. Por exemplo, Yagmur et al (2017), apresenta uma comparação entre as características de um escoamento sobre um triângulo equilátero, obtidas de forma numérica e experimental a partir das técnicas PIV e LES. Em sua comparação Yagmur et al (2017) demonstra que os resultados, próximos a região de esteira, são de uma forma geral similares em relação as características do escoamento e análise espectral.

A seguir são discutidos os principais coeficientes aerodinâmicos usados para avaliar a influência da vizinhança sobre os carregamentos em edifícios altos.

2.2. Coeficientes aerodinâmicos

As forças denominadas estáticas, oriundas da ação do vento, são determinadas a partir da velocidade característica do vento, descrita como V_k , o qual tem valores bases (V_0) e deve, segundo a NBR 6123:88, ser desenvolvida a partir de uma série de fatores para adequar o valor as características locais do terreno a ser analisado. Esses fatores são: S_1 como fator topográfico, S_2 fator de rugosidade do terreno e S_3 fator

baseado em conceitos probabilístico. A fórmula da velocidade característica do vento é dada a seguir:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3. \quad (2.8)$$

A velocidade característica do vento permite determinar a pressão dinâmica (q) em N/m² pela expressão:

$$q = 0,613 V_k^2. \quad (2.9)$$

Esta equação para o cálculo da pressão dinâmica é fornecida pela norma NBR-6123:88 é obtida empiricamente. A definição geral da pressão dinâmica também é dada por,

$$q = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2, \quad (2.10)$$

onde V_∞ é a velocidade da corrente livre.

2.2.1. Coeficiente de Pressão

O coeficiente de pressão é função da diferença de pressão nas faces opostas da edificação, os coeficientes de pressão são dados para superfícies externas e internas. A pressão efetiva, Δp , pode ser escrita como:

$$\Delta p = \Delta p_e - \Delta p_i, \quad (2.11)$$

onde Δp_e equivale a pressão externa e Δp_i equivale a pressão interna da edificação. O coeficiente de pressão equivale a:

$$C_p = \frac{\Delta p}{q}. \quad (2.12)$$

Combinando as equações 11 e 12 temos, portanto:

$$\Delta p = (C_{pe} - C_{pi}) q, \quad (2.13)$$

onde C_{pe} é a coeficiente de pressão externa e C_{pi} é o coeficiente de pressão interna. Valores positivos dos coeficientes de pressão externa ou interna correspondem a sobrepresões, enquanto valores negativos representam forças de sucção. Portanto, um valor positivo de Δp representa uma sobrepresão no sentido externo e um valor negativo representa uma força de sucção para o sentido externo.

2.2.2. Coeficiente de Arrasto

A força resultante, ou global, do vento sobre uma edificação é obtida pela soma vetorial das forças do vento que nela atuam. A componente de força global na direção do vento, ou força de arrasto, pode ser obtida por:

$$F_a = C_a q A_e, \quad (2.14)$$

onde C_a equivale ao coeficiente de arrasto e A_e é igual a área efetiva da edificação, portanto, a projeção ortogonal ao vetor vento, da edificação, também conhecido como área de sombra e q é a pressão dinâmica,

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2. \quad (2.15)$$

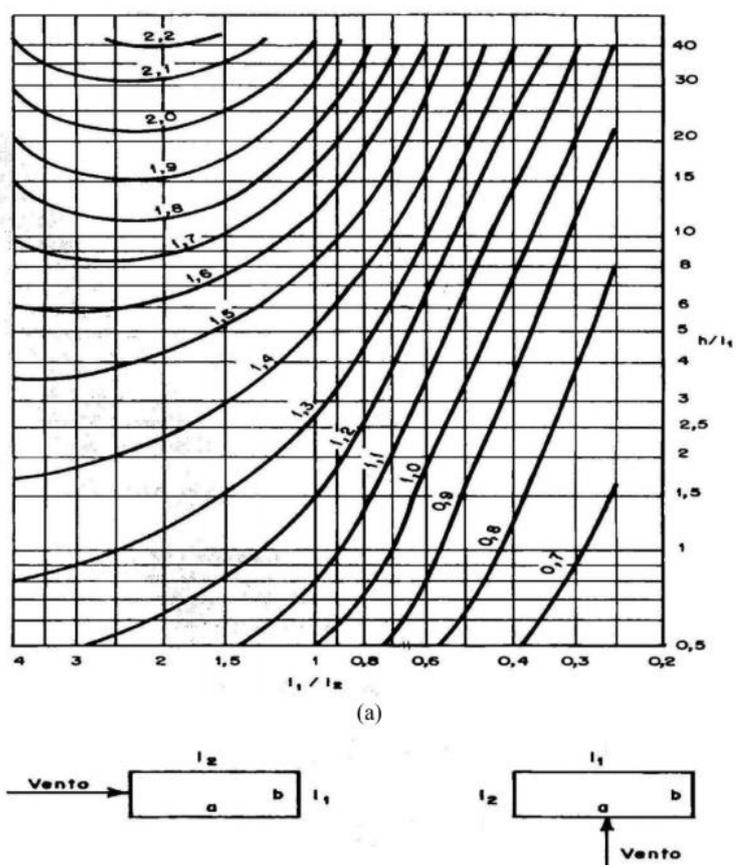
A NBR-6123:88 aborda o coeficiente de arrasto de uma maneira mais generalizada, com o objetivo de simplificar o cálculo para corpos de seção constante ou fracamente variável, de modo que o coeficiente depende diretamente das relações geométricas do edifício e do número de Reynolds do escoamento analisado. Nesse trabalho são abordadas somente geometrias retangulares. O cálculo do número de Reynolds para essa aplicação pode ser simplificado, segundo a NBR 6123:88, da seguinte maneira:

$$Re = 70000 V_k l_1, \quad (2.16)$$

onde V_k é a velocidade característica do escoamento e l_1 é a largura da dimensão perpendicular a direção do escoamento. Utiliza-se então, os gráficos da figura 3 ou 4,

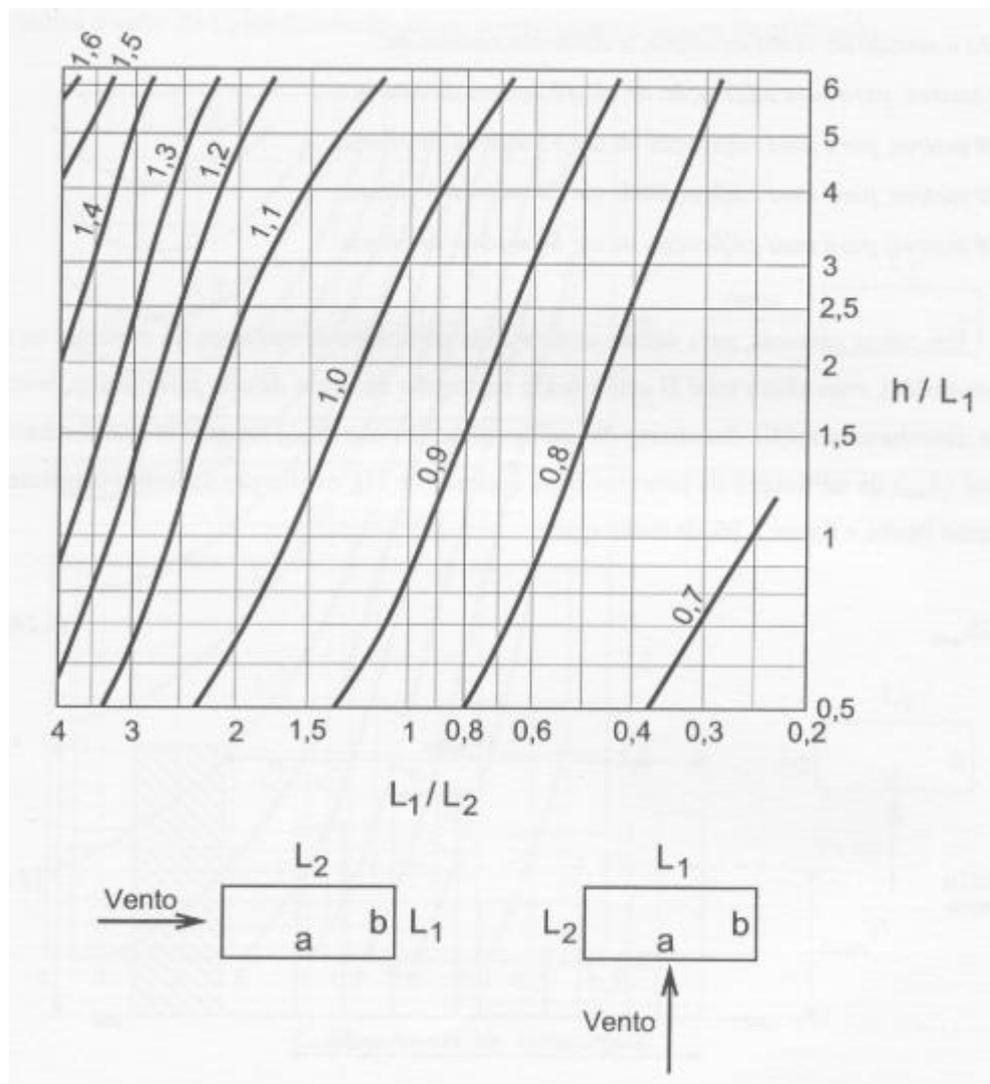
dependendo da faixa de valor para o número de Reynolds do escoamento analisado, para encontrar o valor do coeficiente de arrasto, interpolando para números entre parâmetros. Os gráficos abaixo dependem das relações h/l_1 e l_1/l_2 onde h equivale a altura da edificação acima do terreno até seu topo, l_1 equivale a dimensão perpendicular ao escoamento e l_2 equivale a dimensão paralela a direção do escoamento.

Figura 3: Coeficiente de arrasto, C_a , para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência.



Fonte: NBR 6123:88

Figura 4: Coeficiente de arrasto, C_a , para edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência.



Fonte: NBR 6123:88

Cabe mencionar que a Norma não apresenta nenhum valor de referência ou valores de número de Reynolds que delimita escoamentos de alta ou baixa turbulência. Portanto, torna-se conveniente comparar a ordem de grandeza de arrasto obtidos mediante uso da norma com aqueles valores disponíveis nos livros de mecânica dos fluidos.

2.2.3. Coeficiente de Momento Fletor

O momento fletor M_f em relação aos eixos planos x e y , pode ser calculado através da expressão abaixo:

$$M_f = C_m qAL, \quad (2.17)$$

onde A equivale a área de referência do carregamento, C_m é o coeficiente de momento fletor, L equivale a dimensão linear referente ao centro do carregamento até o eixo de apoio da estrutura, q a pressão dinâmica do vento. Isolando o coeficiente de momento fletor, temos a seguinte equação:

$$C_m = \frac{M_f}{qAL}. \quad (2.18)$$

O coeficiente de momento fletor representa uma carga de momento fletor adimensional sobre a estrutura.

2.2.4. Coeficiente de torção

O momento de torção M_t pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$M_t = C_t qAE, \quad (2.19)$$

onde A equivale a área de referência do carregamento, C_t é o coeficiente de torção do carregamento, q é a pressão dinâmica do vento, E é a excentricidade da carga. qual equivale a distância entre planos, do eixo central do edifício ao eixo central do carregamento. A excentricidade E é definida numericamente segundo a NBR 6123:88 como:

- edificações sem efeitos de vizinhança:

$$E_a = 0,075^a; \quad E_b = 0,075b;$$

- edificações com efeitos de vizinhança:

$$E_a = 0,15^a; \quad E_b = 0,15 b,$$

sendo lados a e b , respectivamente, a menor e maior dimensão no plano do edifício. Isolando o coeficiente do momento de torção é possível escrever:

$$C_t = \frac{M_t}{qAe}. \quad (2.20)$$

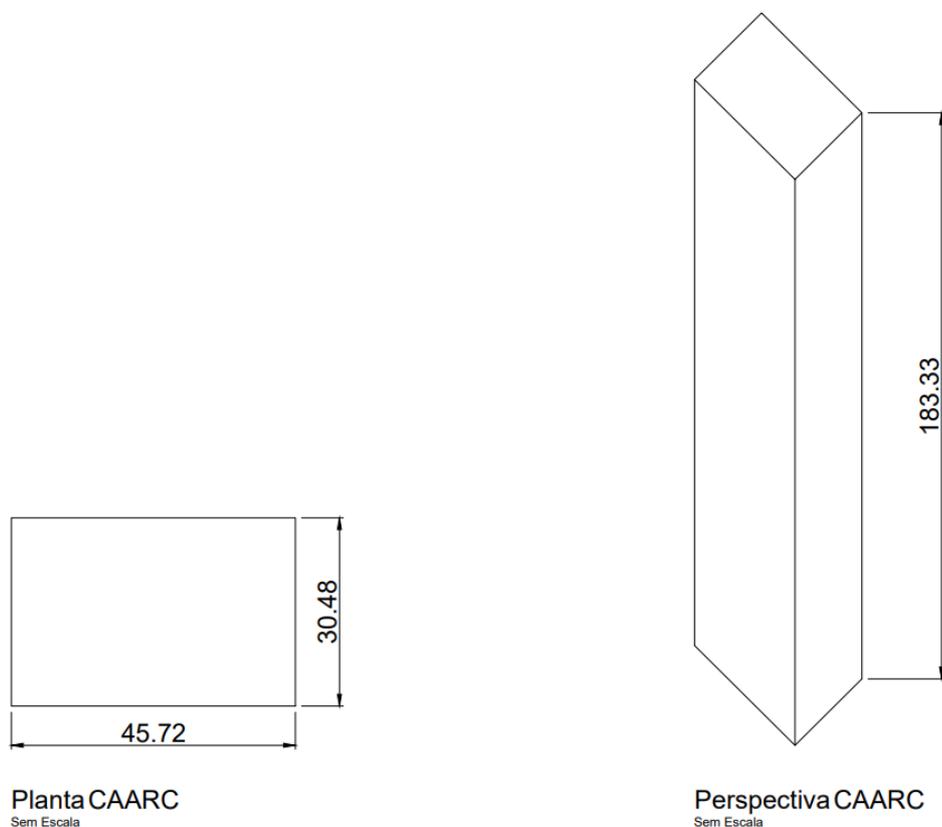
O coeficiente torção representa, assim como o coeficiente de momento fletor, um momento adimensional sobre a estrutura.

2.3. Edifício Padrão

As simulações desse trabalho são realizadas para configuração conhecida como, *Standard Tall Building Model*, a qual foi desenvolvido seguindo o conselho consultivo de pesquisa aeronáutica da comunidade das nações (CAARC). Com o intuito de que os ensaios desenvolvidos por pesquisadores da área de aerodinâmica pudessem ser comparativos, o modelo foi proposto por Wardlaw e Moss (1970), mediante comparação de técnicas simples de simulação de ventos naturais em diferentes túneis de vento. A perspectiva era de que as análises comparativas ajudariam no desenvolvimento de novas e mais refinadas técnicas para aumentar a confiabilidade dos resultados oriundos de túneis de vento.

A forma do edifício é a de um prisma retangular de dimensões 30,48m x 45,72m x 183,33 m. (100ft x 150ft x 600ft). Essa configuração equivale a um edifício comum de cerca de 55 andares. Seu topo é plano, sem nenhum parapeito ou qualquer outro elemento construtivo. A vedação é considerada plana e sem qualquer detalhe geométrico. No caso de estudos experimentais, diversos pontos de tomadas de pressão são pré-definidos e numerados de acordo com sua respectiva posição. A figura abaixo ilustra a geometria do edifício padrão:

Figura 5: Modelo Geométrico do CAARC Standard Tall Building Model.



Fonte: Autoria Própria

Maiores detalhes sobre a utilização do CAARC e seus pontos de monitoramento nas fachadas serão fornecidos na definição da metodologia (Capítulo 3).

2.4. Estudos de dinâmica dos fluidos computacional

Como demonstrado anteriormente, a análise da interação fluido-estrutura é de extrema importância para o desenvolvimento das edificações, garantindo sua segurança e conforto. O desenvolvimento de novas técnicas de análise computacionais e validação de novos modelos traz uma nova dinâmica para o desenvolvimento de estruturas, tendo em vista que um modelo de fluidodinâmica computacional validado faz com que a análise de uma nova estrutura concebida seja consideravelmente mais rápida e barata comparada a sua alternativa experimental.

A grande maioria das aplicações de interação fluido estrutura na Engenharia ocorre em meios turbulentos. Devido à alta demanda de resoluções para esse tipo de

problema em situações reais de engenharia e a dificuldade de desenvolver uma análise numérica dos resultados, esse tópico tem sido desenvolvido, com resultados incrementais, desde o século XIX por cientistas como Boussinesq, Reynolds e Reyleigh. O início do século XX ficou marcado com a descoberta da camada limite por Prandtl em 1904. Entre o início do século e os anos 50 a teoria estatística da turbulência se desenvolveu através dos trabalhos de Millionshikov, Kolmogorov, Obukov e Heisenberg. A partir dos anos 50, foram desenvolvidos muitos métodos matemáticos que procuram descrever os escoamentos turbulentos. Duas correntes distintas de abordagens foram desenvolvidas paralelamente, uma baseada nas equações médias de Reynolds (RANS – *Reynolds Average Navier-Stokes*) e outra no conceito de Simulação de Grandes Escalas (LES – *Large Eddy Simulation*). (SPODE et al. 2006).

A técnica de simulação numérica conhecida como RANS é obtida aplicando-se uma filtragem temporal às equações de Navier-Stokes. Esse processo resulta no aparecimento de um termo não linear nas equações, conhecido como tensor de Reynolds é o que necessita de modelagem. O fechamento das equações se dá através desse termo sendo modelado em função de um escoamento médio, que tenta representar a influência das flutuações no escoamento. Modelos algébricos e modelos de uma ou duas equações de transporte são os mais comuns (SPODE et al. 2006).

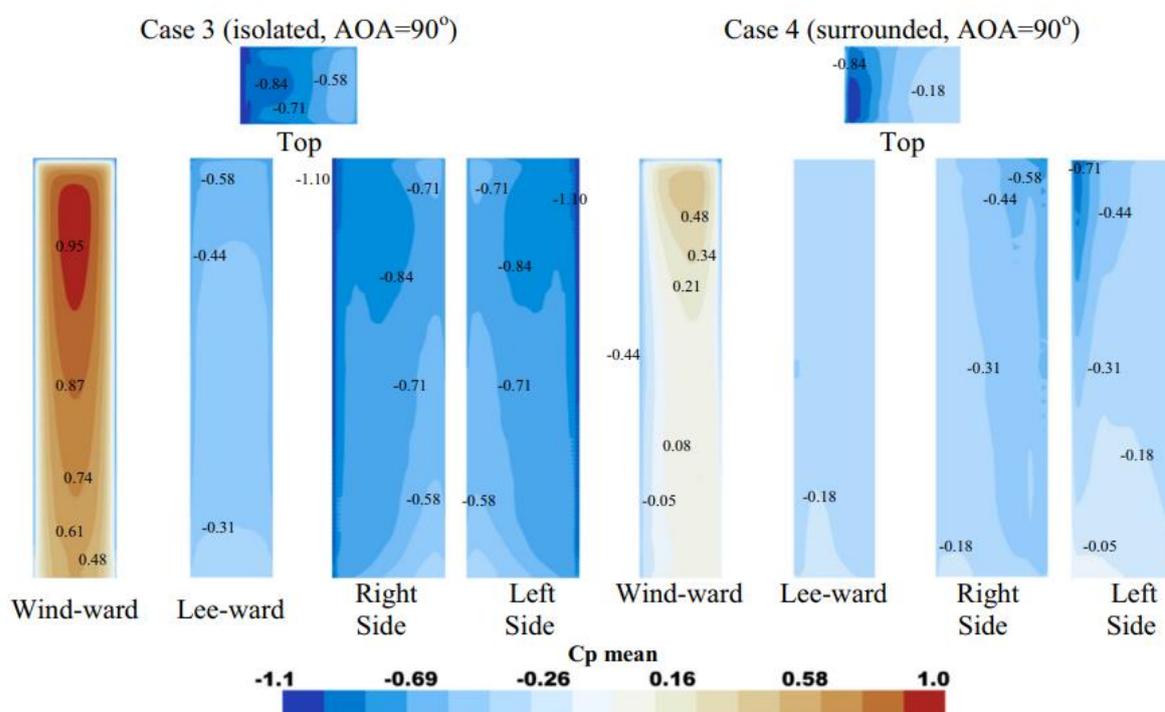
A abordagem do conceito de Simulação de Grandes Escalas é a de separar, através de um tipo de filtro espacial, as regiões de menores escalas e maiores escalas do escoamento. Então, resolver de uma maneira explícita, as equações de Navier-Stokes para as regiões de maiores escalas e modelando a turbulência para as regiões de menores escalas. A metodologia LES é requer o uso de elevado esforço computacional. No entanto, com o avanço da capacidade computacional disponível, a tendência é que mais estudos pela abordagem de LES sejam desenvolvidos.

A utilização dos modelos supracitados para a análise de um edifício CAARC e sua vizinhança já foi previamente estudado. Zhang et al. (2008), realizou uma análise baseada na abordagem RANS do comportamento aerodinâmico de um edifício e sua vizinhança com uma disposição escalonada. Utilizando-se o modelo de turbulência $k-\epsilon$, os resultados obtidos se mostram em acordo com os resultados experimentais. A análise demonstrou, como esperado, uma discrepância entre a configuração isolada e a configuração com seu entorno.

Tomura (2008). Teve resultados positivos em relação a resultados das cargas de vento, em uma modelagem na abordagem LES analisando um edifício e seu entorno, incluído terreno e vegetação e comparando com dados experimentais.

Elshaer et al. (2016) Realizou um estudo empregando a técnica de modelagem de turbulência CDRFG (*Gerador de Escoamento Aleatório Discreto e Consistente*), proposto por Huang et al. (2010), pela abordagem LES para a análise de um edifício CAARC modelo. Obteve então, um resultado próximo a resultados de estudos experimentais e numéricos anteriores, para coeficientes de pressão e do carregamento dinâmico. Além disso, trouxe uma análise comparativa de resultados entre os casos isolados e com vizinhança, A figura 6 mostra alguns resultados parciais desse estudo. Nessa figura são apresentados, de forma comparativa, os coeficientes de pressão médio para as 4 faces do edifício em suas duas configurações, isolada e com seu entorno.

Figura 6: Análise comparativa da distribuição dos coeficientes de pressão médio para as faces do edifício CAARC analisado para os casos: Isolado e com seu entorno.



Fonte: ELSHAER et al. (2016)

Dagnev et al. (2010), desenvolve uma análise das características do escoamento de um edifício modelo CAARC com e sem sua vizinhança, comparando

os resultados com dados obtidos experimentalmente em túneis de vento. O autor demonstra que a modelagem de abordagem LES performou idealmente trazendo a flutuação das velocidades quais impactavam na média do coeficiente de pressão a ser analisado.

2.5. Estudos experimentais

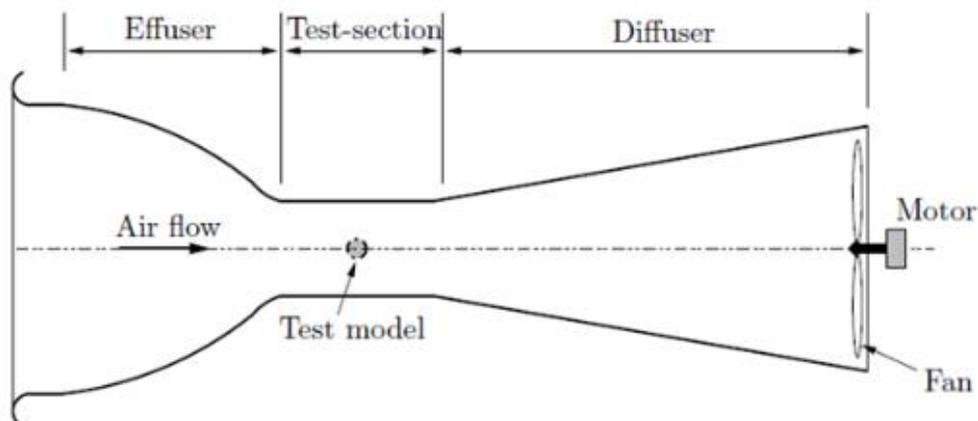
Estudos experimentais, de uma maneira geral, detém uma confiabilidade maior nos resultados comparativamente a estudos numéricos, os quais usualmente dependem de estudos experimentais para calibração. Utilizando-se de modelos em escala reduzida e fazendo medidas em pontos de interesse, essa técnica evita erros provenientes de simplificações consideradas para facilitar o desenvolvimento dos métodos computacionais. Contrariamente aos estudos numéricos, os estudos experimentais tendem a ser mais onerosos para o processo iterativo de desenvolvimento em engenharia. Eles demandam uma infraestrutura própria e o desenvolvimento físico do modelo em escala. Portanto, mudanças no projeto demandam a fabricação de novos modelos e novos testes o que torna inviável incorporá-lo em todas as etapas do processo de design em engenharia.

A infraestrutura básica de um estudo experimental consiste no túnel de vento, do modelo em escala reduzida e do sistema de mensuração. Existem diversos tipos de túneis de vento, sua classificação é composta por três itens:

- Capacidade da velocidade do escoamento, variando com escoamentos subsônicos, os quais mais interessam para aplicações em engenharia civil;
- Pelo modo de operação, utilizando tanques de armazenamento de pressão, bombas à vácuo ou lâminas rotantes;
- Pelo tipo de ventilação, sendo aberta ou fechada.

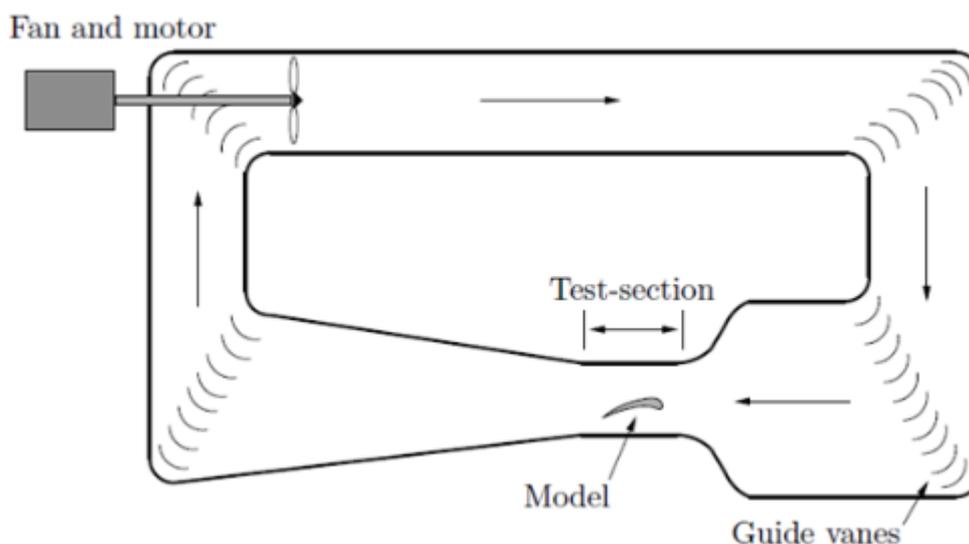
As figuras 7 e 8 ilustram esquematicamente visões de túneis de vento típicos em perfil e em planta respectivamente. Em geral, o objetivo é obter um escoamento uniforme chegando na seção de testes, onde é posicionado o objeto a ser estudado.

Figura 7: Desenho esquemático de um túnel de vento com sistema de ventilação aberto.



Fonte: PILLAI (2008)

Figura 8: Desenho esquemático de um túnel de vento com sistema de ventilação fechado.



Fonte: PILLAI (2008)

Um aspecto muito relevante dos estudos experimentais, além da infraestrutura, é o método de mensuração. A maneira mais acessível de fazer medidas em um túnel de vento é através de determinação do diferencial de pressão utilizando um sistema piezométrico, o qual detecta variações de pressão eletronicamente. Com o avanço de técnicas de imagem e o uso de lasers, atualmente existem métodos mais refinados e precisos que medem diretamente a velocidade instantânea do escoamento. Um desses métodos é a velocimetria por imagem de partículas (PIV - *Particle Image*

Velocity). Nesse método, partículas não intrusivas são adicionadas ao fluido do escoamento. Essas partículas são iluminadas com o laser e se tornam referência para imagens que são tiradas em pequenos intervalos de tempo. As partículas de referência são então rastreadas e o seu movimento é inspecionado para então montar um campo de velocidades instantâneas de perfil analisado.

Outro método não intrusivo de mensuração direta do escoamento é o LDA (*Laser Doppler Anemometer*). Esse método, assim como o PIV, utiliza-se do semeamento de partículas que dispersam a luz advinda de lasers. A intensidade da luz é modulada de acordo com a interferência de ondas entre lasers, criando planos de alta intensidade luminosa em certos pontos de superposição. Sinais de luz de alta intensidade podem ser filtrados e captados por um receptor. A luz dispersada pela partícula tem um deslocamento doppler atrelado a mesma, de modo que tal deslocamento provê informações sobre o tempo, enquanto a distância entre planos de alta intensidade luminosas é conhecida. Com esses dois dados é possível capturar a velocidade instantânea da partícula de forma contínua.

Hui et al. (2013) utilizaram de testes de pressão e PIV para investigar as interferências entre dois edifícios altos de mesma altura, porém com formas diferentes, retangular e quadrado. Os testes de pressão resultaram em um aumento de até 50% no coeficiente de pressão na configuração de interferência. Os testes em PIV foram utilizados para demonstrar as interferências no campo de escoamento, demonstrando que os padrões de escoamento podem aumentar o pico de pressão negativa no edifício principal.

Fontoura (2014) desenvolveu uma análise experimental em túneis de vento com o intuito de investigar os efeitos de vizinhança em relação a sua configuração isolada, com seus resultados então fomentar a discussão do fator de majoração presente na norma NBR 6123/88. Para mensurar o impacto de tal efeito de vizinhança, foram selecionados os seguintes indicadores: Coeficiente de pressão, coeficiente de arrasto, coeficiente de momento fletor e coeficiente de torção. Tais indicadores foram então combinados com suas respectivas contrapartes na análise isolada para desenvolvimento do fator de majoração, denominado fator de vizinhança. O estudo foi proposto com oito diferentes configurações de vizinhanças em vinte e quatro ângulos de incidência de vento, somando-se a configuração isolada, um total de 216 diferentes análises. A análise demonstrou que, pela perspectiva de análise do fator de vizinhança relacionado ao coeficiente de torção, a configuração de vizinhança tem um efeito de

proteção ao edifício na maior parte dos vinte e quatro ângulos analisados e que apenas cerca de 20% das configurações passaram do valor estabelecido pela norma. Para o fator de vizinhança calculado pelo coeficiente de momento no eixo X, assim como para o coeficiente de torção, tem-se também a situação de proteção do edifício, onde a maioria das configurações gera um fator de majoração menor que 1,0. Entretanto, para o coeficiente de momento no eixo Y, cerca de 26% das angulações válidas estão fora dos padrões cobertos pela norma brasileira, superando o valor do coeficiente de vizinhança máximo de 1,3.

No capítulo 3 (Metodologia) é apresentado, em mais detalhes, o trabalho de Fontoura (2014), o qual foi selecionado para fornecer a base das configurações do presente estudo. Os resultados das simulações também serão comparados com as medições apresentadas em Fontoura (2014).

3. Metodologia

Nesse capítulo é desenvolvida a formulação teórica por trás da análise numérica desse estudo, além de uma análise minuciosa do trabalho experimental de suporte para as simulações. Também são apresentados os cenários escolhidos para as simulações, com base no trabalho experimental de Fontoura (2014).

3.1. Formulação Matemática

O ponto de partida para a simulação computacional do escoamento é a definição das variáveis envolvidas no problema e a descrição das equações matemáticas que governam o movimento do fluido. Neste trabalho, as variáveis envolvidas no movimento do fluido são a pressão e as componentes do vetor velocidade, e as propriedades físicas relevantes são a massa específica e a viscosidade do fluido. A evolução do escoamento é descrita pelas equações de conservação de massa e conservação de quantidade de movimento linear, que em coordenadas cartesianas e usando a notação indicial, com i e $j=1,2,3$, escrevem-se,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i, \quad (3.2)$$

onde ρ é a massa específica, u_i são as componentes do vetor velocidade nas três direções cartesianas, p é a pressão, τ_{ij} é o tensor das tensões viscosas e F_i é a força de corpo por unidade de volume. Adotando a hipótese de fluido incompressível com propriedades constantes, e assumindo fluido Newtoniano, o tensor das tensões viscosas é dado por

$$\tau_{ij} = 2\mu D_{ij}, \quad (3.3)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (3.4)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica e D_{ij} é o tensor taxa de deformação. Utilizando essas relações constitutivas, assumindo a força gravitacional como única força de corpo

atuante no volume de fluido e adotando a situação de escoamento em regime permanente, as equações de conservação escrevem-se,

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i, \quad (3.6)$$

onde g_i é o vetor aceleração da gravidade. Essas equações são conhecidas como equações de Navier-Stokes para escoamento em regime permanente.

A solução das equações de Navier-Stokes fornece os campos de velocidade e pressão do escoamento. No entanto, soluções analíticas são possíveis somente para casos de escoamentos simplificados, geralmente para escoamentos unidimensionais e uni ou bidimensionais (Pope, 2000). Na maioria dos casos de escoamentos de interesse prático essas equações não possuem soluções analíticas, por este motivo é necessário o uso de um conjunto de métodos numéricos, implementados em computadores, para obter soluções aproximadas dessas equações.

A maioria dos métodos numéricos se baseia em malhas computacionais que dividem o domínio de cálculo em pequenos volumes de controle, nos quais as equações são integradas e resolvidas numericamente. No caso de escoamentos a alto número de Reynolds, os comprimentos característicos do movimento podem variar de muitos metros a valores inferiores ao milímetro. Isto impossibilita a resolução direta das equações para casos de interesse prático, pelo fato da necessidade de se refinar a malha computacional até o menor comprimento característico do movimento. Uma malha extremamente refinada requer alto poder computacional de processamento de cálculos e enorme espaço para armazenamento de resultados.

Para contornar esse problema, uma propriedade do escoamento $f(\mathbf{x}, t)$ pode ser separada em uma quantidade média temporal, $\overline{f(\mathbf{x}, t)}$, e uma quantidade que flutua ao redor da média, $f'(\mathbf{x}, t)$, de modo a obter uma relação conhecida como decomposição de Reynolds,

$$f(\mathbf{x}, t) = \overline{f(\mathbf{x}, t)} + f'(\mathbf{x}, t), \quad (3.7)$$

onde a barra superior é usada para designar a média temporal e a linha se refere a flutuação ao redor da média. Aplicando a decomposição de Reynolds para as

componentes do vetor velocidade e para a pressão na equação de Navier-Stokes e extraído a média temporal, obtém-se as equações médias de Navier-Stokes (*RANS* – *Reynolds Averaged Navier Stokes*) para escoamento em regime permanente:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] + \rho g_i, \quad (3.9)$$

onde \bar{u}_i são as componentes médias do vetor velocidade e \bar{p} é a pressão média. O processo de decomposição de Reynolds, em conjunto com a média temporal, resulta em um novo termo, $\overline{\rho u'_i u'_j}$, que é conhecido como tensor de Reynolds. Este termo representa a contribuição da dinâmica da flutuação da velocidade sobre o campo médio do escoamento.

Com o aparecimento do tensor de Reynolds, observa-se que agora existe um sistema insolúvel que apresenta 4 equações e 7 incógnitas. Esse problema é conhecido como o problema de fechamento da turbulência, ou seja, o problema da representação da influência das flutuações sobre o campo médio do escoamento. Para substituir o tensor de Reynolds e fechar o sistema de equações é necessário usar um modelo de turbulência.

Neste trabalho é usado o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ que é um modelo baseado no conceito de viscosidade turbulenta. Os modelos baseados no conceito de viscosidade turbulenta assumem que o mecanismo de transferência de quantidade de movimento proveniente das flutuações turbulentas ocorre de forma análoga ao processo de transferência de quantidade de movimento por efeitos da viscosidade molecular (atrito viscoso), o qual é associado as velocidades médias do escoamento. Sendo assim, o tensor de Reynolds pode ser escrito como:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = 2\mu_T \overline{D_{ij}}, \quad (3.10)$$

$$\overline{D_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad (3.11)$$

onde μ_T é o coeficiente de difusão da turbulência, chamado de viscosidade turbulenta, e $\overline{D_{ij}}$ é o tensor taxa de deformação médio. Substituindo a equação (3.10) na (3.9), obtém-se o seguinte resultado:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i. \quad (3.13)$$

Esse sistema possui 4 equações e 4 incógnitas, portanto, é um sistema que pode ser resolvido numericamente. O problema agora é obter um modelo adequado para representar a viscosidade turbulenta, μ_T . É importante ressaltar que a viscosidade turbulenta é uma propriedade que depende das características do escoamento, diferentemente da viscosidade molecular, que é uma propriedade física do fluido. Vários modelos de cálculo da viscosidade turbulenta foram propostos ao longo das últimas décadas (Jones et al., 1972). No presente trabalho foi adotado o modelo $k - \varepsilon$ clássico, o qual calcula a viscosidade turbulenta com base em escalas características de velocidade e comprimento do escoamento, da seguinte maneira:

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3.14)$$

onde k é a energia cinética turbulenta (escala característica de velocidade), ε é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (escala característica de comprimento) e $C_\mu=0,09$ é uma constante empírica do modelo. No modelo $k - \varepsilon$ duas equações de transporte são resolvidas, uma para k e outra para ε , as quais são escritas, respectivamente, da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j k}{\partial x_j} = P - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right], \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right], \quad (3.16)$$

onde P é o termo de produção dado por:

$$P = \mu_T \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \left(\frac{\partial \bar{u}_n}{\partial x_n} \right), \quad (3.17)$$

sendo $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$ e $\sigma_\varepsilon = 1,3$ as outras constantes empíricas do modelo. As equações (3.12), (3.13), (3.15) e (3.16) são resolvidas simultaneamente para obtenção dos campos médios de velocidade e pressão em regime permanente.

Para que a solução desse sistema seja possível é necessário o emprego de métodos numéricos desenvolvidos em ambientes computacionais. O presente trabalho fez uso de um software de CFD baseado no método dos volumes finitos.

3.2. Base de dados experimentais

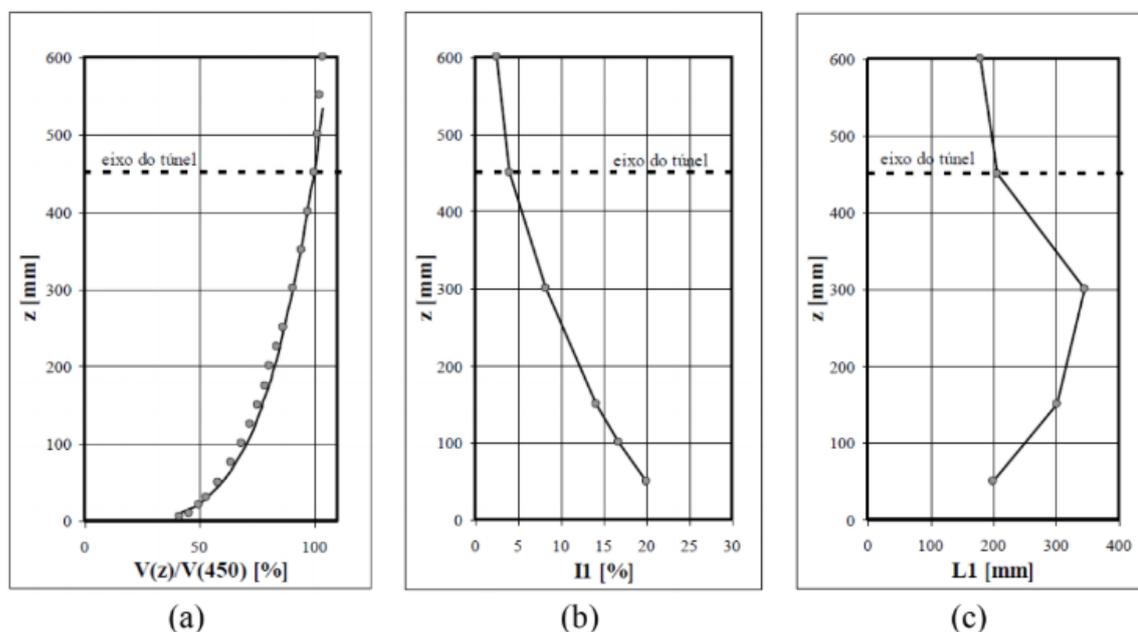
A base de dados experimentais é fundamental para o desenvolvimento das simulações, provendo não somente informações necessárias para o desenvolvimento do estudo, tais como geometrias e características do escoamento, assim como informações para a validação dos resultados simulados.

O experimento de Fontoura (2014) é usado como trabalho de suporte para as simulações desse estudo. Esta autora utilizou-se de diversos indicadores para avaliar o efeito de vizinhança e comparar com o recomendado pela norma, mediante ao uso de uma simulação em túnel de vento. O túnel de vento Professor Joaquim Blessmann foi utilizado para a realização do experimento, o equipamento é um túnel de camada limite e circuito fechado, com operação desde 1977. O túnel foi construído com o objetivo de auxiliar a construção civil, portanto, tem uma relação entre comprimento e altura acima de dez, enquanto túneis aeronáuticos, os quais geram ventos com maiores velocidades e baixas turbulências, aproximam a relação comprimento e altura de dois (Blessmann, 1990).

A tomada de velocidade do vento foi determinada a partir do diferencial de pressão, sua leitura foi feita através de tubos piezométricos. Foi simulado um vento com perfil velocidades médias, típica de um escoamento turbulento, de expoente $p = 0,23$ (rugosidade entre as categorias III e IV de acordo com a NBR 6123/88). Para simular o efeito de rugosidade foram implementados objetos triangulares vazados associados com blocos colocados no piso ao longo do túnel a barlavento da estrutura a ser analisada.

A figura 9 mostra as características do vento simulado. A figura 9(a) ilustra o perfil adimensional de velocidade média na entrada da seção de testes. A figura 9(b) mostra o perfil da intensidade da turbulência e a figura 9(c) ilustra o perfil das escalas características de comprimento da turbulência na entrada da seção de testes. Todos os perfis são relativos ao eixo longitudinal central da seção de testes.

Figura 9: Característica do perfil do vento simulado: a) Perfil da velocidade média relativa à velocidade no eixo de 450mm. B) Intensidade da componente longitudinal da turbulência. c) Macroescala da componente longitudinal da turbulência.



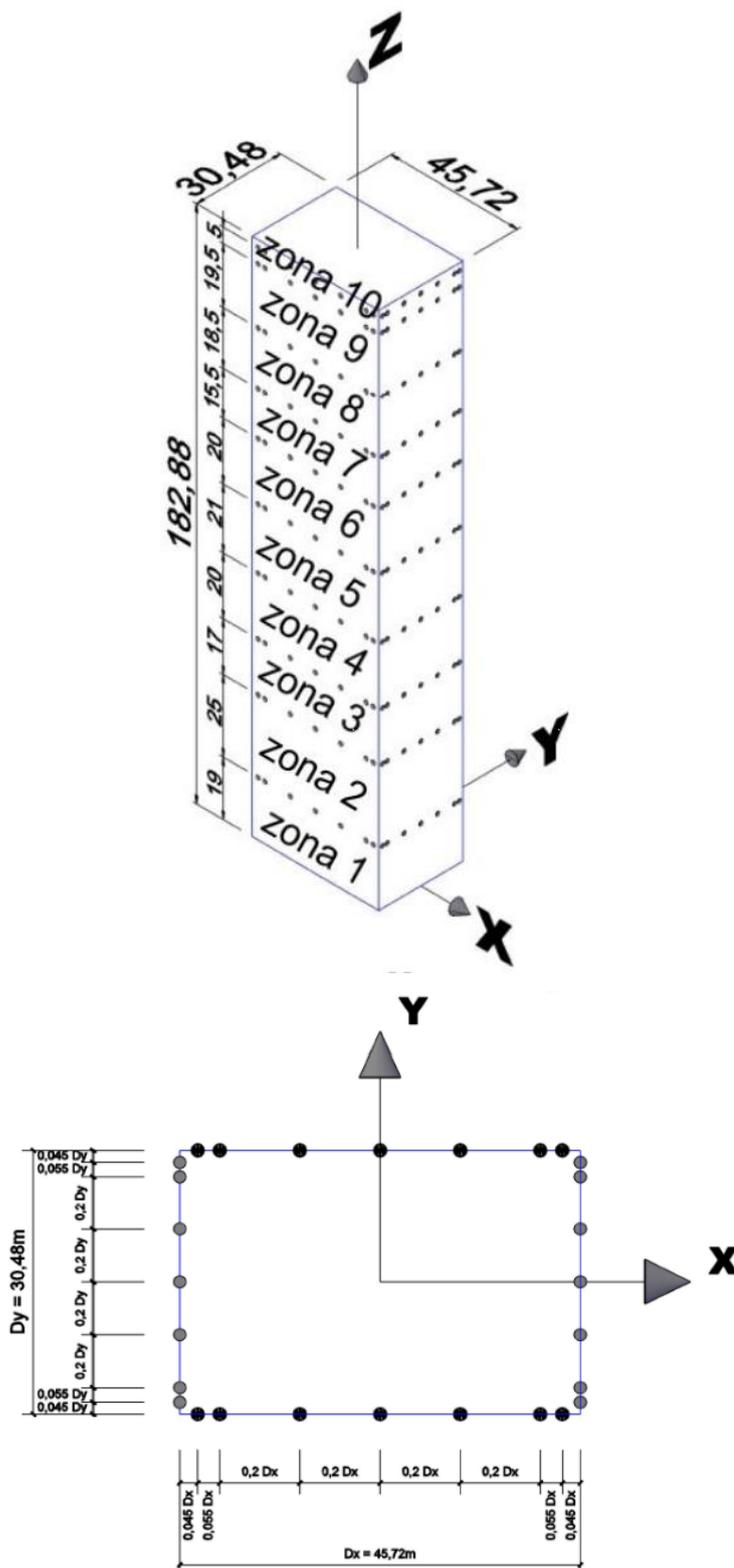
Fonte: Fontoura (2014).

Como abordado na revisão bibliográfica, as dimensões do edifício modelo CAARC são de 30,48m por 45,75m e com 182,88m de altura. Para a análise experimental o modelo foi construído em uma escala de 1:406, resultando nas dimensões 7,50cm x 11,27cm x 45,04cm, de modo com que a altura do edifício ficasse aproximadamente na metade da altura do túnel. Todos os modelos, edifícios de vizinhança e o edifício principal, foram feitos de acrílico, colando-se peça a peça com cola de contato. Por fim, foram fixados com parafusos em uma base redonda de madeira com demarcações a cada 15° a fim de auxiliar nas simulações para os vinte e quatro ângulos de incidência do escoamento. Essa base foi fixada, também com parafusos, na mesa auxiliar do túnel, a qual pode girar sob seu eixo para ajustes angulares. As tomadas de pressão foram coletadas através de um equipamento de monitoramento conectados as fachadas do modelo através de transdutores de pressão, de modo que cada ponto registrou 8192 valores de pressão num intervalo de tempo de 16 segundos. Essas medidas são feitas para cada configuração dos modelos e para cada angulação do vento.

A figura 10(a) mostra uma visão do CAARC em perspectiva. O plano horizontal é associado aos eixos x-y e o plano vertical ao eixo Z. O modelo é dividido em 10 zonas na direção vertical que possuem alturas ilustradas na figura. Na divisa entre as

zonas foram instaladas as tomadas de pressão de acordo com o ilustrado na figura 10(b).

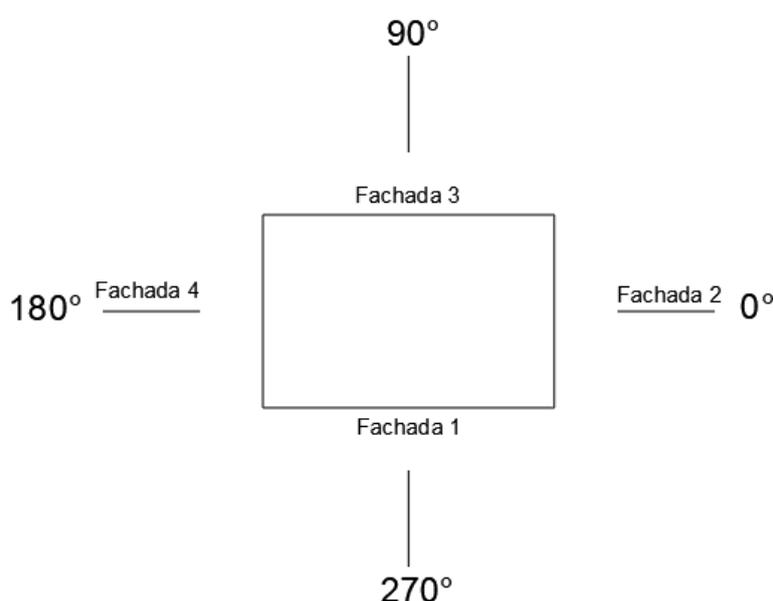
Figura 10: Disposição dos pontos de tomada de pressão.



Fonte: Fontoura (2014).

A figura 11 ilustra a identificação das fachadas em relação ao ângulo de incidência do vento. Portanto um vento de ângulo de incidência 0° é perpendicular a fachada 2, enquanto um vento de ângulo de incidência 90° é perpendicular a fachada número 3.

Figura 11: Disposição da nomenclatura de fachadas em referência a angulação de ataque do vento.

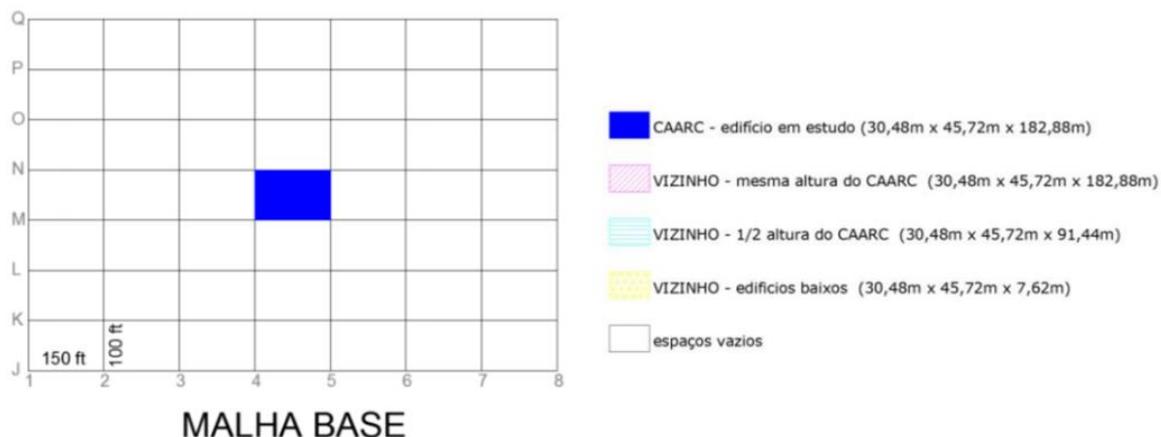


Fonte: Autoria Própria.

Os edifícios que compõem a malha de vizinhança são de três tipos: Edifício Vizinho tipo 1, 2 e 3. São classificados de acordo com a sua altura, enquanto mantém o padrão do CAARC para as demais dimensões. O edifício vizinho tipo 1 é um edifício idêntico ao CAARC, inclusive em relação a sua altura (dimensões: 30,48m x 45,72m x 182,88m). O edifício vizinho tipo 2 tem altura equivalente a metade do edifício CAARC (dimensões: 30,48m x 45,72m x 91,44m). Por fim, o edifício vizinho do tipo 3 são estruturas baixas, com as seguintes dimensões: 30,48m x 45,72m x 7,62m.

A figura 12, ilustra o posicionamento do edifício CAARC na configuração isolada em relação a malha base, a qual será utilizada como base para a determinação do posicionamento dos edifícios vizinhos nas configurações com o entorno, as quais serão descritas em detalhes ao longo do próximo tópico.

Figura 12: Posicionamento da configuração isolada, denominada como malha base.



Fonte: Fontoura (2014).

Após a realização dos ensaios, foram utilizados os dados medidos para calcular os quatro coeficientes propostos (coeficiente de arrasto, coeficiente de pressão, coeficiente de momento fletor e coeficiente de torção), os quais foram então comparados com os coeficientes da configuração isolada e calculados de acordo com a norma NBR 6123:88.

3.3. Cenários de simulação

Foram escolhidos dois cenários dentre os que foram analisados no experimento de Fontoura (2014) para o desenvolvimento dos estudos numéricos. Cada cenário é analisado em três diferentes ângulos de incidência de ventos. A escolha dos ângulos de incidência e cenários foi feita de maneira arbitrária para evitar um viés em relação a escolha de respostas. A tabela abaixo resume os cenários e incidência dos ventos. Na primeira coluna são definidos os cenários, na segunda coluna são definidas as angulações da incidência de vento, a terceira coluna apresenta o número de Reynolds do escoamento, calculado com base na largura do túnel para ar em CNTP. A quarta coluna mostra a situação da configuração e a última coluna apresenta os tipos de edifícios vizinhos presentes no modelo.

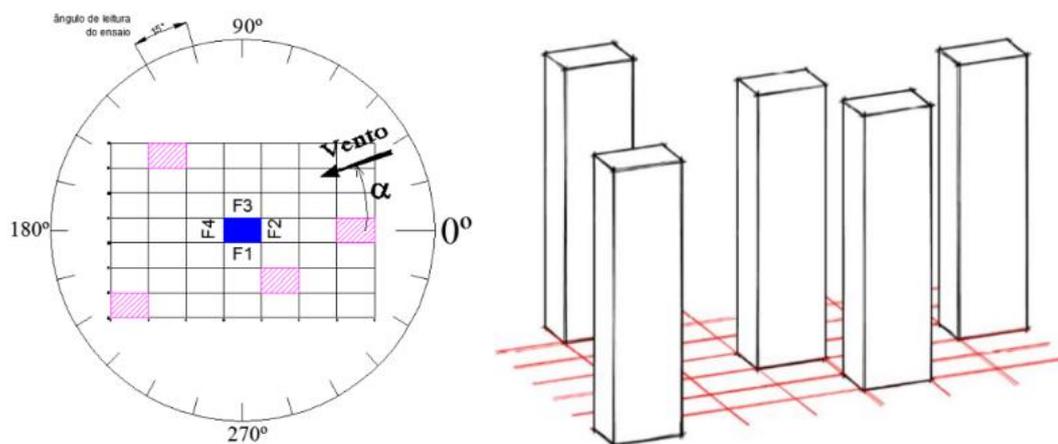
Tabela 1: Resumo dos cenários de simulação.

Cenário	Direção do Vento	Número de Reynolds	Situação	Tipos de Vizinhança
I	0°	2,6x10 ⁶	Isolado	--
	45°	2,6x10 ⁶		--
	90°	2,6x10 ⁶		--
V1	0°	2,6x10 ⁶	Vizinhança	Tipo 1
	45°	2,6x10 ⁶		Tipo 1
	90°	2,6x10 ⁶		Tipo 1

Fonte: Autoria Própria.

O cenário I é a configuração isolada na malha base como demonstrado pela figura 12 no capítulo anterior. O cenário V1 é ilustrado pela figura 13 e é composto pelo edifício CAARC e quatro cópias, conhecida como edifício vizinho tipo 1 em seu entorno.

Figura 13: Composição do cenário V1.



Fonte: Fontoura (2014).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são demonstrados os resultados das simulações computacionais, apresentados em forma discretas e contínuas mediante uso de tabelas e gráficos. Também são delineadas comparações dos resultados das simulações com os dados do estudo experimental de Fontoura (2014).

4.1. Domínio computacional e condições de contorno

As malhas computacionais desenvolvidas neste trabalho foram baseadas na geometria do túnel de vento descrito em Fontoura (2014), apresentando as dimensões 5,00 m x 1,30 m x 0,90 m (comprimento x largura x altura). Foram usadas malhas uniformes, compostas por volumes com aproximadamente $1,6 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ em média.

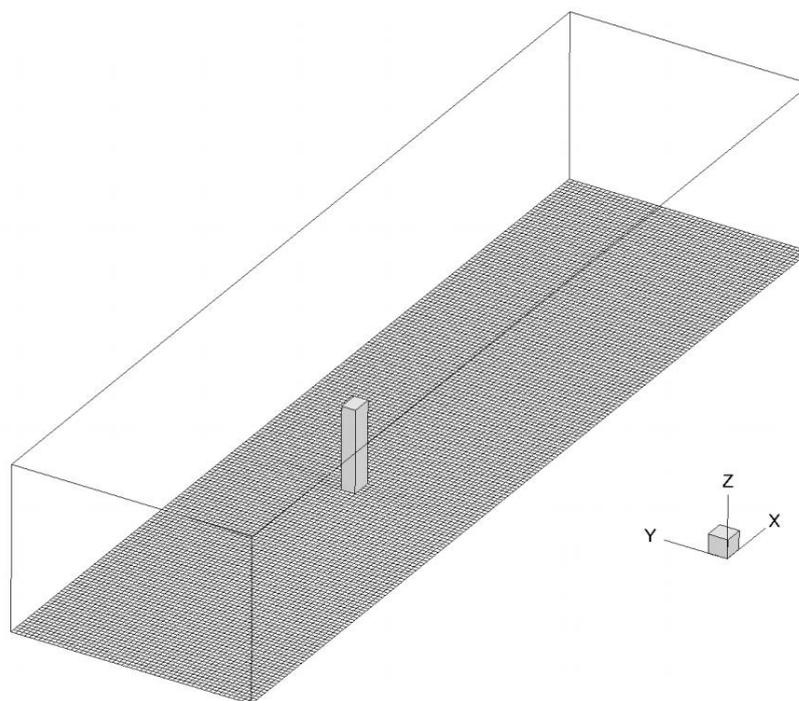
As malhas computacionais foram definidas com suas respectivas condições de contorno. A primeira condição foi definida como “*walls*” que consiste em paredes lisas com condição de não-deslizamento. As paredes são formadas pelas fachadas e pelos topos dos edifícios, assim como o piso do domínio computacional. As duas superfícies laterais e a superfície superior foram definidas por condições de simetria. A superfície de entrada dos domínios de cálculo foi definida como “*velocity inlet*” e a superfície de saída como “*pressure outlet*”.

Em todas as simulações, as condições de entrada foram baseadas no trabalho de Fontoura (2014). Optou-se por usar uma velocidade uniformemente distribuída na entrada do domínio, deixando um caminho longo o suficiente a montante dos edifícios para o desenvolvimento do perfil da camada limite atmosférica. Todos os cenários simulados adotaram velocidade de entrada de **40,9 m/s** calculada a partir do número de Reynolds apresentado por Fontoura (2014), baseando-se na geometria do túnel de vento.

As informações de entrada das características da turbulência também foram baseadas no trabalho de Fontoura (2014) e adotadas as médias na seção transversal para as simulações. A intensidade de turbulência usada como condição de entrada foi de **10%** e o comprimento característico da escala turbulenta de **0,2 m**. A velocidade de entrada de 40,9 m/s foi adotada como velocidade de referência, utilizada como base para a cálculo da pressão dinâmica.

A figura 14 ilustra o domínio computacional para o caso do edifício modelo isolado, mostrando os contornos (entrada, saída, simetrias, piso e edifício) e de forma ilustrativa a dimensão dos volumes de controle no piso.

Figura 14: Domínio computacional usado para o caso do edifício modelo isolado, mostrando os contornos e de forma ilustrativa a dimensão das faces dos volumes de controle no piso.



Fonte: Autoria Própria.

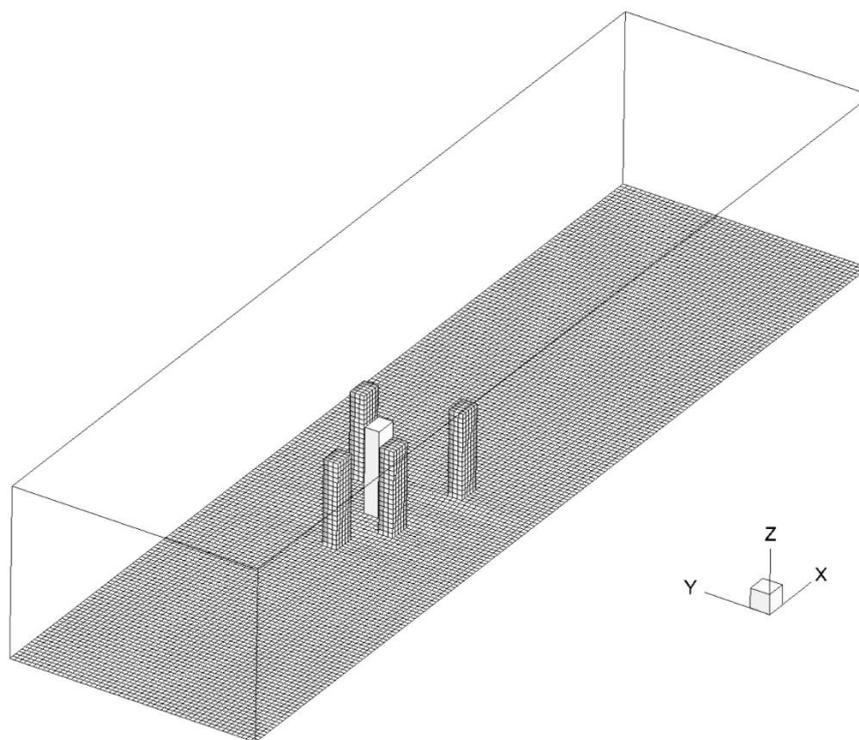
Cabe observar que a figura 14 ilustra a malha usada para o caso de vento a zero grau de incidência. Para as simulações com os ângulos de incidência de vento de 45 e 90 graus foram construídas outras duas malhas com dimensões semelhantes, de modo que o edifício modelo sofreu uma rotação ao redor de seu eixo, em relação ao piso da malha, para que os respectivos ângulos de incidência fossem equivalentes aos simulados por Fontoura (2014).

Para as simulações com vizinhança foi usado o mesmo edifício modelo e foram modeladas réplicas dos edifícios de vizinhança, dispostas como definido na tabela 1 da página 40. A figura 15 ilustra o domínio computacional para o caso do edifício com vizinhança, mostrando os contornos (entrada, saída, simetrias, piso e edifícios) e de forma ilustrativa a dimensão dos volumes de controle no piso.

Para simular os ângulos de incidência do vento de 45 e 90 graus, assim como no caso do edifício isolado, foram construídas outras duas malhas com dimensões

semelhantes, sendo que o conjunto formado pelo edifício modelo e as vizinhanças sofreram rotação. É importante ressaltar que todo o conjunto de edifícios sofreu rotação sob o mesmo ponto referencial (centro do edifício modelo), de modo que a geometria permaneceu inalterada.

Figura 15: Domínio computacional usado para o caso do edifício modelo com a vizinhança V1, mostrando os contornos e de forma ilustrativa a dimensão dos volumes de controle no piso.



Fonte: Autoria Própria.

4.2. Cenário Isolado

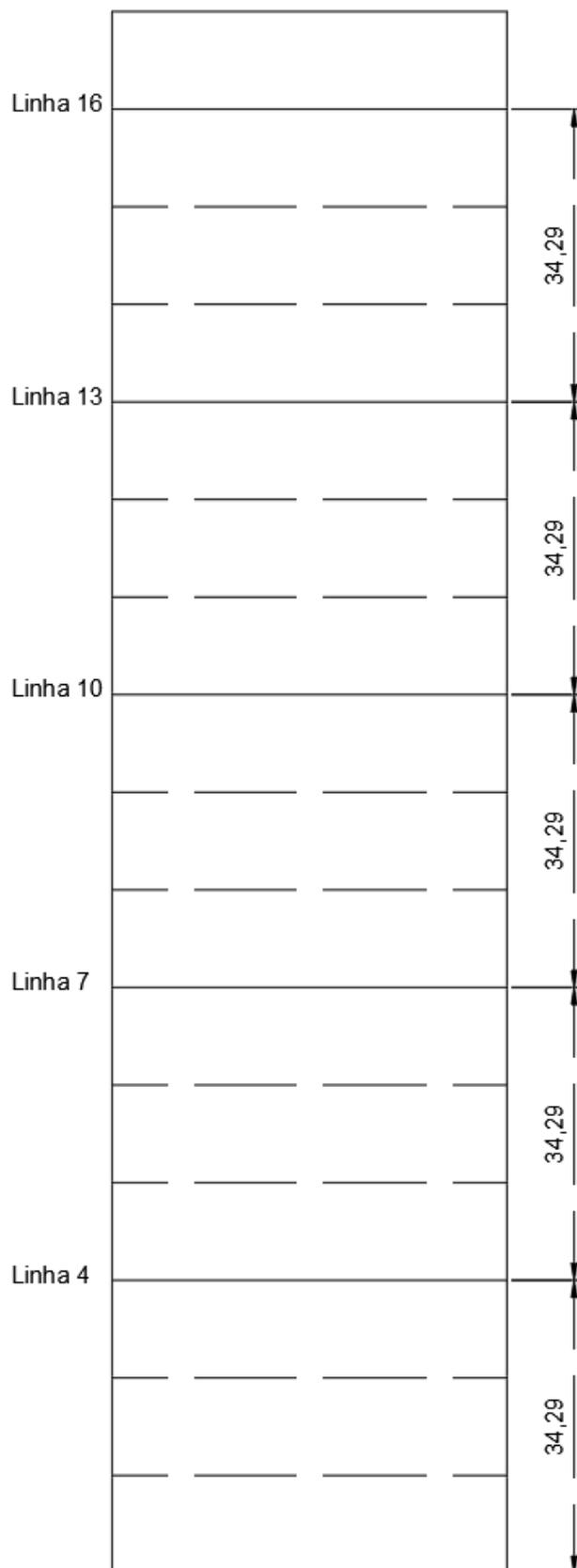
Os primeiros resultados a serem considerados e discutidos envolvem o cenário com o edifício modelo isolado.

Inicialmente, foi analisado o coeficiente de pressão, C_p , o qual foi calculado expressamente pelo software de CFD mediante uso da seguinte equação:

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2}, \quad (4.1)$$

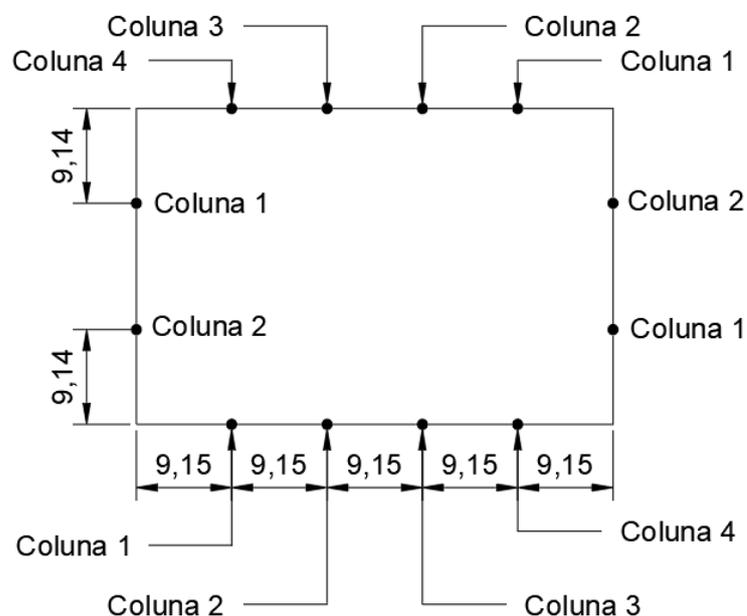
onde p é a pressão calculada, p_{ref} é a pressão de referência, nesse modelo sendo a pressão atmosférica, V_{ref} é a velocidade de referência, definida como a velocidade da corrente livre ou velocidade de entrada no domínio, sendo igual a 40,9 m/s, e ρ é a massa específica do ar, considerada constante e igual a 1,225 kg/m³, no nível do mar para a temperatura de 15°C.

Figura 16: Linhas horizontais que representam as alturas onde foram realizadas as tomadas de pressão para comparação com dados experimentais. Dimensões de protótipo em metros.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 17: Colunas verticais que representam as posições em planta onde foram realizadas as tomadas de pressão para comparação com dados experimentais. Dimensões de protótipo em metros.



Fonte: Autoria Própria.

Algumas posições específicas nas quatro fachadas do edifício modelo foram escolhidas para obtenção dos resultados das simulações e posterior comparação com os dados experimentais de Fontoura (2014). Tais posições foram fornecidas pela intersecção de linhas e colunas selecionadas da seguinte maneira:

- Na direção vertical o edifício modelo foi dividido em 16 partes iguais, das quais foram selecionadas 5 seções, nomeadas de linhas 4, 7, 10, 13 e 16. A Figura 16 ilustra essas linhas horizontais com dimensões de protótipo em metros;
- Na direção horizontal foram selecionadas 4 diferentes colunas equidistantes para as fachadas 1 e 3 (nomeadas colunas 1, 2, 3 e 4) e 2 colunas equidistantes para as fachadas 2 e 4 (nomeadas colunas 1 e 2). A Figura 17 ilustra a posição dessas colunas com dimensões de protótipo em metros.

Os resultados foram extraídos para os pontos referentes a intersecção dessas linhas e colunas.

A seguir, nas tabelas 2, 3 e 4, são mostrados os resultados numéricos obtidos para o coeficiente de pressão, C_p , para ângulos de incidência de vento de 0, 45 e 90 graus. Os resultados são mostrados para as fachadas 1, 2, 3 e 4, nas posições selecionadas, e comparados com os dados experimentais de Fontoura (2014).

Tabela 2: Resultados para o caso de cenário isolado dos coeficientes de pressão, C_p , para a incidência de vento de 0°

Fachada 1

	Coluna 1		Coluna 2		Coluna 3		Coluna 4	
	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura
Linha 4	-0,326	-0,635	-0,39396	-0,775	-0,59785	-0,9	-0,8697	-0,945
Linha 7	-0,35998	-0,7225	-0,42794	-0,86	-0,59785	-0,945	-0,90368	-0,95
Linha 10	-0,35998	-0,825	-0,42794	-0,92	-0,59785	-0,945	-0,90368	-0,91
Linha 13	-0,35998	-0,865	-0,42794	-0,925	-0,59785	-0,93	-0,90368	-0,885
Linha 16	-0,39396	-0,8375	-0,39396	-0,94	-0,56387	-0,9775	-0,83572	-0,94

Fachada 3

	Coluna 1		Coluna 2		Coluna 3		Coluna 4	
	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura
Linha 4	-0,8697	-0,955	-0,59785	-0,915	-0,39396	-0,785	-0,35998	-0,635
Linha 7	-0,90368	-0,9475	-0,59785	-0,95	-0,42794	-0,8725	-0,35998	-0,74
Linha 10	-0,90368	-0,92	-0,63183	-0,95	-0,42794	-0,92	-0,35998	-0,82
Linha 13	-0,90368	-0,89	-0,59785	-0,94	-0,42794	-0,94	-0,35998	-0,875
Linha 16	-0,8697	-0,955	-0,56387	-0,9925	-0,39396	-0,955	-0,35998	-0,83

Fachada 2

	Coluna 1		Coluna 2	
	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura
Linha 4	0,727419	0,43	0,727419	0,41
Linha 7	0,761401	0,53	0,761401	0,525
Linha 10	0,761401	0,67	0,761401	0,66
Linha 13	0,761401	0,76	0,761401	0,76
Linha 16	0,761401	0,745	0,761401	0,74

Fachada 4

	Coluna 1		Coluna 2	
	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura
Linha 4	-0,326	-0,52	-0,29202	-0,51
Linha 7	-0,35998	-0,53	-0,326	-0,265
Linha 10	-0,35998	-0,52	-0,326	-0,51
Linha 13	-0,35998	-0,54	-0,326	-0,55
Linha 16	-0,35998	-0,605	-0,35998	-0,605

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 3: Resultados para o caso de cenário isolado dos de coeficientes de pressão, C_p , para a incidência de vento de 45°

Fachada 1

	Coluna 1		Coluna 2		Coluna 3		Coluna 4	
	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura
Linha 4	-0,48228	0,37	-0,48228	0,25	-0,52365	0,115	-0,52365	-0,085
Linha 7	-0,52365	-0,6775	-0,52365	-0,6725	-0,52365	-0,6575	-0,56502	-0,6375
Linha 10	-0,56502	-0,715	-0,56502	-0,705	-0,56502	-0,685	-0,56502	-0,665
Linha 13	-0,64775	-0,755	-0,60638	-0,75	-0,60638	-0,74	-0,56502	-0,72
Linha 16	-0,73048	-0,81	-0,68911	-0,785	-0,64775	-0,76	-0,64775	-0,745

Fachada 3

	Coluna 1		Coluna 2		Coluna 3		Coluna 4	
	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura
Linha 4	0,220935	0,37	0,510496	0,25	0,717325	0,115	0,841423	-0,085
Linha 7	0,2623	0,44	0,551861	0,3075	0,75869	0,165	0,882788	-0,05
Linha 10	0,2623	0,535	0,551861	0,375	0,800056	0,2	0,882788	-0,035
Linha 13	0,2623	0,57	0,510495	0,405	0,75869	0,225	0,882788	-0,025
Linha 16	0,220934	0,5125	0,469129	0,245	0,717325	0,1825	0,841422	-0,06

Fachada 2

	Coluna 1		Coluna 2	
	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura
Linha 4	0,634593	0	0,345032	0,21
Linha 7	0,675959	0,035	0,386398	0,3
Linha 10	0,717325	0,09	0,386398	0,37
Linha 13	0,675959	0,1	0,386398	0,4
Linha 16	0,675959	0,09	0,345032	0,37

Fachada 4

	Coluna 1		Coluna 2	
	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura
Linha 4	-0,60638	-0,67	-1,06141	-0,69
Linha 7	-0,60638	-0,65	-1,06141	-0,675
Linha 10	-0,60638	-0,67	-1,06141	-0,69
Linha 13	-0,64775	-0,71	-1,10277	-0,74
Linha 16	-0,68911	-0,78	-1,14414	-0,81

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 4: Resultados para o caso de cenário isolado dos de coeficientes de pressão, C_p , para a incidência de vento de 90°

Fachada 1

	Coluna 1		Coluna 2		Coluna 3		Coluna 4	
	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura
Linha 4	-0,39305	-0,845	-0,39305	-0,835	-0,39305	-0,83	-0,39305	-0,835
Linha 7	-0,43213	-0,8075	-0,43213	-0,7875	-0,43213	-0,79	-0,43213	-0,8175
Linha 10	-0,43213	-0,8	-0,43213	-0,755	-0,43213	-0,75	-0,43213	-0,79
Linha 13	-0,43213	-0,845	-0,43213	-0,81	-0,43213	-0,81	-0,43213	-0,84
Linha 16	-0,43213	-0,865	-0,43213	-0,8675	-0,43213	-0,88	-0,43213	-0,895

Fachada 3

	Coluna 1		Coluna 2		Coluna 3		Coluna 4	
	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura
Linha 4	0,779315	0,345	0,935631	0,475	0,974709	0,47	0,779315	0,34
Linha 7	0,818394	0,425	0,974709	0,57	0,974709	0,5725	0,818394	0,43
Linha 10	0,818394	0,52	0,974709	0,675	0,974709	0,665	0,818394	0,51
Linha 13	0,818394	0,61	0,974709	0,765	0,974709	0,765	0,818394	0,605
Linha 16	0,779315	0,5975	0,935631	0,72	0,935631	0,72	0,779315	0,5975

Fachada 2

	Coluna 1		Coluna 2	
	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura
Linha 4	-0,90107	-0,99	-0,54936	-1
Linha 7	-0,94015	-0,5	-0,58844	-0,495
Linha 10	-0,94015	-1	-0,58844	-0,97
Linha 13	-0,94015	-0,99	-0,58844	-0,94
Linha 16	-0,94015	-0,5	-0,58844	-0,485

Fachada 4

	Coluna 1		Coluna 2	
	Autor	Fontoura	Autor	Fontoura
Linha 4	-0,54936	-1	-0,90107	-0,98
Linha 7	-0,54936	-1,025	-0,94015	-0,515
Linha 10	-0,58844	-0,97	-0,94015	-1
Linha 13	-0,58844	-0,98	-0,94015	-1,03
Linha 16	-0,54936	-0,485	-0,90107	-0,505

Fonte: Autoria Própria.

O desenvolvimento de modelos computacionais conta com uma aproximação iterativa numérica, portanto, é natural que a sua resposta seja composta por uma

parcela de incerteza, derivada do erro residual do processo de cálculo iterativo. Para a apresentação desses erros residuais, podemos fazer uma análise relativa ou apresentar de uma forma escalar, ou seja, um erro absoluto, subtraindo os resultados coletados pelos resultados de Fontoura (2014). Para esse trabalho foi escolhida uma apresentação em erro absoluta, por conta do tamanho escalar dos coeficientes, que usualmente se apresentam em numerais entre 0 e 1, portanto, com erros muito pequenos uma análise relativa poderia não representar de uma maneira lógica a diferença entre a análise experimental e numérica.

A tabela 5 resume os resultados mostrados nas tabelas 2 a 4. Nesta tabela é apresentado um resumo dos maiores e menores valores de erros escalares dos coeficientes de pressão nas quatro fachadas, representados pela diferença modular entre os resultados obtidos pelas simulações e os dados do experimento de Fontoura (2014).

Tabela 5: Tabela resumo do erro absoluto dos coeficientes de pressão entre os resultados das simulações numéricas e os dados experimentais de Fontoura (2014)

Menores Diferenças				Maiores Diferenças			
	CP 0°	CP 45°	CP 90°		CP 0°	CP 45°	CP 90°
Fachada 1	0,01868	0,079521	0,322872	Fachada 1	0,546039	0,43865	0,462872
Fachada 2	0,001401	0,013602	0,627325	Fachada 2	0,317419	0,640959	0,634593
Fachada 3	0,01368	0,105495	0,209709	Fachada 3	0,561039	0,857788	0,602325
Fachada 4	0,060999	0,043618	0,371406	Fachada 4	0,24502	0,386406	0,425153

Fonte: Autoria Própria.

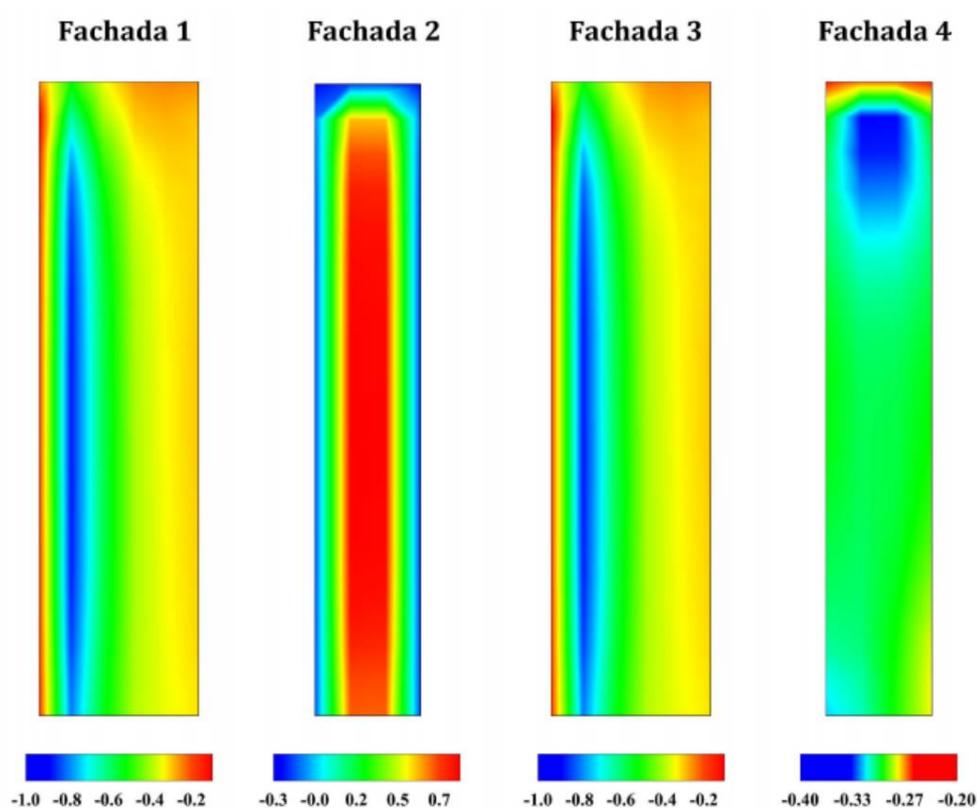
De um modo geral, os resultados das simulações se mostraram em maior conformidade com os dados experimentais para ângulo de incidência de vento de zero grau. Nesse caso, as menores diferenças entre os coeficientes de pressão foram da ordem de 0,001 para a fachada 2 e as maiores diferenças de 0,56 para a fachada 3.

Para ângulo de incidência de vento de 45 graus o menor erro foi da ordem de 0,01 para a fachada 2 e o maior erro de 0,85 para a fachada 3. Para ângulo de incidência de vento de 90 graus o menor erro foi de 0,20 para a fachada 3 e o maior erro de cerca de 0,63 para a fachada 2,

É possível perceber que os resultados das simulações tendem a uma melhor coincidência com os resultados experimentais nas fachadas que são perpendiculares a direção do vento. Ou seja, naquelas que sofrem a ação direta e frontal do vento.

Apesar de os resultados numéricos obtidos não estarem plenamente de acordo com o experimento de Fontoura (2014), os padrões dos resultados das simulações são coerentes com os dados experimentais. Isso pode ser observado a partir da análise dos mapas de contorno dos coeficientes de pressão obtidos nas simulações. A figura 18 mostra os contornos do coeficiente de pressão para o ângulo de incidência de vento de zero grau e a figura 19 mostra os contornos do coeficiente de pressão para o ângulo de incidência de 90 graus.

Figura 18: Distribuição dos coeficientes de pressão para o caso isolado com incidência a 0°.

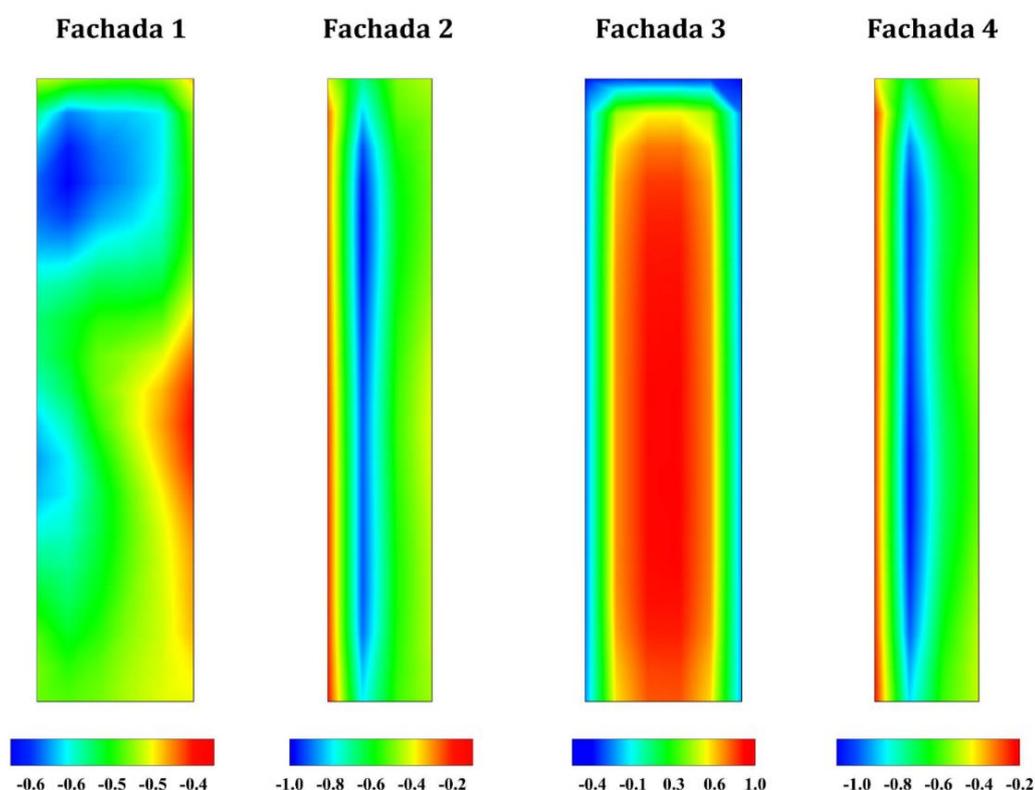


Fonte: Autoria Própria.

Em ambos os casos é possível perceber que a distribuição do contorno do coeficiente de pressão se mostra compatível em termos qualitativos com a distribuição esperada na realidade. Por exemplo, para o ângulo de incidência de zero grau os maiores coeficientes de pressão ocorrem no centro na fachada 2, que recebe o vento frontalmente (figura 18). A mesma coisa acontece na fachada 3, para vento incidente a 90 graus (figura 19). Nestes dois casos, os maiores valores estão concentrados nos centros das fachadas, apresentando uma redução gradativa em direção as bordas, onde acontecem os valores mínimos.

Também é possível observar que as fachadas laterais, paralelas as direções dos ventos, apresentam distribuições aproximadamente simétricas, como esperado. Além disso, as fachadas opostas as direções dos ventos mostram valores negativos de coeficientes de pressão, o que seria esperado, uma vez que regiões imediatamente a jusante do edifício modelo são caracterizadas pela existência de recirculação do escoamento.

Figura 19: Distribuição dos coeficientes de pressão para o caso isolado com incidência a 90°.



Fonte: Autoria Própria.

Para cálculo dos coeficientes de força foram considerados os dois eixos planos horizontais, ortogonais a altura dos edifícios, nomeados eixos x e y , sendo o eixo x paralelo as fachadas 2 e 4 e o eixo y paralelo as fachadas 1 e 3. Ou seja, o eixo x foi fixado ao longo da maior dimensão em planta do edifício, enquanto o eixo y foi fixado ao longo da menor dimensão do edifício. Portanto, no caso das simulações com ângulo de incidência de vento de zero grau, a direção do vento foi paralela ao eixo x , de modo que para simulações com ângulo de incidência de 90 graus a direção do vento foi considerada paralela ao eixo y .

O coeficiente de força pode ser definido como um parâmetro que correlaciona proporcionalmente a força resultante na direção de um eixo pré-definido com a força resultante da pressão dinâmica, exercida pelo vento sobre uma superfície de área equivalente a área de sombra ortogonal ao eixo de direção a força resultante. Tal parâmetro pode ser descrito matematicamente como:

$$Cf = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2 A_s}, \quad (4.2)$$

onde F é a força resultante no eixo desejado, ρ é a massa específica do ar, V_{ref} é a velocidade de referência do escoamento, A_s é a área de sombra da estrutura na direção analisada e Cf equivale ao coeficiente de força na direção analisada.

As forças exercidas pelo vento sobre o edifício modelo foram calculadas nas simulações pelo software de CFD, de modo que as forças resultantes na direção x , F_x , e as forças resultantes na direção y , F_y , foram determinadas para os três ângulos de incidências de ventos. As áreas projetadas pelas fachadas do edifício nas direções x e y , denominadas respectivamente A_{sx} e A_{sy} , foram calculadas de modo a permitir a determinação dos coeficientes de força de acordo com a equação 4.2. O coeficiente de força na direção x foi denominado Cf_x e o coeficiente de força resultante para a direção y foi chamado de Cf_y .

A tabela 6 apresenta os resultados dos coeficientes de força Cf_x e Cf_y obtidos pelas simulações e medidos experimentalmente no trabalho de Fontoura (2014) para os ângulos de incidência de ventos de zero, 45 e 90 graus.

Tabela 6: Resumo de resultados de coeficientes de força obtidos pelas simulações e por Fontoura

Casos	Resultados das simulações							Fontoura (2014)	
	F_x (N)	F_y (N)	V_{ref} (m/s)	A_{sx} (m ²)	A_{sy} (m ²)	Cf_x	Cf_y	Cf_x	Cf_y
Vento 0°	36,594	0,364	40,9	0,034	0,051	1,05	0,007	1,00	0,01
Vento 45°	76,100	7,656	40,9	0,060	0,060	0,72	0,58	0,86	0,90
Vento 90°	0,604	64,818	40,9	0,051	0,034	0,012	1,87	0,01	1,30

Fonte: Autoria Própria.

Para o caso de vento incidente de zero e 90 graus os coeficientes Cf_x foram praticamente coincidentes entre simulação e experimento. No caso de vento incidente a 45 graus os resultados simulados não foram semelhantes aos experimentais.

No entanto, mais importante do que o resultado escalar, o padrão e escala de resultados obtidos pelas simulações concordam com as medições experimentais, confirmando que a simulação, apesar de não ser exata, faz sentido fisicamente, sendo extremamente útil quando considerada para estudos preliminares e iterativos no processo de design em engenharia civil.

4.3. Cenário de vizinhança V1

Para o cenário analisado com a vizinhança V1 foram tratados os mesmos coeficientes que no cenário isolado, exceto pelo coeficiente de pressão, cuja análise não foi desenvolvida pelo fato de não haver dados experimentais para realizar as comparações. Ou seja, foram obtidos os coeficientes de força para as direções x e y, mediante aplicação da equação 4.2,

Com base nesses coeficientes de força, foi possível calcular numericamente os fatores de vizinhança de acordo com a equação mostrada na página 12. O fator de vizinhança baseado no coeficiente de força na direção x foi chamado de FV_x e o fator de vizinhança baseado no coeficiente de força na direção y foi chamado de FV_y .

A tabela 7 mostra os resultados dos coeficientes de força para as direções x e y obtidos pelas simulações e pelo experimento de Fontoura (2014). A tabela 8 ilustra os fatores de vizinhança calculados com base nos resultados das simulações e nos experimentos de Fontoura (2014), para os três ângulos de incidência de vento.

Tabela 7: Resumo dos resultados de coeficientes de força para o edifício com vizinhança V1

Casos	Resultados das simulações				Fontoura (2014)	
	F_x (N)	F_y (N)	CF_x	CF_y	CF_x	CF_y
Vento 0°	20,832	- 0,872	0,602	- 0,017	0,550	0,20
Vento 45°	1,406	- 14,973	0,023	- 0,245	0,020	0,07
Vento 90°	- 13,896	90,502	- 0,270	2,620	0,110	1,46

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 8: Fatores de Vizinhança calculados com base nas simulações e em Fontoura (2014)

Casos	Resultados das simulações		Fontoura (2014)	
	FV_x	FV_y	FV_x	FV_y
Vento 0°	0,568	- 2,428	0,55	20,00
Vento 45°	0,031	- 0,416	0,02	0,08
Vento 90°	- 22,30	1,396	11,00	1,120

Fonte: Autoria Própria.

Para os casos com ângulo de incidência em zero e 90 graus, os resultados das simulações são próximos dos dados medidos para os eixos de direção preferenciais, chegando a diferenças mínimas da ordem de 0,1. Observa-se também que os resultados simulados demonstraram padrões semelhantes aos resultados medidos.

Entretanto, para os coeficientes em ângulos de incidência oblíquo, os resultados obtidos pelas simulações não concordaram plenamente com o medido por Fontoura (2014). Isso pode ter ocorrido pelo fato de o modelo não estar refinado o suficiente, portanto, não pode ser capaz de interpretar as menores interferências dos edifícios vizinhos. Além disso, existe a própria limitação do modelo computacional e do modelo de turbulência empregado que pode ser uma fonte de incertezas, causando incoerências nas comparações dos resultados.

A hipótese de fonte de erros devido a imprecisão do modelo de turbulência se apresenta como a mais provável, tendo em vista que os resultados obtidos para as direções coincidentes com as direções de incidência do vento foram mais próximos dos resultados experimentais. Isso indica que o modelo numérico pode estar falhando nas regiões onde existe forte recirculação do escoamento e, portanto, alta influência dos processos turbulentos no transporte de quantidade de movimento.

Para ângulo de incidência de vento de zero grau, os fatores de vizinhança simulado e medido, baseados no coeficiente C_{fx} , se mostraram praticamente idênticos entre si em torno de 0,5. Isto indica que a presença da vizinhança reduz a ação da força do vento na direção x em cerca de 50%. Na direção y o fator de vizinhança simulado resultou em 2,4 e o medido experimentalmente em 20, indicando que a influência da vizinhança foi muito mais proeminente no experimento.

Para ângulo de incidência de vento de 45 graus, os fatores de vizinhança simulados e medidos resultaram todos menores que a unidade, indicando que a vizinhança protege o edifício modelo da ação dos ventos.

No caso de ângulo de incidência de vento de 90 graus, os fatores de vizinhança simulado e medido, baseados no coeficiente C_{fy} , resultaram em ordens de grandeza semelhantes, entre 1,1 e 1,4. Estes valores indicam que a disposição da vizinhança pode amplificar a ação dos ventos sobre o edifício modelo nessa direção em até 40%. Na direção x os fatores de vizinhança resultaram em valores entre 11 e 22,3, indicando que a influência da vizinhança foi ainda mais acentuada.

Comparando-se os resultados obtidos pelas simulações e pelos experimentos de Fontoura (2014) com o que é desenvolvido pela norma NBR 6123:88, descrita no

capítulo de revisão bibliográfica, para o caso de vento com ângulo de incidência de zero grau, o fator de vizinhança a partir do coeficiente de força seria de cerca de 1,2 (para cálculo do fator de vizinhança segundo a norma, ver item 2,1 da página 11).

Como pode-se observar, o resultado fica abaixo do mostrado nas simulações e nos experimentos. Isso demonstra a limitação do Anexo G da norma NBR 6123:88, apresentando valores que não estão compatíveis com a realidade e que não estão trabalhando em função da segurança. Portanto, é necessário realizar uma atualização da norma. Da forma atual, é necessário que a norma reconheça e recomende estudos experimentais e estudos numéricos para a confirmação dos fatores de vizinhança a serem adotados.

5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento desse estudo teve como objetivo conceber um modelo de dinâmica dos fluidos computacional para estudar os efeitos das influências de vizinhanças sobre um edifício modelo. Para isso, foi desenvolvido uma malha computacional baseada na geometria do experimento em túnel de vento de Fontoura (2014). As simulações foram desenvolvidas para um caso de edifício modelo isolado e para o caso de uma vizinhança, para ângulos de incidência de vento de zero, 45 e 90 graus.

Os resultados das simulações foram obtidos em termos de coeficiente de pressão e coeficientes de forças nas direções x e y , e os fatores de vizinhança foram calculados e comparados com os dados experimentais. Os resultados obtidos pelas simulações não foram plenamente coincidentes com os medidos no experimento. No entanto, as comparações mostraram boa coincidência dos coeficientes de pressão, dos coeficientes de força e dos fatores de vizinhança, nos casos em que as direções foram coincidentes com as direções do vento. Também se observou um padrão lógico e coerente na análise qualitativa entre os resultados simulados e os dados medidos por Fontoura (2014).

Para estudos complementares e futuros, recomenda-se desenvolver simulações para as outras vizinhanças e ângulos de ataque, tais como aqueles outros analisados em Fontoura (2014). Caso exista a viabilidade de poder computacional, seria recomendado utilizar outros modelos mais sofisticados de análise de fluido dinâmica computacional, como é o caso do modelo de simulação de grandes escalas, apresentado na revisão bibliográfica. Além disso, seria um tópico interessante a análise de edifícios reais e construídos e comparar os coeficientes encontrados numericamente com os coeficientes recomendados por norma, para analisar a necessidade de atualização da norma brasileira.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- ANDERSON JR, John David. **Fundamentals of aerodynamics**. Tata McGraw-Hill Education, 2010.
- POPE, Stephen B. **Turbulent flows**. 2001.
- BLESSMANN, Joaquim; RIERA, J. D. Wind excitation of neighbouring tall buildings. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 18, n. 1, p. 91-103, 1985.
- DYRBYE, Claës; HANSEN, Svend Ole. **Wind loads on structures**. 1997.
- GIOSAN, Ioan; ENG, P. **Vortex shedding induced loads on free standing structures**. Structural Vortex Shedding Response Estimation Methodology and Finite Element Simulation, v. 42, 2013.
- VAN OUDHEUSDEN, B. W. et al. Phase-resolved characterization of vortex shedding in the near wake of a square-section cylinder at incidence. **Experiments in Fluids**, v. 39, n. 1, p. 86-98, 2005. YAGMUR, Sercan et al. **Comparison of flow characteristics around an equilateral triangular cylinder via PIV and Large Eddy Simulation methods**. Flow Measurement and Instrumentation, v. 55, p. 23-36, 2017.
- WARDLAW, R. L.; MOSS, G. F. A standard tall building model for the comparison of simulated natural winds in wind tunnels. **CAARC, CC 662m Tech**, v. 25, 1970.
- SPODE, Cleber et al. **Simulação de grandes escalas e simulação híbrida RANS/LES do escoamento sobre o degrau com condições de contorno turbulentas**. 2006.
- ZHANG, Aishe; GU, Ming. Wind tunnel tests and numerical simulations of wind pressures on buildings in staggered arrangement. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 10-11, p. 2067-2079, 2008.
- TAMURA, Tetsuro. Towards practical use of LES in wind engineering. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 10-11, p. 1451-1471, 2008.
- ELSHAER, Ahmed et al. LES evaluation of wind-induced responses for an isolated and a surrounded tall building. **Engineering Structures**, v. 115, p. 179-195, 2016.
- PILLAI, J. Wind Tunnel Techniques. **Blogger**. Disponível em: <<http://wttaerojjcet.blogspot.com/2014/01/unit-i-open-and-closed-circuit-wind.html>>. Acesso em junho de 2019.
- HUANG, S. H.; LI, Q. S.; WU, J. R. A general inflow turbulence generator for large eddy simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 98, n. 10-11, p. 600-617, 2010.
- DAGNEW, Agerneh K.; BITSUAMLAK, Girma T. LES evaluation of wind pressures on a standard tall building with and without a neighboring building. In: **The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)**. Chapel Hill North Carolina, USA, 2010.
- HUI, Yi et al. Pressure and flow field investigation of interference effects on external pressures between high-rise buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 115, p. 150-161, 2013.

JONES, W. P.; LAUNDER, Brian Edward. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. **International journal of heat and mass transfer**, v. 15, n. 2, p. 301-314, 1972.

FLUENT, ANSYS. 14.0 User's Manual. **ANSYS Inc., Canonsburg, PA**, 2011.

BLESSMANN, Joaquim. **Aerodinâmica das construções**. 2, ed. Porto Alegre: Sagra. 1990. 263 p.

FONTOURA, Patrícia Cristina Cunha Nunes de et al. **Estudo experimental em túnel de vento dos efeitos de vizinhança em edifícios altos**. 2014.