



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
NÚCLEO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MATEUS CALEBE ALMEIDA DANTAS CAVALCANTE

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA EDIFICAÇÃO NA AERODINÂMICA DE  
SISTEMAS EÓLICOS INTEGRADOS UTILIZANDO OPENFOAM**

Caruaru  
2019

MATEUS CALEBE ALMEIDA DANTAS CAVALCANTE

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA EDIFICAÇÃO NA AERODINÂMICA DE  
SISTEMAS EÓLICOS INTEGRADOS UTILIZANDO OPENFOAM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

**Área de concentração:** Estruturas e Materiais.

**Orientador:** Prof. Dr. Gustavo Bono.

Caruaru  
2019

Catálogo na fonte:  
Bibliotecário – Raul César de Melo – CRB/4 – 1735

C376i Cavalcante, Mateus Calebe Almeida Dantas.  
Influência da geometria da edificação na aerodinâmica de sistemas eólicos integrados utilizando openfoam / Mateus Calebe Almeida Dantas Cavalcante. – 2019.  
132 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Gustavo Bono.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2019.  
Inclui Referências.

1. Edifícios – Aerodinâmica. 2. Geometria. 3. Fluidodinâmica computacional. 4. Energia eólica. I. Bono, Gustavo (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-468)

MATEUS CALEBE ALMEIDA DANTAS CAVALCANTE

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA EDIFICAÇÃO NA AERODINÂMICA DE  
SISTEMAS EÓLICOS INTEGRADOS UTILIZANDO OPENFOAM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 28/08/2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Gustavo Bono (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Alessandro Romario Echevarria Antunes (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Mariana Fernandes dos Santos Villela (Examinadora Interna)  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho ao Deus Altíssimo, minha família, em especial à minha esposa Tamires Maiara e à minha filha Anna Valentina.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por sua intensa graça e amor. DEle emana toda fonte de conhecimento e sabedoria: “O temor do Senhor é o princípio da sabedoria” - Provérbios 9:10a. A Ele minha eterna gratidão e devoção.

À minha amada esposa Tamires Maiara da Silva Cavalcante por seu apoio incondicional, seu amor, carinho e compreensão durante essa jornada e por me presentear de uma maneira tão especial com nossa filha Anna Valentina.

Aos meus pais José Gilson Dantas Cavalcante e Maria José de Almeida Dantas Cavalcante, a minha irmã Hanna Sarai, minha cunhada Jensuellem Mércia e seu esposo Andson Jefferson, ao meu sogro João Rufino, a minha sogra Maria Aparecida e a todos os meus familiares por todo apreço e por sempre acreditarem em mim.

Ao meu orientador, professor Gustavo Bono, por sua solicitude e afinco na disseminação do conhecimento, sem medir esforços, sempre estando a disposição para auxiliar e resolver os problemas que surgiram ao longo da caminhada. Foi peça fundamental para esta realização.

Aos professores e colaboradores que compõem o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) do Centro Acadêmico do Agreste por sua cordialidade e excelência na realização do seu trabalho.

Ao Laboratório de Engenharia Computacional pela disponibilização de recursos para as simulações deste trabalho e aos colegas que fazem parte do laboratório por todo apoio e conhecimentos transmitidos, em especial Anderson Viana, pelas virtuosas discussões com grandes contribuições para esse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro recebido durante a realização deste trabalho.

Ao Centro Nacional de Processamento de Alto Desempenho em São Paulo (CENAPAD-SP) pela disponibilização de recursos para as simulações deste trabalho.

À comunidade do *OpenFOAM*, presente em grupos nas redes sociais e blogs, pela grande ajuda e contribuição para realização deste trabalho.

## RESUMO

Atualmente, a população em áreas urbanas vem crescendo em ritmo acelerado, trazendo consigo demandas habitacionais e energéticas, aumento da emissão de gases poluentes, entre outros fatores. Em meio a este cenário, a utilização de turbinas eólicas situadas em locais estratégicos nas edificações apresenta-se como uma solução sustentável ao ambiente urbano. O presente trabalho visa, através da Dinâmica dos Fluidos Computacional, determinar as regiões entre prédios paralelos onde os aerogeradores apresentariam um melhor rendimento aerodinâmico, para isso, analisa-se o campo de velocidade, distribuição de pressão, índice de turbulência, parâmetros geométricos das edificações e ângulo de incidência do escoamento. Para o estudo serão utilizados programas livres. O programa *SALOME* emprega-se para modelar a geometria e malha dos casos bidimensionais, enquanto que para os casos tridimensionais a geometria é modelada com o *SALOME* e a malha é gerada com o *OpenFOAM*, através da função *snnapyHexMesh*. As simulações são realizadas no *OpenFOAM*, utilizando modelagem RANS. Inicialmente, foram simulados dois casos: o escoamento ao redor de um cilindro quadrado e o escoamento sobre um prédio isolado. Finalmente, foram simulados dois prédios paralelos de altura (H) e lado (B) com razão de aspecto 1:1:4, raio de arredondamento da aresta interna igual a  $r/B = 0, 0,10, 0,20$  e  $0,30$  e dois ângulos de incidência,  $0^\circ$  e  $15^\circ$ . Verificou-se que a melhor região para instalação das turbinas eólicas seria no plano de simetria entre os prédios com  $r/B = 0,10$  e com  $x/B = 0,0, 0,40 \leq y/B \leq 0,40$  e  $3,0 \leq z/B \leq 4,0$ .

Palavras-chave: Dinâmica dos Fluidos Computacional. Modelagem RANS. Simulação Numérica. *OpenFOAM*.

## ABSTRACT

Currently, the population in urban areas has been growing at a rapid pace, bringing with it housing and energy demands, increased emissions of polluting gases, among other factors. Amid this scenario, the use of wind turbines located in strategic locations in buildings is a sustainable solution to the urban environment. The present work aims, through Computational Fluid Dynamics, to determine the regions between parallel buildings where the wind turbines would present a better aerodynamic efficiency. For this, we analyze the velocity field, pressure distribution, turbulent intensity, geometric parameters of the buildings and angle of incidence of flow. For the study will be used free softwares. The SALOME program is used to model the geometry and mesh of two-dimensional cases, while for three-dimensional cases the geometry is modeled with SALOME and the mesh is generated with OpenFOAM, using the snappyHexMesh function. Simulations are performed in OpenFOAM using RANS modeling. Initially, two cases were simulated: the flow around a square cylinder and the flow over an isolated building. Finally, two parallel buildings of height (H) and side (B) with 1: 1: 4 aspect ratio, rounding radius of the inner edge equal to  $r/B = 0, 0.10, 0.20$  and  $0.30$ , and two angles of incidence,  $0^\circ$  and  $15^\circ$ , were simulated. It was found that the best region for installation of wind turbines would be in the plane of symmetry between buildings with  $r/B = 0.10$  and with  $x/B = 0.0, 0.40 \leq y/B \leq 0.40$  and  $3.0 \leq z/B \leq 4.0$ .

Keywords: Computational Fluid Dynamics. RANS Modeling. Numerical Simulation. OpenFOAM.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Capacidade mundial e adições anuais de energia eólica (2007-2017) .....	16
Figura 2 –	Sistema de turbinas eólicas integradas em edificações: a) três possíveis locais de instalação de turbinas de grande porte; b) dois possíveis locais de instalação de turbinas de pequeno porte .....	19
Figura 3 –	Escoamento incompressível em torno de um cilindro circular .....	25
Figura 4 –	Mecanismo de formação e desprendimento de vórtices proposto por Gerrard (1996) .....	26
Figura 5 –	Comparação entre aproximação do perfil de velocidade do vento em área urbana e em ambiente urbano .....	27
Figura 6 –	Representação esquemática da topologia do escoamento em torno de edificações altas .....	29
Figura 7 –	Resumo dos elementos necessários a simulação na DFC ....	54
Figura 8 –	Estrutura de arquivos do OpenFOAM .....	56
Figura 9 –	Parâmetros na discretização de volumes finitos .....	58
Figura 10 –	Conservação de uma variável dentro em um volume de controle .....	58
Figura 11 –	Domínio computacional e condições de contorno do cilindro quadrado 2D .....	59
Figura 12 –	Detalhe da geometria .....	62
Figura 13 –	Domínio computacional para o caso do prédio isolado .....	63
Figura 14 –	Comparação entre os perfis de entrada numérico (presente estudo) e experimental de Meng e Hibi (1998): (a) Velocidade, (b) energia cinética turbulenta e (c) dissipação turbulenta de energia .....	64
Figura 15 –	Configuração das edificações que serão analisadas .....	65
Figura 16 –	Domínio computacional para o caso da passagem entre prédios paralelos .....	66

Figura 17 –	Comparação entre os perfis de entrada numérico (presente estudo) e experimental de velocidade e intensidade de turbulência .....	67
Figura 18 –	Malha SC3 .....	68
Figura 19 –	Detalhes das malhas SC1 (a), SC2 (b) e SC3 (c) do caso do cilindro quadrado 2D .....	69
Figura 20 –	Malha 3D realizada com o utilitário snappyHexMesh do OpenFOAM para o caso do prédio isolado .....	70
Figura 21 –	Detalhes das malhas M1 (a), M2 (b) e M3 (c) do caso do prédio isolado .....	71
Figura 22 –	Malha 3D realizada com o utilitário snappyHexMesh do OpenFOAM para o caso do prédios paralelos .....	72
Figura 23 –	Visualização dos campos de velocidade média, coeficiente de pressão médio, linhas de corrente, viscosidade turbulenta instantânea e distribuição de energia cinética turbulenta média para o modelo SST WF .....	87
Figura 24 –	Visualização dos campos de velocidade média, coeficiente de pressão médio, linhas de corrente, viscosidade turbulenta instantânea e distribuição de energia cinética turbulenta média para o modelo LS WF .....	88
Figura 25 –	Detalhe das regiões de recirculação e dos perfis de velocidade.....	89
Figura 26 –	Comparação dos resultados dos perfis de Velocidade U e energia cinética turbulenta k com resultado numérico e experimental no plano $y/B=0,0$ para $x/B = -0,75, 0,0$ e $0,75$ .	91
Figura 27 –	Comparação dos resultados dos perfis de Velocidade U e energia cinética turbulenta k com resultado experimental no plano $y/B=0,0$ para $x/B = 1,25, 2,0$ e $3,25$ .....	92
Figura 28 –	Comparação do resultado energia cinética turbulenta (a) no plano $y/B= 0,0$ no centro do domínio com resultado numérico de Toja-Silva et al. (2015a) (b) e experimental de Meng e Hibi (1998) (c) .....	93

Figura 29 –	Comparação do resultado numérico com o experimental (TPU) para $r/B= 0,0$ e $\theta = 0^\circ$ .....	94
Figura 30 –	Comparação do resultado numérico com o experimental (TPU) para $r/B= 0,0$ e $\theta = 15^\circ$ .....	95
Figura 31 –	Intensidade de turbulência no plano de simetria $zy$ em $x=0$ .	96
Figura 32 –	Distribuição de velocidade em $x$ e distribuição de pressão no plano de simetria $zy$ em $x=0$ .....	98
Figura 33 –	Distribuição de velocidade em $y$ e $z$ no plano de simetria $zy$ em $x=0$ .....	100
Figura 34 –	Intensidade de turbulência para o plano $xy$ em $z = H/4$ e $H/2$	102
Figura 35 –	Intensidade de turbulência para o plano $xy$ em $z = 3H/4$ e $H$	103
Figura 36 –	Distribuição da velocidade média para o plano $xy$ em $z = H/4$ e $H/2$ .....	105
Figura 37 –	Distribuição da velocidade média para o plano $xy$ em $z = 3H/4$ e $H$ .....	106
Figura 38 –	Linhas de corrente para os casos analisados .....	107
Figura 39 –	Coeficiente médio de pressão para $\theta = 0^\circ$ .....	108
Figura 40 –	Coeficiente médio de pressão para $\theta = 15^\circ$ .....	109
Figura 41 –	Detalhes do posicionamento dos perfis de velocidade e intensidade de turbulência .....	114
Figura 42 –	Intensidade de turbulência para o caso $r/B= 0,10$ e $\theta = 0^\circ$ ....	119
Figura 43 –	Intensidade de turbulência para o caso $r/B= 0,10$ e $\theta = 15^\circ$ .	120
Figura 44 –	Linhas de corrente para o caso $r/B= 0,10$ e $\theta = 0^\circ$ .....	120
Figura 45 –	Linhas de corrente para o caso $r/B= 0,10$ e $\theta = 15^\circ$ .....	120
Figura 46 –	Distribuição de pressão para o caso $r/B= 0,10$ e $\theta = 0^\circ$ .....	121
Figura 47 –	Distribuição de pressão para o caso $r/B= 0,10$ e $\theta = 15^\circ$ .....	121

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Distribuição da velocidade média em x ao longo da linha central do corpo .....	80
Gráfico 2 –	Coeficiente de pressão médio para o modelo SST .....	85
Gráfico 3 –	Coeficiente de pressão médio para o modelo LS .....	85
Gráfico 4 –	Distribuição de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura para $x/B=-0,50$ e $\theta = 0^\circ$ .....	110
Gráfico 5 –	Distribuição de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura para $x/B=-0,50$ e $\theta = 15^\circ$ .....	111
Gráfico 6 –	Distribuição de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura para $x/B=-0,25$ e $\theta = 0^\circ$ .....	111
Gráfico 7 –	Distribuição de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura para $x/B=-0,25$ e $\theta = 15^\circ$ .....	112
Gráfico 8 –	Distribuição de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura para $x/B=0$ e $\theta = 0^\circ$ .....	113
Gráfico 9 –	Distribuição de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura para $x/B=0$ e $\theta = 15^\circ$ .....	113
Gráfico 10 –	Intensidade de turbulência (esquerda) e distribuição de velocidade (direita) na passagem entre prédios paralelos para o casos $r/B=0,10$ em $z/B=3$ e $\theta = 0^\circ$ (superior) e $15^\circ$ (inferior) .....	115
Gráfico 11 –	Intensidade de turbulência (esquerda) e distribuição de velocidade (direita) na passagem entre prédios paralelos para o casos $r/B=0,10$ em $z/B=3,50$ e $\theta = 0^\circ$ (superior) e $15^\circ$ (inferior) .....	116
Gráfico 12 –	Intensidade de turbulência (esquerda) e distribuição de velocidade (direita) na passagem entre prédios paralelos para o casos $r/B=0,10$ em $z/B=4,0$ e $\theta = 0^\circ$ (superior) e $15^\circ$ (inferior) .....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Constantes do modelo $k - \varepsilon$ .....	46
Tabela 2 –	Constantes do modelo RNG $k - \varepsilon$ .....	47
Tabela 3 –	Constantes do modelo $k - \omega$ SST .....	49
Tabela 4 –	Constantes do modelo <i>Low-Reynolds</i> Launder e Sharma $k - \varepsilon$ .....	51
Tabela 5 –	Condições de contorno aplicadas ao domínio do cilindro quadrado para os modelos SST e LS sem função de parede	60
Tabela 6 –	Condições de contorno aplicadas ao domínio do cilindro quadrado para os modelos SST e LS com função de parede	61
Tabela 7 –	Condições de contorno aplicadas ao domínio do prédio isolado .....	63
Tabela 8 –	Disposição dos casos analisados .....	65
Tabela 9 –	Valores da quantidades de volumes e $y^+$ para as malhas SC1, SC2 e SC3 do caso do cilindro quadrado 2D .....	69
Tabela 10 –	Parâmetros de refinamento para as malhas tridimensionais	70
Tabela 11 –	Quantidade de volumes para as malhas M1, M2 e M3 do caso do prédio isolado .....	71
Tabela 12 –	Categorias do <i>fvSchemes</i> .....	73
Tabela 13 –	Esquemas numéricos para o caso transiente .....	74
Tabela 14 –	Esquemas numéricos para o caso estacionário .....	74
Tabela 15 –	Resultados dos coeficientes aerodinâmicos das diferentes malhas para o caso do cilindro quadrado 2D .....	78
Tabela 16 –	Comparação dos resultados dos coeficientes aerodinâmicos do presente trabalho com resultados experimentais e numéricos .....	79
Tabela 17 –	Perfis de Velocidade U para $x/D = -0.5, 0.0$ e $0.5$ .....	81
Tabela 18 –	Perfis de Velocidade U para $x/D = 1.0, 2.5$ e $6.0$ .....	82
Tabela 19 –	Perfis de Velocidade V para $x/D = -0.5, 0.0$ e $0.5$ .....	83
Tabela 20 –	Perfis de Velocidade V para $x/D = 1.0, 2.5$ e $6.0$ .....	84
Tabela 21 –	Comparação dos resultados das regiões de recirculação do presente trabalho com resultado experimental e numéricos	90

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	20
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>2</b>	<b>TEORIA</b> .....	<b>21</b>
2.1	ESCOAMENTO EM TORNO DE CORPOS ROMBUDOS .....	24
2.2	ESCOAMENTO EM TORNO DE EDIFÍCIOS .....	26
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>MODELAGEM NUMÉRICA</b> .....	<b>36</b>
4.1	EQUAÇÕES GOVERNANTES.....	36
4.2	CARACTERÍSTICAS DA TURBULÊNCIA.....	37
4.3	MODELAGEM DA TURBULÊNCIA .....	41
4.3.1	<b>Decomposição de Reynolds e o problema de fechamento</b> .....	<b>42</b>
4.3.2	<b>Modelo <math>k - \varepsilon</math> padrão</b> .....	<b>45</b>
4.3.3	<b>Modelo RNG <math>k - \varepsilon</math></b> .....	<b>47</b>
4.3.4	<b>Modelo <math>k - \omega</math> SST</b> .....	<b>48</b>
4.3.5	<b>Low Reynolds <math>k - \varepsilon</math> Launder e Sharma</b> .....	<b>50</b>
4.3.6	<b>Funções de Parede</b> .....	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>53</b>
5.1	OPENFOAM .....	55
5.1.1	<b>Estrutura de um caso</b> .....	<b>56</b>
5.1.2	<b>Abordagem do Método dos Volumes Finitos</b> .....	<b>57</b>
5.1.3	<b>Configuração dos casos estudados</b> .....	<b>59</b>
5.1.4	<b>Discretização Espacial</b> .....	<b>67</b>
5.1.5	<b>Esquemas Numéricos</b> .....	<b>72</b>
5.1.6	<b>Resolução dos sistemas algébricos</b> .....	<b>75</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>77</b>

6.1	CILINDRO QUADRADO 2D .....	77
6.2	PRÉDIO ISOLADO 1:1:2 .....	89
6.3	ESTUDO DE CASO: PRÉDIOS PARALELOS 1:1:4 .....	93
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>121</b>
7.1	CONCLUSÕES.....	121
7.2	TRABALHO FUTUROS .....	123
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>124</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As áreas urbanas têm apresentado um alto crescimento populacional ao longo dos anos, principalmente em torno dos grandes centros, seja em busca de uma oportunidade de melhoria de vida, para qualificação pessoal ou ainda por uma questão de comodidade, tendo a disposição variados serviços que muitas vezes não estão à disposição em pequenas cidades. Edenhofer *et al.* (2015) mostram que cerca de 52% da população mundial reside em áreas urbanas e esse valor deve chegar a 70% em uma projeção para 2050. Os autores ainda apontam que a população que reside em áreas urbanas atualmente, é responsável por mais de 70% da emissão global de CO<sub>2</sub>.

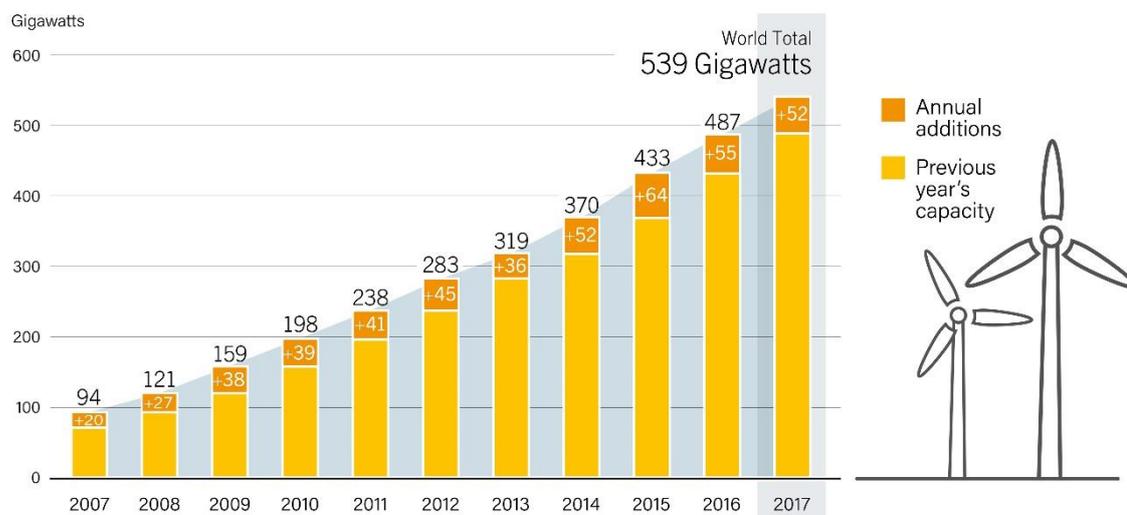
Naturalmente, com o aumento da densidade urbana, surgem algumas demandas, como a questão habitacional e comercial que é caracterizada pela verticalização do ambiente urbano, ou seja, o aumento do número de prédios, além de um alto consumo de energia e aumento da poluição. Surge então, uma necessidade de buscar uma solução que seja sustentável, não poluente e viável dentro da configuração e do potencial do ambiente: o aproveitamento da energia eólica em áreas urbanas.

O relatório da Situação Mundial de Energias Renováveis<sup>1</sup> (2018) apresenta os resultados mundiais de investimentos e desenvolvimento em energias renováveis, apontando um grande crescimento do aproveitamento da energia eólica, tendo um adição de 52 GW em 2017, chegando a produção de 539 GW, se firmando a cada ano como uma alternativa viável, limpa e amplamente difundida em uma escala global (Figura 1). A energia dos ventos representa cerca de 5.6% da produção de energia elétrica a nível mundial. O relatório ainda enfatiza que o Brasil teve um aumento de 2 GW na produção de energia eólica, ficando acima de países como Espanha, França, Canadá e Itália, mesmo que sua produção total esteja à frente apenas destes dois últimos.

---

<sup>1</sup> Disponível em <[http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652\\_GSR2018\\_FullReport\\_web\\_final\\_.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_final_.pdf)>

Figura 1 – Capacidade mundial e adições anuais de energia eólica (2007-2017)



Fonte: REN 21, 2018

Araújo *et al.* (2013) apontam o potencial eólico do Brasil, apresentando uma costa de 7400 km onde reside mais de 72% população, com destaque para região costeira nordeste. De Jong *et al.* (2017) também apontam esse potencial da região nordeste trazendo uma estimativa que até 2020, 57% da energia da região deve ser provida através da energia eólica. Silva *et al.* (2016) avaliam ainda o potencial de outras regiões, bem como Adami, Antunes Júnior e Sellitto (2017) apresentam o caso específico do Rio Grande do Sul. Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABBEólica), o Brasil atingiu a marca de 15 GW de capacidade instalada de energia eólica em 601 parques eólicos e mais 7000 aerogeradores em 12 estados, sendo o nordeste responsável por cerca de 86% dessa produção. Essa capacidade confere a energia eólica o segundo lugar na matriz energética do país. Levando em considerações essas estatísticas, o Brasil apresenta um grande potencial para a geração de energia elétrica a partir do aproveitamento da energia do vento, que é comumente feito em áreas abertas, como parques eólicos, mas que, pode ser uma solução que se adeque aos ambientes urbanos e diminua o custo energético das edificações através da utilização de aerogeradores.

A energia eólica no meio urbano é uma fonte com grande potencial de exploração. Algumas dessas vantagens podem ser mencionadas como sendo: (i) suprimento de eletricidade em áreas isoladas, longe de redes de fornecimento, adaptando-se às fontes renováveis e aos requisitos de abastecimento; (ii) a energia é gerada de forma distribuída (micro geração de energia distribuída), evitando perdas

elétricas de transporte e distribuição; (iii) permite que o consumo de energia seja isolado ou conectado à rede de distribuição; (iv) pode ser combinado com energia fotovoltaica em instalações híbridas (TOJA-SILVA, COLMENAR-SANTOS e CASTRO-GIL, 2013). No entanto, pequenas turbinas eólicas em áreas urbanas ainda são pouco utilizadas, os principais obstáculos são: (i) os altos níveis de ruído provocados pelas turbinas e acuidade visual; (ii) preocupações acerca da segurança; (iii) alto custo relativo e a manutenção de aerogeradores em relação a soluções mais robustas, como a energia fotovoltaica (ENCRAFT, 2009).

Toja-Silva, Colmenar-Santos e Castro-Gil (2013) apresentaram as oportunidades e desafios para exploração de energia eólica urbana mostrando o potencial dessa fonte energética, no entanto apontaram também outro impedimento: um certo desconforto dos consumidores com relação a expectativa de energia gerada e a energia real gerada. Para evitar esse problema é necessária uma análise minuciosa do escoamento em torno dos edifícios, a fim de decidir o melhor posicionamento possível para as turbinas eólicas em função do aproveitamento do efeito de aceleração do vento nas bordas e telhados das edificações, e o tipo mais adequado de turbina para cada caso particular.

A influência do vento nas estruturas é um assunto complexo. É necessária uma abordagem estatística para descrever a carga de vento nas estruturas. O vento induz pressões superficiais e de sucção que podem ser críticas para fachadas e telhados (SIMIU, 2011). Para pontes e edifícios altos, os efeitos do vento sobre as estruturas são mais complexos, devendo serem analisados cuidadosamente os momentos fletores e torsões, esforços normais, esforços no revestimento, conforto dos pedestres ao redor dos edifícios, o impacto do novo edifício sobre as construções existentes, pressões internas e vibrações (FAROUK, 2016).

O escoamento em áreas urbanas passa por diversos obstáculos (edificações, vegetação, etc.) e constitui um ambiente com a aerodinâmica muito complicada. Embora um progresso considerável tenha sido relatado para entender a aerodinâmica do ambiente urbano, o escoamento ainda está sendo amplamente investigado experimentalmente e computacionalmente. Isso se deve ao fato de que os escoamentos urbanos são influenciados por vários componentes que não podem ser examinados de forma independente, como a complexidade das configurações e geometrias das edificações que desempenham papel significativo no impacto do padrão de escoamento (STATHOPOULOS *et al.*, 2018).

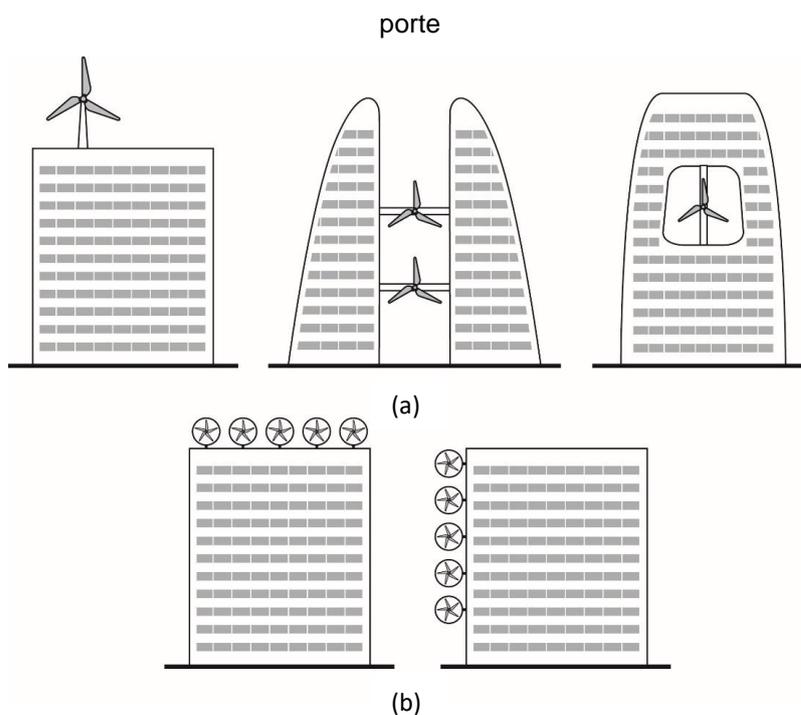
Apesar do escoamento ao redor das construções apresentar baixas velocidades médias e altos índices de turbulências, o que seria a pior situação para instalação de uma turbina eólica, Lu e Ip (2009) afirmam que o escoamento em torno do edifício pode incrementar a velocidade e o rendimento do aerogerador em relação as áreas abertas. Devido ao rendimento energético das turbinas eólicas crescer em forma cúbica com a velocidade do vento (WHITE, 2011), a disposição de aerogeradores torna-se uma solução viável para o ambiente urbano.

Para se adequar à realidade urbana, as turbinas eólicas são projetadas para ter a máxima eficiência e confiabilidade possível, tornando seu empreendimento economicamente viável. Segundo Ishugah *et al.* (2014), existem diversas configurações de turbinas eólicas no mercado, no entanto, as utilizadas em áreas urbanas são basicamente de dois tipos: turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWT's – *Horizontal Axis Wind Turbines*) e turbinas eólicas de eixo vertical (VAWT's – *Vertical Axis Wind Turbines*). As turbinas do tipo HAWT são as mais utilizadas por apresentarem um rendimento muito próximo do máximo teórico, fato que desperta o interesse massivo da indústria.

Park *et al.* (2015) apresentaram várias possibilidades de integração de sistemas de geração de energia eólica em ambientes urbanos através do sistema de integração de turbinas eólicas em edifícios (BIWT – *Building-Integrated Wind Turbines*). A aplicação de sistemas BIWT a prédios pode ser feita de duas maneiras diferentes. A primeira é aplicar uma ou algumas turbinas eólicas de grande porte para arranha-céus, conforme ilustrado na Figura 2(a). Existem três locais possíveis para turbinas eólicas de grande porte: (i) no telhado; (ii) entre dois prédios adjacentes; e (iii) dentro de uma abertura no prédio especialmente projetado para esse fim. Estas soluções já foram adotadas em edifícios em grande escala, como o World Trade Center em Bahrein e Pearl River Tower, em Guangzhou. Apesar de sua alta eficiência, foram relatadas algumas situações indesejadas, como problemas de ruído e vibração causados pelas turbinas grandes e insatisfação estética, além da necessidade de fortalecimento estrutural para resistir à força adicional das turbinas eólicas sujeitas a cargas de vento nos telhados ou entre os prédios adjacentes, ou seja, as turbinas não podem ser aplicadas diretamente em edifícios existentes sem modificação estrutural. Além disso, para direcionar o escoamento de vento de forma eficiente em uma determinada zona onde as turbinas estão instaladas, deve-se ter especial cuidado nas fases de planejamento e dimensionamento.

A segunda maneira de aplicar os sistemas BIWT em edifícios, consiste em instalar várias turbinas eólicas de pequeno porte no lugar de turbinas eólicas de grande porte. Na Figura 2(b), apresentam-se os esquemas dessa abordagem para um exemplo de aplicação em grande escala de uma estrutura real. Este tipo de sistema BIWT considera-se um método conveniente e econômico. Uma vantagem desta abordagem é que ela pode ser usada em estruturas existentes sem nenhum fortalecimento estrutural específico. No entanto, a potência de saída total deste sistema seria consideravelmente menor do que a das turbinas eólicas de grande porte, porque sua área instalável é limitada a áreas como telhados e bordas de edifícios. (PARK *et al.* 2015).

Figura 2 – Sistema de turbinas eólicas integradas em edificações: a) três possíveis locais de instalação de turbinas de grande porte; b) dois possíveis locais de instalação de turbinas de pequeno porte



Fonte: PARK *et al.*, 2015

Para determinar a posição na qual os aerogeradores apresentam a maior eficiência é necessária uma análise do escoamento em torno dos edifícios. O melhor posicionamento possível para as turbinas eólicas, define-se levando em consideração: o efeito de aceleração do vento, os menores índices de turbulência e o tipo mais adequado de turbina eólica para cada caso. A Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) é a melhor ferramenta existente atualmente para realizar uma análise desse

cenário (TOJA-SILVA *et al.*, 2018). Várias investigações foram realizadas através de simulações utilizando DFC em ambientes urbanos e análise do conforto de pedestres (BLOCKEN e CARMELIET, 2008; BLOCKEN, STATHOPOULOS e VAN BEECK, 2016; DU *et al.*, 2017), portanto, neste trabalho será empregada a DFC para avaliar os métodos de aproveitamento de energia eólica através do sistema BIWT na passagem entre prédios paralelos. Para a etapa de processamento, será utilizado o *software* livre de código aberto *OpenFOAM* (*Open Source Field Operation and Manipulation*), programa baseado nas técnicas de DFC, que é um programa desenvolvido em C++ com uma vasta biblioteca de *solvers* implementados para diversos problemas como transferência de calor, escoamentos compressíveis e incompressíveis, entre outros.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho visa, através da modelagem e simulação numérica, investigar como a variação da geometria influencia a aerodinâmica de um sistema eólico integrado em edifícios paralelos.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem como objetivos principais:

(a) estudar numericamente a aerodinâmica de um sistema eólico integrado em edifícios paralelos, através do *software* livre de código aberto *OpenFOAM*;

(b) analisar e comparar como os parâmetros geométricos das edificações e a direção do vento influenciam na topologia do escoamento e, portanto, na eficiência dos aerogeradores;

(c) avaliar e estudar como a disposição geométrica das edificações afeta o escoamento em torno das edificações e o conforto dos pedestres;

(d) analisar o escoamento de vento em torno de edifícios em ambientes urbanos, a fim de avaliar possíveis locais para a instalação de turbinas eólicas integradas.

(e) discutir e enfatizar o potencial de aerogeradores em ambientes urbanos como parte de um projeto sustentável.

## 2 TEORIA

Um corpo quando imerso em um escoamento de fluido é chamado de escoamento externo, ou seja, o fluido sem fronteiras está envolvendo o corpo. O escoamento externo configura-se com uma camada limite de crescimento livre relacionada a pequenos gradientes de velocidade e temperatura. Outra característica do escoamento externo é dada pelo fato de os efeitos viscosos estarem restringidos a algumas partes do campo de escoamento tais como a camada limites e esteiras. (ÇENGEL e CIMBALA, 2007). A grande maioria dos escoamentos externos tem soluções complexas, exigindo procedimentos experimentais e análises numéricas.

O escoamento pode ser enquadrado como permanente ou não permanente. O escoamento permanente remete a situação em que a velocidade e pressão não variam com o tempo no campo escoamento, podendo variar de um ponto para outro, mas sendo função apenas das coordenadas do ponto. No escoamento não permanente, a velocidade e a pressão variam no tempo, sendo dependentes além das coordenadas do ponto, do tempo em questão. (ÇENGEL e CIMBALA, 2007).

Os escoamentos ainda podem ser classificados como viscosos ou invíscidos (não viscosos), ou seja, quando os efeitos da viscosidade são levados em consideração ou não. O primeiro é o fluido real e o segundo é o fluido ideal. A viscosidade dos fluidos é uma propriedade que representa a resistência interna deste ao movimento e depende da temperatura e da pressão, sendo pouco influenciada por essa última no caso de líquidos. A viscosidade resulta da força de atrito interno entre as camadas dos fluidos à medida que movem uma em relação a outra. Essa propriedade é causada, nos líquidos, pelas forças coesivas das moléculas e diminuem com o aumento da temperatura. Já para os gases, as colisões entre as moléculas provocam a viscosidade, que para esse caso, aumentam com a temperatura. (ÇENGEL e CIMBALA, 2007; FOX, PRITCHARD e MACDONALD, 2010).

Os efeitos da viscosidade nos fluidos podem ser observados de maneira contundente nas proximidades do corpo em estudo. Ludwig Prandtl foi o primeiro a introduzir o conceito de camada limite em 1904. O conceito enunciado por Prandtl estabeleceu a condição teórica de arrasto em um corpo, possibilitando a utilização

das equações de Navier-Stokes para solução de escoamentos viscosos. O escoamento na camada limite está diretamente ligado ao número de Reynolds, pois este representa as interações entre as forças viscosas e inerciais. O número de Reynolds é definido por:

$$Re = \frac{U_{\infty} L}{\nu} \quad (1)$$

onde  $U_{\infty}$  é a velocidade de corrente livre,  $L$  é o comprimento característico e  $\nu$  é a viscosidade cinemática.

O número de Reynolds define outra característica importante: o regime do escoamento que pode ser laminar, de transição ou turbulento. O regime laminar ocorre quando as partículas do fluido têm uma trajetória bem definida de forma paralela, formando lâminas. O escoamento turbulento ocorre quando as partículas dos fluidos têm uma trajetória curvilínea, irregular e se misturam rapidamente enquanto se movimentam ao longo do escoamento devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades. (FOX, PRITCHARD e MACDONALD, 2010).

O escoamento também é classificado como incompressível ou compressível baseado no número de Mach. A expressão para o número de Mach é dada por:

$$M = \frac{V}{c} \quad (2)$$

onde  $V$  é a velocidade de escoamento do fluido e  $c$  é a velocidade do som no meio em que está ocorrendo o escoamento. Para  $Mach \leq 0.3$ , o escoamento pode ser considerado como incompressível, para valores acima deste limite os efeitos de compressibilidade devem ser considerados. (WHITE, 2011).

O corpo rombudo submerso no escoamento experimentará em sua superfície uma força resultante, com magnitude dependente de vários parâmetros tais como a geometria do corpo, propriedades do fluido e da velocidade do escoamento (FOX, PRITCHARD e MACDONALD, 2010). As tensões superficiais resultantes do escoamento em torno do corpo são representadas por tensões tangenciais provocadas pela ação viscosa e tensões normais provocadas pela pressão local.

Usualmente, decompõe-se a força resultante na força de arrasto com direção paralela à direção do escoamento e a força de sustentação  $F_L$  com direção

perpendicular à direção do movimento. Para análise dessas componentes, lança-se mão de coeficientes adimensionalizadas que representem as características do arrasto e sustentação. São eles o coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) e o coeficiente de sustentação ( $C_L$ ) definidos respectivamente pelas equações:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (4)$$

onde  $A$  é a área frontal de projeção do corpo sobre um plano normal à direção do escoamento e  $\frac{1}{2}\rho V^2$  é a parcela de pressão dinâmica, onde  $\rho$  é a densidade do fluido e  $V$ , a velocidade do fluido.

Dependendo da geometria do corpo e do escoamento, haverá a formação e desprendimento de vórtices, formando uma esteira à jusante do corpo. Esses vórtices têm uma determinada frequência de desprendimento, causando o fenômeno de Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV) que é mais severo quando coincide com a frequência natural do corpo. Essa frequência é representada pelo adimensional conhecido como número de Strouhal, definido pela Eq. (5):

$$St = \frac{f_s U}{D} \quad (5)$$

onde  $f_s$  é a frequência de desprendimento de vórtices,  $U$  é a velocidade relativa do escoamento e  $D$  é o comprimento característico do corpo.

Se a frequência do corpo pode ser controlada e sincronizada com a frequência de formação e desprendimento de vórtices, tem-se o fenômeno denominado *lock-in*. O regime do fluido está em *lock-in* quando o deslocamento do corpo e a frequência de desprendimento de vórtices estão em fase, diminuindo a amplitude dos coeficientes aerodinâmicos (MENECHINI e BEARMAN, 1995; ANTUNES, LYRA e WILLMERSDORF, 2005).

Outro adimensional utilizado é o coeficiente de pressão, conforme descrito por:

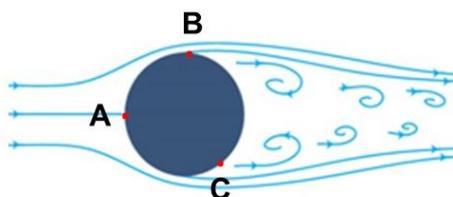
$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (6)$$

onde o coeficiente é definido pela diferença entre a pressão estática local e a pressão estática na corrente livre, dividido pela parcela da pressão dinâmica.

## 2.1 ESCOAMENTO EM TORNO DE CORPOS ROMBUDOS

O escoamento incompressível ao redor de um corpo rombudo pode ser descrito qualitativamente como apresentado na Figura 3. Um corpo submetido a um escoamento de um fluido tem variações de pressão e velocidade. Na Figura 3, estão representados pontos importantes do escoamento, A, B e C, e são apresentadas as linhas de corrente, que são linhas tangentes ao vetor velocidade em um dado instante de tempo. O ponto A deve ter uma velocidade baixa e, por consequência, a pressão nesse ponto deve ser alta. Ele é denominado de ponto de estagnação, onde literalmente o fluido repousa. Devido a existência da camada livre, o fluido adquire a velocidade nula do corpo que é aumentada até o valor de velocidade de corrente livre conforme a transição entre A e B. No ponto B a velocidade deve ser alta, logo a pressão deve ser baixa. Por fim, o ponto C é chamado de ponto de separação, onde as partículas do fluido são levadas ao repouso por conta do atrito da camada limite e da passagem de baixa pressão para alta pressão (gradiente adverso de pressão) e assim perdem contato com o corpo formando a esteira com despreendimento de vórtices. Para corpos com arestas vivas, como um cilindro quadrado, o ponto de separação do escoamento é bem definido no encontro entre suas arestas. Isso não ocorre em corpos mais suaves como o cilindro circular, que muda o ponto de separação a todo momento durante o escoamento. Por esse motivo o número de Reynolds tem mais influência num corpo mais suave.

Figura 3 – escoamento incompressível em torno de um cilindro circular

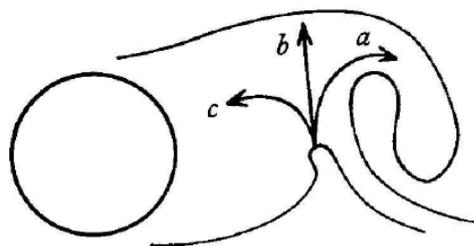


Fonte: AUTOR, 2019

Gerrard (1966) propôs que a separação do escoamento provoca a interação entre duas camadas cisalhantes, estas últimas constituindo elemento decisivo na formação de vórtices. Entende-se que cada camada cisalhante tem acoplado a si mesma um vórtice. Esse vórtice é alimentado pela camada cisalhante e em determinado momento esse crescimento é tal que ele se torna capaz de atrair a camada cisalhante oposta. Isso é possível devido à velocidade induzida pelo vórtice em desenvolvimento. A aproximação de fluido com vorticidade oposta, em concentração intensa, é o necessário para interromper a alimentação do vórtice em formação, desprendendo-o da camada cisalhante, ficando agora o vórtice formado à jusante do corpo. Esse fenômeno de geração e desprendimento de vórtices ocorre diversas vezes, formando uma região denominada de esteira de vórtices. Esses vórtices individuais têm uma intensidade menor do que as camadas (circulações geradas na separação do escoamento) que o formaram devido à mistura de regiões de fluido com vorticidades de sinais opostos.

Na Figura 4 é apresentado o mecanismo de formação e desprendimentos de vórtices e os possíveis caminhos para as partículas do fluido, sendo eles: (a) juntar-se com o vórtice formado no lado contrário da esteira; (b) mover-se para camada cisalhante oposta que tem vorticidade com sinal inverso; (c) podem voltar à região perto do corpo favorecendo a formação de vórtices na parte inferior da esteira. O balanço da quantidade de fluido que segue cada caminho desses rege a frequência de desprendimento e a intensidade dos vórtices, bem como a pressão na parte posterior do corpo (MENEHINI e BEARMAN, 1995).

Figura 4 – Mecanismo de formação e desprendimento de vórtices proposto por Gerrard (1996)



Fonte: GERRARD, 1996

## 2.2 ESCOAMENTO EM TORNO DE EDIFÍCIOS

Nos últimos anos a Engenharia do Vento Computacional (EVC), que é um ramo da Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) (STATHOPOULOS, 1997; BLOCKEN, 2014; LÖHNER *et al.*, 2015) teve um desenvolvimento acentuado. Segundo Lu e Ip (2009) a EVC estuda numericamente a ação dos ventos nas edificações, que seria um caso específico da DFC, por isso recebe uma denominação específica por alguns autores, ou seja, a modelagem do escoamento de fluido sobre as edificações para ajudar a analisar a melhor localização das turbinas eólicas com relação as edificações.

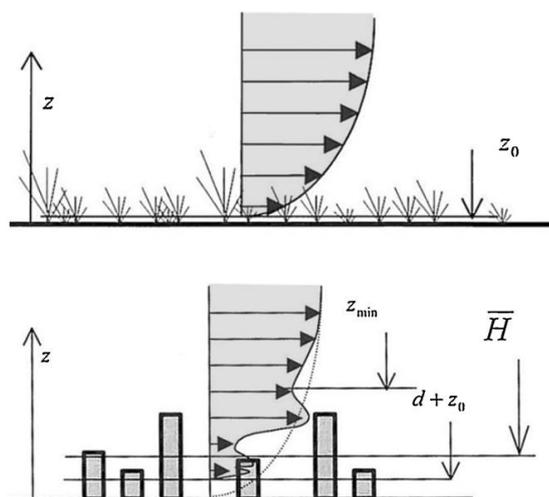
Para analisar o comportamento dos ventos em ambiente urbano é necessário atentar para algumas características da morfologia urbana. Segundo Ng *et al.* (2011), as principais características do estudo dos ventos são a sua velocidade, intensidade de turbulência e o perfil de velocidade em áreas urbanas, que são influenciadas diretamente pela rugosidade do ambiente, ou seja, os obstáculos a que o escoamento estará submetido. A avaliação meticulosa das características aerodinâmicas do vento nas áreas urbanas é, portanto, muito significativa para descrever e prever os comportamentos do vento urbano.

Oke (1976) define que a zona onde o homem executa a maioria das edificações é denominada Camada de Dossel Urbano (CDU – *Urban Canopy Layer*), zona influenciada pela rugosidade urbana (principalmente edifícios). O dossel urbano é um conceito de microescala, sendo o clima dominado pela natureza do entorno local. A Camada Limite Urbana (CLU – *Urban Boundary Layer*) está imediatamente acima da CDU. Esse é um conceito local ou de mesoescala referente à parcela da Camada Limite Planetária (região com altura típica de 1 km) cujas características são afetadas

pela presença de uma área urbana em seu limite inferior. O topo da camada limite urbana é comumente limitado por uma inversão de temperatura, dando alguma correspondência com o limite superior da poluição urbana.

Oke (2006) define o perfil de velocidade do vento em áreas urbanas como um perfil logarítmico, que é baseado em uma relação semi-empírica em função de duas características aerodinâmicas: a rugosidade do terreno ( $z_0$ ) e a altura do deslocamento do plano de referência ( $d$ ), logo a base desse perfil de velocidade se dá pela soma dessas duas grandezas ( $z_0 + d$ ), reconhecendo assim o fluxo irregular provocado pela CDU. A Figura 5 apresenta o esquema do perfil de velocidade em áreas urbanas comparado ao perfil de velocidade em áreas abertas.

Figura 5 – Comparação entre aproximação do perfil de velocidade do vento em área urbana e em ambiente urbano

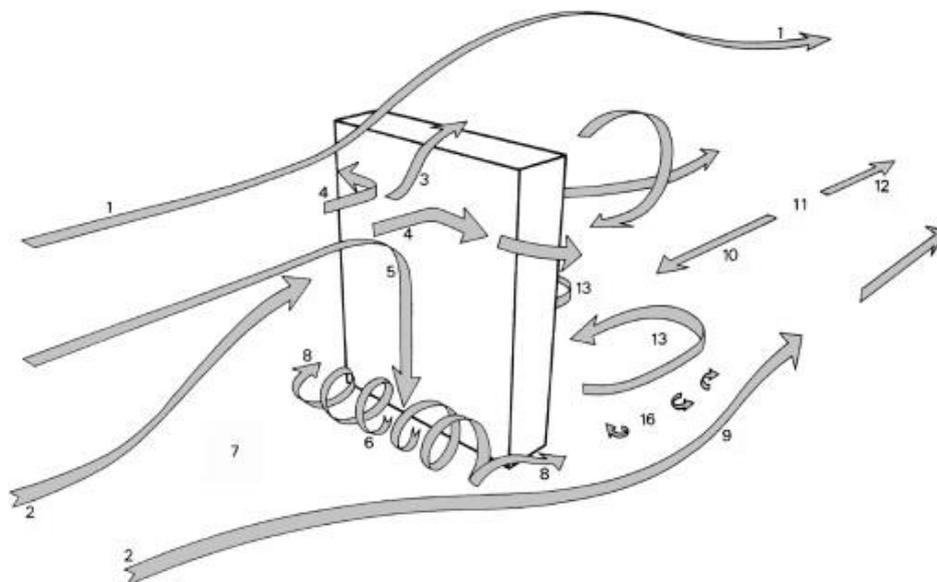


Fonte: AYHAN e SAGLAM, 2012

Para Ayhan e Saglan (2012) as condições de vento em ambientes urbanos tendem a ser muito diferentes (Figura 5). Isso mostra como os edifícios diminuem a velocidade do escoamento próximo ao solo e aumentam a intensidade da turbulência. Para os autores, na camada de rugosidade, a região do escoamento na proximidade imediata dos elementos da CDU, dependem localmente dos arranjos particulares de construção resultando em uma estrutura bastante complexa. A camada de rugosidade se estende da superfície até um nível em que a homogeneidade horizontal do fluxo é alcançada. Isso ocorre em 2 a 5 vezes a altura média do elemento do dossel, e em áreas com edifícios altos, ele pode ocupar uma posição significativa da CLU, onde a maioria dos problemas de poluição ocorrem.

A seguir, será discutido o padrão de escoamento de vento em torno de um único edifício apresentado por Blocken e Carmeliet (2004), observado que a Figura 6 fornece a ilustração esquemática da topologia do escoamento em torno de uma edificação alta. À medida que o fluxo do vento se aproxima do edifício, ele gradualmente diverge. Parte do escoamento é desviada sobre a construção (1) e parte dela flui em torno do edifício (2). A barlavento, região de pressão na direção e sentido do vento (fachada do prédio), um ponto de estagnação com pressão máxima situa-se a aproximadamente 70% da altura do prédio (DAEMEI *et al.*, 2019). A partir deste ponto, o escoamento é desviado para as zonas de menor pressão da fachada: para cima (3), lateralmente (4) e para baixo (5). Uma quantidade considerável de ar que flui para baixo produz um vórtice ao nível do solo (6) denominado vórtice de base. A direção do escoamento na proximidade do vórtice de base é oposta à direção do escoamento de aproximação o que provoca um ponto com valores baixos de velocidade do vento no solo em frente ao prédio devido a um gradiente de pressão (7). O vórtice de base se estende para as laterais do edifício, onde ocorre a separação de escoamento e induz altos valores de velocidade do vento (8). O escoamento da base se une ao escoamento lateral (9). A sotavento (região de sucção na direção e sentido do vento) do edifício, uma zona de subpressão é criada. Como resultado, ocorre a recirculação (10 e 13). Uma zona de recirculação é criada à jusante do edifício no nível do solo, onde as direções do escoamento são opostas e existem baixas velocidades do vento (11; fim da zona de circulação). Além da zona de recirculação, o escoamento retoma sua orientação, mas a velocidade do vento permanece baixa por uma distância considerável atrás do edifício (12). A recirculação também é responsável pela criação de vórtices de rotação lenta atrás do prédio (13). Entre estes e o escoamento lateral (9), uma zona com gradiente de alta velocidade (a camada de cisalhamento) que origina pequenos vórtices em rotação rápida (16). As camadas de cisalhamento se originam nos cantos do edifício, onde ocorre a separação do escoamento.

Figura 6 – Representação esquemática da topologia do escoamento em torno de edificações altas



Fonte: BERANEK e KOTEN (1979, *apud* BLOCKEN e CARMELIET, 2004)

De fato, existem dois sistemas de pressão que determinam o padrão do escoamento. O primeiro sistema de pressão atua na fachada frontal do edifício, com pressão máxima no ponto de estagnação e pressões mais baixas no restante da fachada. Este sistema de pressão é criado pelo aumento da velocidade do vento de aproximação com a altura e é responsável pela ocorrência do vórtice de base que, por sua vez, alimenta as correntes laterais. O segundo sistema de pressão consiste na zona de sobrepressão a barlavento do prédio e na zona de subpressão no lado de sotavento. Esse mecanismo é responsável pela recirculação (escoamento reverso) à jusante do edifício e também contribui para o escoamento lateral. Ambos os sistemas de pressão são responsáveis pela complexa topologia do escoamento de vento em torno de um edifício (BLOCKEN e CARMELIET, 2004).

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

A Engenharia do Vento Computacional (EVC) vem crescendo ao longo dos anos com diversos estudos sobre o escoamento em ambiente urbano, topologia do escoamento, conforto de pedestres, sistemas de aproveitamento de energia eólica integrado em edificações, entre outros. Stathopoulos (1997) já apresentava o potencial da EVC e a colocava diante de grandes desafios, confirmados por Blocken (2014) que apresentou uma visão dos avanços dos últimos 50 anos da EVC. Ele

aponta que a EVC se consolidou como uma área de pesquisa e aplicação da engenharia eólica, aumentou a gama de assuntos abordados, além de apresentar uma vasta literatura formada ao longo desse período. Baseado no objetivo principal deste trabalho, a seguir serão apresentados alguns estudos numéricos e experimentais recentes na área de análise do padrão de escoamento em torno de edificações e aproveitamento de energia eólica e a integração com edificações.

Tominaga *et al.* (2008) apresentaram um estudo numérico do escoamento em torno de um edifício isolado com razão entre as suas medidas de 1:1:2 utilizando vários modelos de turbulência revisados  $k-\varepsilon$  e Simulações de Grandes Escalas (LES) em comparação com dados numéricos e experimentais. São analisados os campos de velocidade, distribuição de energia cinética, o tamanho da recirculação na região do telhado e na região atrás do edifício, entre outras variáveis. O modelo padrão  $k-\varepsilon$  não foi capaz de reproduzir a recirculação do telhado do edifício enquanto que os modelos revisados (variações a partir do modelo padrão) conseguiram prever o escoamento nessa região, porém superestimaram a região de recirculação atrás do prédio. As simulações com LES foram realizadas em dois casos: o primeiro sem flutuações de velocidade e o segundo com as flutuações de velocidade experimentais inseridas. O primeiro caso apresentou um elevado desprendimento de vórtices, sendo os resultados obtidos, discrepantes com o experimento. O segundo caso apresentou resultados com boa concordância entre os campos de velocidade e a distribuição de energia cinética na região atrás do edifício.

Grant, Jhonstone e Kelly (2008) apresentaram uma alternativa aos modelos convencionais de turbinas eólicas: as turbinas eólicas canalizadas, que são turbinas protegidas por dutos montadas no telhado, sob a forma de um modelo integrado a edificação. Os dutos reduzem os efeitos da alta turbulência nas turbinas, além de ligar zonas de alta pressão (estagnação) a zonas de baixa pressão (separação do escoamento) às custas da sensibilidade de direção da turbina. Foram feitos modelos em escala e protótipos e utilizado um modelo matemático simples para predição de altas potências de saída. Quando comparada com turbinas convencionais a turbina eólica canalizada conseguiu capturar mais energia que as outras soluções, mesmo que apresente um fator de capacidade menor que as turbinas usuais. Logo, torna-se uma solução com grande potencial para adaptação em prédios já existentes, tendo excelentes vantagens com relação a segurança e impacto estético. É válido ressaltar

que os autores apontam uma dificuldade fundamental na exploração dos ventos urbanos: a qualidade do regime de vento.

Um estudo sobre a utilização de turbinas eólicas para micro geração em casas foi realizado na Nova Zelândia por Mithraratne (2009). As turbinas foram implantadas no topo do telhado e são avaliados parâmetros como estabilidade estrutural, controle de ruídos, energia líquida gerada, emissão de carbono e o ciclo de vida das turbinas. O autor afirma que apenas algumas localizações da Nova Zelândia são viáveis para utilização desse sistema, enquanto que na maioria dos casos a utilização de turbinas eólicas só é interessante se fizer parte de uma série de medidas para gerar energia sustentável como aquecimento solar de água e painéis fotovoltaicos. No entanto, se for considerado os componentes da turbina e sua reciclagem até o fim da vida útil, a economia líquida de energia pode chegar a 81% por kwh, assim como a redução de gases poluentes pode ser de 26% por kwh, em relação a rede convencional de energia elétrica.

Lu e Ip (2009) investigaram as condições de vento na passagem entre dois prédios e o escoamento de vento sobre o telhado das edificações. No estudo foi considerada a forma das edificações, parâmetros geométricos e a forma e a direção dos telhados através de simulações numéricas, utilizando o programa comercial FLUENT. A DFC foi utilizada para modelar o escoamento e prever as áreas com maior velocidade de vento e menor índice de turbulência, apontando o melhor lugar para o aproveitamento da energia eólica. Com os estudos foi possível concluir que a amplificação da velocidade dos ventos devido aos prédios pode variar de 1,5 a 2 vezes e um possível aproveitamento da utilização da energia eólica aumentado por um fator que varia de 3 a 8 vezes, tudo isso dependendo do efeito de concentração produzido pelo arranjo entre os prédios e o formato adequado do telhado.

Tendo em vista as dificuldades de implantação de turbinas eólicas em áreas com casas, tais como: baixas velocidades do vento, alta intensidade de turbulência e o ruído provocado pelas turbinas. Ledo, Kosasih e Cooper (2011) promoveram um estudo numérico do escoamento de vento, utilizando o programa comercial CFX, acima de áreas com alta densidade de casas, avaliando diferentes tipos de telhado, a saber, telhados planos, duas águas e piramidal, para definir o melhor local para as turbinas eólicas. Os estudos concluíram que o escoamento é fortemente influenciado pelo tipo de telhado e pela direção do vento, no entanto, dentre os três tipos de telhado em estudo, o telhado plano apresenta os melhores resultados, pois, acima das casas

a velocidade do vento sempre é incrementada e a intensidade da turbulência reduzida, além de diminuir rapidamente. Para esse tipo de telhado, independente da característica analisada a turbina poderia ser instalada em qualquer uma das três posições concebidas no estudo.

Ayhan e Saglam (2012) realizaram um estudo numérico sobre o escoamento de vento em torno de prédios e áreas residenciais rurais para avaliar o aproveitamento de energia eólica nesses ambientes, utilizando o programa FLUENT. Para ajudar a localizar as turbinas nas regiões com maior velocidade do vento e evitando a turbulência foi utilizada a DFC. Para o primeiro caso, foi encontrado que o aproveitamento da energia eólica pode ser amplificado por um fator que varia de 3 a 8 vezes, levando em consideração o efeito de concentração dos prédios e a sua altura, conforme apresentado por Lu e Ip (2009). Para o segundo caso foi modelado um pequeno bairro de casas com telhado de 2 águas a 45°. As velocidades à montante das casas foram bem menores que as encontradas nos prédios, com uma área grande e lenta de recirculação à jusante da casa.

Khayrullina, Hoff e Blocken (2013) realizaram um estudo sobre as condições do vento na passagem entre prédios adjacentes através da DFC. No trabalho, avaliaram parâmetros geométricos e o melhor aproveitamento de turbinas eólicas de modelos comerciais instaladas em algumas configurações pré-estabelecidas pelo estudo. Foi possível verificar que com a maior turbina, se consegue uma geração de 8% da demanda energética anual dos prédios com área de 110000 m<sup>2</sup>. Os estudos também apontam que arredondar as bordas dos prédios pode reduzir a velocidade dos ventos em 2.3%, no entanto a energia cinética turbulenta é reduzida em 25% à altura da turbina, favorecendo o desempenho de alguns modelos específicos de turbina.

Li *et al.* (2013) conduziram estudos experimentais a respeito dos fatores de amplificação da velocidade do vento e os efeitos do escoamento em torno de um arranha-céu projetado com aberturas onde são instaladas turbinas eólicas. O edifício em questão é o *Pearl River Tower*, localizado em Guangzhou, na China, com 310 metros de altura e conta com quatro aberturas (túneis) equipadas com quatro turbinas eólicas. O prédio faz uso desse sistema de geração de energia, além da reutilização do ar que sai das turbinas para refrigeração do ambiente, dispensando o uso de ar-condicionado, bem como a utilização de energia solar e células fotovoltaicas. Os autores conduziram experimentos em túnel de vento e os estudos apontam que a localização do prédio favorece a geração de energia eólica, a razão de aberturas dos

tuneis com seções internas contraídas influenciam na amplificação da velocidade do vento e diminuem as cargas de vento sobre a estrutura. As edificações vizinhas também apresentam impactos significantes na velocidade e nas cargas do vento aplicadas sobre a estrutura.

Bianchi *et al.* (2014) analisaram o efeito do ângulo de incidência do escoamento sobre o desempenho de um aerogerador de eixo horizontal utilizando um código numérico baseado na teoria BEM (*blade element momentum*). O código confirmou que o coeficiente de potência dessa tipologia de rotores em escoamento desalinhado é reduzido em função do cosseno do ângulo de inclinação. A partir desses resultados, foram feitas simulações no programa *OpenFOAM*, através da modelagem RANS, para casos específicos de edifícios que representavam algumas instalações adequadas em uma cidade europeia convencional. Foi observado que um aerogerador em ambiente urbano constitui uma boa solução, porém apenas nas configurações específicas estudadas. Portanto, deve-se maximizar a aceleração, que pode ser obtida no telhado de edifícios muito altos em condições específicas, e ângulos de inclinação moderados, a fim de reduzir o prejuízo induzido no desempenho aerodinâmico dos aerogeradores.

Park *et al.* (2015) propuseram um sistema inovador de aerogeradores integrados a edificações que explora a pressão do vento na fachada de um edifício. O sistema é composto por módulos que contém uma palheta guia que efetivamente direciona o vento que entra e aumenta sua velocidade e um aerogerador de eixo vertical distribuídos ao longo da fachada do prédio. A palheta oculta o aerogerador, não alterando a estética da fachada e o tipo de turbina escolhida favorece baixos níveis de ruído, outro problema comum na geração de energia eólica em ambientes urbanos. Para obter o sistema mais adequado, foi realizada uma série de análises de DFC (modelagem RANS) afim de determinar as dimensões ótimas dos módulos. A avaliação de desempenho da configuração obtida foi realizada através de experimentos em túnel de vento. Finalmente, a energia produzida pelo sistema foi comparada com o consumo de energia de um edifício residencial. Foi previsto que o sistema proposto fornece cerca de 6,3% da eletricidade necessária à edificação.

Toja-Silva *et al.* (2015a) analisaram o escoamento em torno de um prédio isolado estudando o potencial eólico na região do telhado com diferentes modelos RANS utilizando o programa *OpenFOAM* e comparando os resultados obtidos com dados experimentais realizados em ensaios de túnel de vento. Foram sugeridas algumas posições para turbinas eólicas baseadas na intensidade da turbulência, limitada a um

valor menor que 0.15 para turbinas do tipo *HAWT* devido as cargas de fadiga. Baseado nesse critério, a melhor localização da turbina foi de  $z/H=0.19$  e  $z/H=0.31$  à montante e à jusante da região do telhado respectivamente, sendo  $H$  a altura do prédio. Turbinas do tipo *VAWT* são recomendadas abaixo dessas alturas. Também foi considerada a instalação de uma *VAWT* na posição horizontal entre a região central e à montante do telhado para aproveitar ao máximo a região de recirculação do escoamento. Além disso, foi sugerido a utilização de uma turbina canalizada na região lateral à montante do telhado para aproveitar a diferença de pressão existente nessa região. Outros estudos foram conduzidos para uma incidência do vento a  $45^\circ$ , apontando a melhor localização da *HAWT* acima de  $z/H=0.14$  e  $z/H=0.27$  à montante e à jusante da região do telhado respectivamente. Os autores apontam que, apesar do resultado obtido representar um único prédio, como o perfil de velocidade é altamente turbulento, os resultados obtidos podem ser aplicados a um edifício cercado por edifícios menores.

Chaudhry, Calautit e Hughes (2016) estudaram numericamente através do programa FLUENT (modelagem RANS), um arranha-céu de arquitetura dinâmica com 78 andares e 420 m de altura. Esse prédio está programado para ser construído em Dubai e cada andar poderá rotacionar  $360^\circ$  em torno de um eixo central fixo. Os autores sugeriram o estudo das alterações no padrão de escoamento sofridas a partir de espaçamentos entre os andares do prédio. O espaçamento entre os andares variou entre 0.8 m e 1.6 m e esses seriam possíveis locais para a instalação de aerogeradores. No espaçamento de 1.6 m, foi verificado uma amplificação de 27% na velocidade do vento e entre 0.8 m e 1.6 m, a energia cinética turbulenta diminuiu 53%. Concluiu-se que a morfologia vertical e a aerodinâmica de um edifício desempenharam um papel fundamental na distribuição de vento ao longo da fachada do edifício. Os autores apontam também que os dados obtidos podem ser utilizados para projetos de aerogeradores integrados a edificações.

Elmokaden, Megahed e Noaman (2016) desenvolveram uma ferramenta que auxilia na integração eficiente de tecnologias de vento em novas edificações: *WT Efficient Integration Program*. O programa realiza a escolha adequada de um BIWT baseado em quatro etapas: adequação do local, determinação dos métodos de integração, determinação das turbinas e comparação entre a produção de energia e o consumo. O programa foi aplicado em um projeto de um novo edifício em Ras

Gharib, Egito, resultando na aplicação de 18 turbinas do tipo VAWT integradas ao telhado da edificação que podem gerar 84,5% da produção anual de energia.

Glumac, Hemida e Hoffer (2018) realizaram um estudo experimental sobre o aproveitamento de energia eólica em um prédio alto de seção transversal quadrada e razão altura/largura 1:3, cercado por quatro edificações de mesma geometria, avaliando: campo de velocidade do vento, intensidade da turbulência, direção do vento, influência do telhado plano e das edificações vizinhas no padrão de escoamento. Os estudos mostram que as edificações à montante têm muita influência sobre as características do vento acima da edificação estudada e que a direção do vento mais favorável para o aproveitamento de energia eólica é a 45° da edificação principal. Os autores ainda ressaltam a criação de um banco de dados experimentais de vento urbano que poderá ser utilizado para validação de estudos numéricos.

Mittal, Sharma e Gairola (2019) estudaram as condições de vento a nível de pedestre analisando alguns casos com edifícios modificados nas bordas utilizando o programa FLUENT. Foram analisados os casos do edifício padrão (seção transversal quadrada), com bordas recortadas, bordas curvas e bordas chanfradas, três ângulos de orientação da edificação, sendo eles 0°, 22.5° e 45° e dois modelos de turbulência:  $k - \varepsilon$  modificado e *Realizable*  $k - \varepsilon$ . No estudo foi acrescentado o fator de amplificação  $K$ , que define a razão entre as velocidades médias do vento a 2 metros de altura com a presença da edificação e sem nenhuma edificação. O valor  $K=0,4$  é a referência definido pelo autor para um conforto térmico desejado e  $K=1,1$  é a referência para velocidade média do vento acima de 5 m/s. Com esse fator foram estabelecidos três intervalos que definem as condições de vento:  $K < 0,4$  representa condições ótimas,  $0,4 < K < 1,1$  representa condições aceitáveis e  $K > 1,1$  representa condições inaceitáveis, com altas velocidades do vento. Foi observado que o modelo  $k - \varepsilon$  modificado teve melhores resultados em zonas de baixa velocidade, enquanto que o modelo *Realizable*  $k - \varepsilon$  apresentou excelente resultado em comparação com os dados experimentais para altas velocidades. A região de esteira para o caso com bordas circulares diminui cerca de 32% em comparação com o prédio padrão a 0°. As regiões em condições inaceitáveis diminuíram para os modelos com bordas, já as regiões em condições aceitáveis e condições ótimas aumentaram.

## 4 MODELAGEM NUMÉRICA

O uso de tecnologias de simulação computacional em engenharia e nas ciências exatas tem crescido de forma significativa nas últimas décadas. Em particular, a evolução dos computadores tem sido responsável por esse crescimento acentuado. O aumento da capacidade computacional e a melhoria da modelagem física do problema pelos códigos computacionais, bem como os custos elevados de laboratórios experimentais, tornam os modelos numéricos cada vez mais presentes na solução dos problemas de engenharia. A possibilidade dos Métodos Numéricos de simular situações complexas, identificando a influência de cada variável sobre o fenômeno físico envolvido, a busca pela otimização do projeto e a rapidez de resposta da solução, são outros fatores que justificam o uso da simulação numérica para o tratamento destes problemas.

Tendo em vista a alta complexidade e variabilidade dos escoamentos, se faz necessário recorrer a Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) que utiliza métodos numéricos para resolução das equações diferenciais que governam os fenômenos físicos atrelados a eles. Dessa maneira, diversos algoritmos são elaborados e otimizados para que a partir de uma discretização, seja possível resolver as equações e obter resultados das principais variáveis envolvidas no problema. A seguir, são apresentadas as equações que regem os fenômenos estudados e a modelagem numérica utilizada.

### 4.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES

As equações de conservação de massa e de quantidade de movimento são as equações mais gerais para a descrição de um escoamento incompressível em um meio contínuo, tridimensional, isotérmico, turbulento e em regime transiente. As equações são descritas a seguir (WILCOX, 2006):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} \quad (8)$$

onde  $i, j = 1, 2, 3$ , os vetores  $u_i$  e  $x_i$ , são a velocidade e a posição,  $t$  é o tempo,  $p$  é a pressão,  $\rho$  é a densidade e  $\sigma_{ij}$  é o tensor de tensões viscosas, definido por:

$$\sigma_{ij} = 2\mu s_{ij} \quad (9)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade molecular e  $s_{ij}$  é o tensor taxa de deformação:

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

O termo convectivo da Eq. (8) é reescrito na forma conservativa e a Eq. (7) é utilizada para suprimir o termo  $u_i \partial u_i / \partial x_j$ , tendo como resultado a Eq. (11).

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) - u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) \quad (11)$$

Combinando a Eq. (8) com a Eq. (11), obtêm-se a equação de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, conforme:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu s_{ji}) \quad (12)$$

A seguir serão descritas as características da turbulência para melhor entendimento de sua modelagem.

## 4.2 CARACTERÍSTICAS DA TURBULÊNCIA

Do ponto de vista prático da engenharia, a grande maioria dos escoamentos são turbulentos. Sejam processos de combustão, transporte de óleo e gás, homogeneização de misturas até o escoamento de águas em cursos naturais ou canais, o escoamento em torno de aviões, submarinos e edifícios, entre outros. O

estudo da turbulência envolve a engenharia e ciências correlatas e possui uma gama de aplicações. Ao contrário do que se pode pensar, o escoamento laminar não é regra, e sim uma exceção. Para que as camadas do fluido permaneçam sem transferência de massa o escoamento deve ter pequenas dimensões e alta viscosidade. A turbulência pode ser discutida através de suas propriedades, pois não existe uma definição precisa para esse fenômeno (TENNEKES e LUMLEY, 1972).

Como características do escoamento turbulento, Wilcox (2006) apresenta os seguintes pontos:

- Instabilidade e não-linearidade: A análise de soluções para a equação de Navier-Stokes, se desenvolve como uma instabilidade do escoamento laminar. Para um fluido real (viscoso), matematicamente falando, as instabilidades resultam principalmente da interação entre os termos inerciais não-lineares da equação de Navier-Stokes e termos viscosos. A interação é muito complexa porque é rotacional, totalmente tridimensional e depende do tempo. Como uma visão geral, a não-linearidade da equação de Navier-Stokes leva a interações entre flutuações de diferentes comprimentos de onda e direções. Os comprimentos de onda do movimento geralmente se estendem desde um máximo comparável à largura do escoamento até um mínimo fixado pela dissipação viscosa de energia. O principal processo físico que propaga o movimento em uma ampla faixa de comprimentos de onda é estiramento de vórtice.
- Aspectos estatísticos: Devido à natureza do escoamento turbulento, ou seja, as flutuações aleatórias, é necessário o tratamento estatístico para analisar esse comportamento. Do ponto de vista prático de engenharia não existe um problema com relação a esse tratamento, no entanto, após o processo de média temporal nas equações do movimento, aparecem termos que *a priori*, não podem ser determinados.
- Turbulência é um fenômeno contínuo: A princípio, sabe-se que a continuidade tridimensional, a dependência do tempo e as equações de Navier-Stokes contêm toda a física de um dado escoamento turbulento. Essa afirmação decorre do fato de que a turbulência é um fenômeno contínuo, ou seja, mesmo que existam várias escalas envolvidas em um escoamento turbulento, as menores escalas ainda são muito maiores do que qualquer escala de comprimento molecular. No entanto, as menores

escalas de turbulência ainda são extremamente pequenas. Em geral, são muitas ordens de grandeza menores que as maiores escalas de turbulência, sendo estas últimas da mesma ordem de grandeza que a dimensão do objeto sobre o qual o fluido está escoando. Além disso, a proporção da menor para a maior escala diminui rapidamente à medida que o número de Reynolds aumenta. Para realizar uma simulação numérica precisa (solução tridimensional totalmente dependente do tempo) de um escoamento turbulento, todas as escalas fisicamente relevantes devem ser resolvidas. Segundo Souza *et al.* (2011), os vórtices mais energéticos do escoamento, são aqueles que mais contribuem para a transferência de massa, energia e momento, isso do ponto de vista estatístico. Não sendo possível simular todas as escalas envolvidas no escoamento, os menores vórtices (escalas) são inseridos ao modelo numérico após serem parametrizados pelos modelos de turbulência.

- Estiramento de vórtices: A natureza fortemente rotacional da turbulência anda de mãos dadas com a sua tridimensionalidade. A vorticidade em um escoamento turbulento é em si tridimensional, de modo que as linhas de vórtice no escoamento não são paralelas. O estiramento vigoroso resultante das linhas de vórtice mantém a vorticidade flutuante sempre presente em um escoamento turbulento. O estiramento do vórtice está ausente nos escoamentos bidimensionais, de modo que a turbulência deve ser tridimensional. Esta tridimensionalidade inerente significa que não há aproximações bidimensionais satisfatórias para determinar detalhes de escoamentos turbulentos.
- Escalas de turbulência e efeito cascata: A turbulência consiste num espectro contínuo de escalas que variam do maior ao menor. Essas escalas podem ser tratadas em termos de vórtices ou comprimento de onda. Observa-se que os vórtices se sobrepõem no espaço, onde os grandes transportam os menores. Havendo vórtices de diferentes tamanhos contribuindo com energia total turbulenta, os maiores vórtices retiram energia do escoamento e transferem para os vórtices menores a medida que a turbulência decai. Estes últimos transferem para outros vórtices ainda menores e esse processo continua até chegar numa escala de comprimento em que a energia é dissipada em forma de calor pelas

tensões viscosas, estabelecendo o equilíbrio e constituindo o efeito denominado cascata. Observa-se que, como qualquer escoamento viscoso, o escoamento turbulento é dissipativo.

- **Grandes vórtices e mistura turbulenta:** Uma característica notável dos escoamentos turbulentos é a maneira como os grandes vórtices migram através do escoamento, levando consigo perturbação de pequena escala. A chegada desses grandes vórtices entre regiões turbulentas e o fluido não turbulento distorce de uma maneira altamente convoluta essa interface. Além desse comportamento, esses vórtices podem persistir por até 30 vezes a largura do escoamento. Pode-se observar que o escoamento turbulento em uma determinada posição depende das características à montante e não pode ser especificado exclusivamente em termos do tensor de taxa de deformação local como no escoamento laminar.
- **Difusividade turbulenta:** Provavelmente a característica mais importante da turbulência do ponto de vista da engenharia seja sua difusividade. A difusão turbulenta aumenta muito a transferência de massa, momento e energia. As tensões aparentes nos escoamentos turbulentos são frequentemente várias ordens de magnitude maiores do que nos escoamentos laminares correspondentes. Em suma, a turbulência é dominada pelos grandes vórtices. Os grandes vórtices são os principais responsáveis pela maior difusividade e tensões observadas nos escoamentos turbulentos. Como os grandes vórtices persistem por longas distâncias, a difusividade e as tensões dependem do histórico do escoamento e não podem necessariamente ser expressas como funções de propriedades do escoamento local. Além disso, enquanto os pequenos vórtices dissipam a energia da turbulência através da ação viscosa, a taxa na qual eles se dissipam é controlada pela taxa na qual eles recebem energia dos maiores vórtices.

### 4.3 MODELAGEM DA TURBULÊNCIA

Para tratar a complexidade de um escoamento turbulento é necessário a utilização de modelos que facilitem a resolução das equações governantes do escoamento. Tais modelos levam em consideração a resolução numérica das diversas faixas de escalas de comprimento de vórtices e de tempo presentes no escoamento e posteriormente calculam as propriedades de interesse.

Os modelos de turbulência podem ser inicialmente divididos em quatro grupos (WILCOX, 2006; VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007):

- Simulação Numérica das Equações de Navier-Stokes com Médias de Reynolds (RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*), é a técnica que investiga o comportamento médio do escoamento e os efeitos da turbulência nas propriedades médias das equações de Navier-Stokes e da continuidade. A aplicação de um conjunto de médias leva a geração de termos adicionais devido a interação das flutuações turbulentas. Um desses termos é o tensor das tensões de Reynolds que é o ponto crítico dessa modelagem e que pode ser modelado de diversas formas. (LYSENKO, ERTESVAG e RIAN, 2013; TOJA-SILVA *et al.*, 2015a; TEMEL, BRICTEUX e BEECK, 2018).
- Simulação de Grandes Escalas (LES – *Large Eddy Simulation*) nesta técnica aplica-se um filtro nas equações de Navier-Stokes, onde os turbilhões que contém energia (grande escala) são calculados diretamente e modela-se as pequenas escalas. Computacionalmente é mais custosa que a simulação RANS. (UCHIDA e OHYA, 2008; WASALA *et al.*, 2015; SEDAGHATIZADEH *et al.*, 2018)
- Simulação através de técnicas de modelagem híbrida da turbulência. Por exemplo, a técnica de simulação DES (*Detached Eddy Simulation*) é uma técnica híbrida entre as modelagens RANS e LES, onde fora da região da camada limite emprega-se o modelo RANS, e dentro dela, a Simulação de Grandes Escalas (LES). (GHASEMIAN e NEJAT, 2015; THÉ e YU, 2017; DADIOTI e REES, 2017).
- Simulação Numérica Direta (DNS – *Direct Numerical Simulation*) é a técnica mais natural para resolver escoamentos turbulentos, sem introduzir

aproximações e apenas erros numéricos. As equações de Navier-Stokes são discretizadas diretamente e resolvidas numericamente com a utilização de uma malha muito refinada e passos de tempo muito pequenos para captura toda a gama de escalas turbulentas. O método é computacionalmente muito custoso, portanto, não se emprega para fins práticos de engenharia. (SANDBERG *et al.*, 2009; KITSIOS *et al.*, 2016; DUCOIN, SHADLOO e ROY, 2017)

Excetuando a técnica DNS, as demais fazem uma decomposição das equações governantes em um campo médio ou filtrado e um campo de flutuações. Essa decomposição gera o aparecimento de mais variáveis que equações, originando o chamado problema de fechamento da turbulência. Logo, surgem os diversos modelos de turbulência para resolver esse problema.

#### 4.3.1 Decomposição de Reynolds e o problema de fechamento

No escoamento turbulento, os valores das variáveis flutuam em torno dos seus valores médios respectivos. Reynolds, em 1895, sugeriu a decomposição do escoamento instantâneo em dois valores: um valor médio (grande escala) e um valor flutuante (pequena escala), que é apresentado de uma maneira geral através de:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (13)$$

onde  $\phi$  representa o valor instantâneo da variável,  $\bar{\phi}$  representa o valor médio e  $\phi'$  representa as flutuações da referida variável. Essa decomposição geralmente é utilizada, pois se tem interesse nas quantidades médias do escoamento, além disso, quando se resolve numericamente as equações de Navier-Stokes, seria necessário uma malha refinada para captura de todas as escalas turbulentas e também exigiria passos de tempo muito pequenos (TANNEHILL, ANDERSON e PLETCHER, 1997; SOUZA *et al.*, 2011).

Inserindo a Eq. (13) nas Eq. (7) e Eq. (12), após o processo de cálculo da média, obtêm-se as equações médias de Reynolds na forma conservativa, apresentadas pelo sistema:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (14)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j U_i + \overline{u_j u_i}) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji}) \quad (15)$$

onde os valores médios substituem os valores instantâneos, motivo pelo qual as variáveis estão em letras maiúsculas. Além dessa substituição, a única diferença entre a equação média e instantânea da equação do momento é o termo  $\overline{u_j u_i}$ , que é uma taxa média de transferência de momento devido à turbulência. O problema fundamental da turbulência reside em definir uma maneira de modelar a taxa média de transferência de momento para computar as propriedades médias do escoamento turbulento.

A Eq. (15) pode ser escrita em sua forma convencional usando a Eq. (11) no sentido inverso, obtendo como resultado a Eq. (16) que é conhecida como as equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS – *Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation*).

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji} - \rho \overline{u_j u_i}) \quad (16)$$

O termo  $-\rho \overline{u_j u_i}$  é conhecido com tensor das tensões de Reynolds e representa correlações entre as flutuações da velocidade. O tensor pode ser escrito como  $\rho \tau_{ij}$ , onde  $\tau_{ij}$  representa o tensor específico das tensões de Reynolds e é definido conforme:

$$\tau_{ij} = -\overline{u_i u_j} \quad (17)$$

Como o tensor é simétrico, introduz-se no sistema seis novos valores, que somando-se aos valores da pressão e das três componentes da velocidade, formam um sistema com dez incógnitas, quantidade superior ao número de equações disponíveis para resolução do problema, que são quatro: a equação da continuidade e os três componentes das equações de Navier–Stokes. Dessa forma, constitui-se o

clássico problema de fechamento da turbulência. Para solucionar esse problema é necessário a inserção de equações ao problema através dos modelos de turbulência.

Em 1877, Boussinesq em analogia a Lei da viscosidade de Newton, estabeleceu uma relação entre as tensões turbulentas e os gradientes de velocidade média do escoamento de acordo com a equação:

$$\tau_{ij} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}k\delta_{ij} \quad (18)$$

onde  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta,  $\delta_{ij}$  é o delta de Kronecker e  $k$  representa a energia cinética turbulenta, conforme:

$$k = \frac{1}{2}\overline{u_i u_i} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (19)$$

Analisando a Eq. (18) é válido fazer duas observações. A primeira diz respeito ao fato de que a viscosidade turbulenta, diferentemente da viscosidade molecular, não é uma propriedade do fluido e sim do escoamento, ou seja, depende fortemente do estado de turbulência, podendo variar significativamente de um ponto a outro do escoamento. A segunda observação ressalta que, para cada componente do tensor específico de Reynolds foi introduzida a mesma viscosidade turbulenta, que obviamente representa uma simplificação, pois o escoamento apresenta comportamento anisotrópico. Apesar da fragilidade do conceito físico da viscosidade turbulenta, esse conceito tem sido aplicado de forma recorrente e ainda é base para a maioria dos modelos utilizados. (POPE, 2000; SOUZA *et al.*, 2011)

A hipótese de Boussinesq simplifica o problema de fechamento, pois, ao invés de inserir novas equações para solucionar o tensor de Reynolds, é necessário apenas inserir uma equação para a viscosidade turbulenta. Observando o critério da introdução da viscosidade turbulenta nas equações de Navier-Stokes, Wilcox (2006) apresenta quatro categorias de modelos de turbulência, a saber:

1. Modelos Algébricos ou de Ordem-Zero
2. Modelos de Uma equação
3. Modelos de Duas equações
4. Equações de transporte do Tensor de Reynolds

Os modelos algébricos ou de ordem-zero são os que utilizam apenas a aproximação de Boussinesq para calcular o tensor de Reynolds. Os modelos de uma equação introduzem uma equação (geralmente a equação da energia cinética turbulenta). Apesar desses modelos serem menos utilizados, o modelo Spalart-Allmaras (SPALART e ALLMARAS, 1992) apresenta os resultados mais precisos para aplicações práticas de escoamentos turbulentos em corpos aerodinâmicos. Os modelos de duas equações acrescentam, obviamente, duas equações além da aproximação de Boussinesq, que é a equação da energia cinética e outra equação que geralmente é a taxa de dissipação específica de energia cinética turbulenta  $\omega$  ou a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta por unidade de massa  $\varepsilon$ . As equações de transporte do tensor de Reynolds não utilizam o conceito de viscosidade turbulenta e resolvem as componentes individuais do tensor diretamente.

A seguir serão apresentados brevemente os modelos utilizados neste trabalho.

#### 4.3.2 Modelo $k - \varepsilon$ padrão

O modelo  $k - \varepsilon$  padrão foi desenvolvido por Launder e Spalding (1974). A viscosidade turbulenta é obtida a partir da equação:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (20)$$

onde  $C_\mu$  é uma constante do modelo e  $\varepsilon$  é a taxa de dissipação de energia cinética por unidade de massa. O modelo conta com duas equações de transporte. A primeira é a equação da energia cinética turbulenta  $k$  descrita pela equação:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (21)$$

onde o primeiro termo é o termo transiente, o segundo é o termo convectivo. O terceiro é o termo de transporte difusivo. O quarto termo  $P_k$  é o termo de produção de energia cinética turbulenta e o quinto é o termo de dissipação de energia cinética. O termo de produção é determinado conforme:

$$P_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (22)$$

De acordo com Marzouk e Huckaby (2010), o termo de produção de energia cinética é definido conforme a equação:

$$P_k = G - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \quad (23)$$

onde  $G$  é definido por:

$$G = 2\mu_t \left( S_{ij} S_{ij} - \frac{1}{3} \left[ \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right]^2 \right) \quad (24)$$

A segunda equação de transporte do modelo é a dissipação de energia cinética turbulenta  $\varepsilon$ , definida conforme:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) - \left( \frac{2}{3} C_{\varepsilon 1} + C_{\varepsilon 3} \right) \rho \varepsilon \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \quad (25)$$

onde o primeiro termo é o termo transiente, o segundo é o termo convectivo. O terceiro é o termo de transporte difusivo. Os termos associados as constantes  $C_{\varepsilon 1}$  e  $C_{\varepsilon 2}$  representam os termos de produção e destruição de  $\varepsilon$  respectivamente. O termo associado à constante  $C_{\varepsilon 3}$  não está presente na formulação padrão e foi proposto por El Tahry (1983) para escoamentos compressíveis. As constantes do modelo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Constantes do modelo  $k - \varepsilon$

$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$
0,09	1,0	1,3	1,44	1,92	0

Fonte: LAUNDER e SPALDING, 1974

O modelo  $k - \varepsilon$  padrão é amplamente utilizado para diversos tipos de escoamento práticos da engenharia com seu desempenho bem conhecido. Tem um baixo custo computacional, é robusto, de fácil entendimento e utilização, mas

apresenta um desempenho ruim em escoamentos com gradientes adversos de pressão se tornando impreciso na captura da separação do escoamento. Geralmente, superestima a produção de energia cinética turbulenta (GUIMET e LAURENCE, 2002; WILCOX, 2006). A maior fonte de erros vem da equação  $\varepsilon$  conforme aponta Bradshaw, Launder e Lumley (1996). Para resolver essa questão, algumas soluções são sugeridas, como substituir a equação da dissipação de energia cinética por outra equação de transporte ( $\omega$ , por exemplo), ou ainda modificar a equação da dissipação de energia, conforme apresentado no próximo item.

#### 4.3.3 Modelo RNG $k - \varepsilon$

O modelo RNG (*Re-Normalisation Group*)  $k - \varepsilon$  é derivado do modelo padrão  $k - \varepsilon$  e foi desenvolvido por Yakhot *et al.* (1992) através de técnicas de renormalização. O modelo apresenta as mesmas equações do modelo padrão, diferindo deste pelos diferentes valores das constantes e a substituição da constante  $C_{\varepsilon 1}$  por outra constante  $C_{\varepsilon 1}^*$  definida por uma função auxiliar apresentada na equação:

$$C_{\varepsilon 1}^* = C_{\varepsilon 1} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3} \quad (26)$$

onde  $\eta$  é um parâmetro de expansão definido conforme:

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (27)$$

As constantes do modelo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Constantes do modelo RNG  $k - \varepsilon$

$C_{\mu}$	$\sigma_k$	$\sigma_{\varepsilon}$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\eta_0$	$\beta$
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92	-0.33	4.38	0.012

Fonte: YAKHOT *et al.*, 1992

A introdução do novo termo torna o modelo RNG mais acurado que o modelo padrão e, de acordo com Argyropoulos e Markatos (2015), o modelo RNG consegue capturar eficientemente o comprimento da recirculação e a separação do escoamento.

#### 4.3.4 Modelo $k - \omega$ SST

O modelo  $k - \omega$  SST (*Shear Stress Transport*) foi desenvolvido por Menter, Kuntz e Langtry (2003). O modelo apresenta as equações da energia cinética turbulenta  $k$  com a dissipação específica de energia cinética turbulenta  $\omega$ . A primeira é definida pela equação:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\alpha_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tilde{P}_k - \beta^* \rho \omega k \quad (28)$$

onde o primeiro termo é o termo transiente e o segundo é o termo convectivo. O terceiro é o termo de transporte difusivo. O quarto termo  $\tilde{P}_k$  é o termo de produção de energia cinética turbulenta e o quinto termo representa a dissipação de energia cinética influenciado pelo valor da constante  $\beta^*$ .

A equação da dissipação específica de energia cinética turbulenta  $\omega$  é definida conforme:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\alpha_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + P_\omega - \beta \rho \omega^2 + 2\rho(1 - F_1) \frac{1}{\omega} \frac{1}{\alpha_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (29)$$

onde  $F_1$  representa uma função limitante, as definições dos termos são os mesmos supracitados relacionados a  $\omega$ , com exceção do último termo que apresenta a difusão cruzada que surge devido a transformação de  $\varepsilon$  em  $\omega$ . A produção de  $\omega$  é dada por  $P_\omega$ , que é definida por:

$$P_\omega = \gamma \left[ 2\rho S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \delta_{ij} \right] \quad (30)$$

onde  $\gamma$  é uma constante do modelo.

Para evitar o aumento da turbulência nas regiões de estagnação, a produção de energia cinética  $\tilde{P}_k$  é dada pela função limitante conforme:

$$\tilde{P}_k = \min(P_k, c_1 \beta^* \rho k \omega) \quad (31)$$

onde  $c_1$  é uma constante do modelo.

Para aprimorar o desempenho da modelagem em escoamentos com gradientes adversos de pressão e regiões de esteira, a viscosidade turbulenta é definida conforme:

$$\frac{\mu_t}{\rho} = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, b_1 \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} F_2 F_3)} = \nu_t \quad (32)$$

onde  $a_1$  e  $b_1$  são constantes do modelo,  $\nu_t$  é a viscosidade cinética turbulenta,  $F_2$  e  $F_3$  são outras funções limitantes, sendo que esta última é um aprimoramento desenvolvido por Hellsten (1998) e incorporado ao modelo SST.

O modelo  $k-\omega$  SST representa a combinação entre o modelo  $k-\omega$  desenvolvido por Wilcox e o modelo  $k-\varepsilon$  padrão. O primeiro é utilizado nas proximidades da parede do corpo diretamente na camada limite através da sub-camada viscosa, portanto o modelo  $k-\omega$  SST pode ser utilizado como modelo *Low-Reynolds* sem funções extras de amortecimento. O segundo é utilizado quando o escoamento é totalmente turbulento e evita a sensibilidade do modelo de Wilcox as condições de entrada turbulentas (OUAHABI *et al.*, 2017). As constantes do modelo são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Constantes do modelo  $k-\omega$  SST

$\alpha_{k1}$	$\alpha_{k2}$	$\alpha_{\omega1}$	$\alpha_{\omega2}$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta^*$	$a_1$	$b_1$	$c_1$
0.85	1.0	0.5	0.856	5/9	0.44	0.075	0.0828	0.09	0.31	1.0	10.0

Fonte: AUTOR, 2019

As constantes do modelo são definidas através da relação:

$$\varphi = \varphi_1 F_1 + \varphi_2 (1 - F_1) \quad (33)$$

onde  $\varphi$  representa genericamente as constantes existentes no modelo e o subscrito 1 ( $\varphi_1$ ) representa a utilização do modelo  $k-\omega$  enquanto que o subscrito 2 ( $\varphi_2$ ) está associado a utilização o modelo  $k-\varepsilon$  padrão.

#### 4.3.5 Low Reynolds $k - \varepsilon$ Launder e Sharma

As equações de modelos para altos valores do número de Reynolds não são aplicáveis a regiões do escoamento quando o número de Reynolds é baixo, como regiões próximas à parede nas quais os efeitos viscosos são importantes. Em situações em que gradientes de pressão adversos são muito fortes, há separação de escoamento e movimento secundário, logo, as equações de conservação devem ser resolvidas até a parede e envolve a região onde as tensões viscosas são extremamente importantes. Quaisquer modificações no modelo  $k - \varepsilon$  padrão precisam levar em conta os efeitos de amortecimento próximo as paredes. Dessa forma, nos modelos  $k - \varepsilon$  do tipo *Low-Re*, os coeficientes do modelo padrão são multiplicados por funções de amortecimento de parede e inclui-se um termo adicional que modifica a fonte de  $\varepsilon$  na região próxima à parede (IGCI e ARICI, 2016). Os diferentes tipos de modelo *Low-Re* variam uma função das diferentes funções de amortecimento utilizadas. O modelo apresentado neste trabalho foi desenvolvido por Launder e Sharma (1974). A seguir, são apresentadas as equações da viscosidade turbulenta, da energia cinética turbulenta e da dissipação de energia conforme:

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (34)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon - \rho D \quad (35)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} f_1 P_k - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \varepsilon) + \rho E \quad (36)$$

onde  $f_\mu$ ,  $f_1$  e  $f_2$  são funções de amortecimento e  $D$  e  $E$  são termos extras de fonte. Estas funções, termos de fonte e constantes do modelo são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 – Constantes do modelo *Low-Reynolds* Launder e Sharma  $k - \varepsilon$ 

$D$	$E$	$f_\mu$	$f_1$	$f_2$	$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
$2\nu \left( \frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2$	$2\mu\nu_t \left( \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right)$	$e^{\left[ \frac{-3.4}{1+(R_t/50)^2} \right]}$	1.0	$1 - 0.3e^{(-R_t^2)}$	0.09	1.0	1.3	1.44	1.92

Fonte: ADAPTADO DE IGCI E ARACI, 2016

onde  $R_t$  representa o número de Reynolds turbulento e é definido pela equação:

$$R_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} \quad (37)$$

Outros detalhes sobre as formulações dos modelos *Low-Re*, podem ser encontradas em Launder e Sharma (1974), Cotton e Jackson (1990), Rodi e Mansour (1993) e Igci e Arici (2016).

#### 4.3.6 Funções de Parede

Os escoamentos em geral são influenciados pela proximidade do contorno sólido. No escoamento turbulento existem dois efeitos principais devidos a essa proximidade: o amortecimento das componentes normais à parede, tornando o escoamento anisotrópico e o aumento da turbulência através do mecanismo de cisalhamento do escoamento. A camada limite é criada a partir da variação da velocidade entre a condição de não deslizamento na parede (velocidade nula) até seu valor na corrente livre, onde não há mais interferências no escoamento. Essa variação geralmente é elevada na região próxima à parede, produzindo gradientes abruptos, tornando-se uma região de interesse especial, onde há a necessidade de capturar com precisão os fenômenos físicos (BREDBERG, PENG e DAVIDSON, 2000).

Na região próxima à parede a turbulência é suprimida devido à diminuição da escala de comprimento dos vórtices, tendo em vista que há um decréscimo na transferência da quantidade de movimento nessa região. Logo, o comprimento característico dos vórtices aumenta à medida que se afasta da parede, quando esta deixa de influenciar sobre o escoamento.

Observando o desenvolvimento da camada limite em um escoamento turbulento Kundu e Cohen (2002) estabeleceram que o perfil de velocidade próximo ao contorno

sólido depende apenas de parâmetros que são relevantes nessa região, não dependendo da velocidade da corrente livre  $U_\infty$  ou de um comprimento característico do escoamento  $\delta$ . Como a camada nessa região é muito fina, a tensão de cisalhamento na superfície ( $\tau_w$ ) é praticamente constante, o perfil de velocidade é dado pela relação adimensional definida por:

$$u^+ \equiv \frac{U}{u_\tau} \quad (38)$$

onde  $u_\tau$  a velocidade de fricção dada por:

$$u_\tau \equiv \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (39)$$

Mais distante da parede, o perfil de velocidade é dado pela Lei de parede, definida conforme:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C \quad (40)$$

onde  $\kappa$  é a constante de Von Karmán igual a 0,41,  $C$  é uma constante obtida experimentalmente e igual a 5 e  $y^+$  é a distância adimensionalizada até a parede, dada pela relação apresentada na Eq. (41):

$$y^+ \equiv \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (41)$$

As distintas regiões presentes na camada limite turbulenta são apresentadas em função de  $y^+$  e definidas por Tennekes e Lumley (1972) como sendo:

- Subcamada viscosa:  $0 < y^+ < 5$
- Camada de transição:  $5 < y^+ < 30$
- Camada Logarítmica:  $30 < y^+ < 200$

Conforme Kundu e Cohen (2002), na subcamada viscosa predominam os efeitos viscosos que sobrepujam a turbulência. Essa camada é representada pela Eq. (38). Tendo em vista a característica da camada supracitada, a tensão de cisalhamento é

tomada como constante, logo, integrando-se a Lei da viscosidade de Newton ao longo da espessura dessa camada e assumindo a condição de não deslizamento, tem-se que a velocidade apresenta uma distribuição linear. Na corrente livre, ou seja, na camada logarítmica, as tensões turbulentas dominam. Nessa camada, a tensão de cisalhamento varia suavemente com a distância à parede obedecendo o perfil de velocidade logarítmico de acordo com a Eq. (40). Entre as duas camadas apresentadas, tem-se a camada de transição onde as tensões viscosas e de turbulência afetam o escoamento.

Conforme Bredberg, Peng e Davidson (2000), para tratar o escoamento próximo a parede existem duas abordagens que podem ser utilizadas: tratamento para modelos para baixos número de Reynolds (LRN) e para modelos para altos números de Reynolds (HRN – *High Reynolds Number*). Para o caso de modelos LNR, utiliza-se o método da integração direta na subcamada viscosa, exigindo uma discretização espacial bastante elevada com  $y^+ \sim 1$ , o que eleva o custo computacional para sua resolução. Para o caso de modelos HRN, os modelos de duas equações tem resultados insatisfatórios para integração das equações nessa região (exceto o modelo SST), logo são inseridas funções de parede baseadas na lei de parede, Eq. (40), que resolvem o escoamento nessa região, portanto o primeiro volume deve estar situado na camada logarítmica. O custo computacional diminui consideravelmente em detrimento da precisão do cálculo, pois nessa região a velocidade é modelada e isso representa um problema para a captura da separação do escoamento.

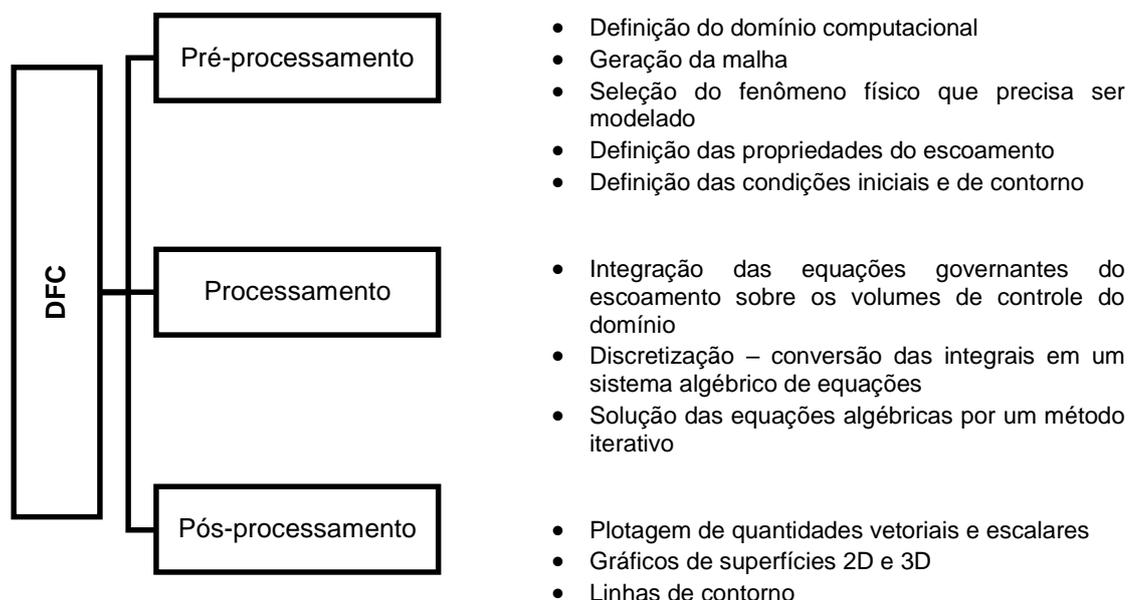
Para mais detalhes sobre o tratamento do escoamento próximo a parede e a formulação para os modelos turbulentos utilizados nesse trabalho, consultar Marić, Höpken e Mooney (2014) e Liu (2017).

## 5 METODOLOGIA

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), a Dinâmica dos Fluidos Computacional ou DFC é a análise de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, por meio de simulação baseada em computador. Os códigos DFC são estruturados em torno dos algoritmos numéricos que podem resolver problemas supracitados. Todos os códigos contêm três etapas

principais: (i) pré-processamento, (ii) processamento e (iii) pós-processamento. Cada etapa dessa é apresentada de maneira resumida como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Resumo dos elementos necessários a simulação na DFC



Fonte: ADAPTADO DE VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007

O pré-processamento consiste na preparação e definição dos dados de entrada de um determinado problema de acordo com as ações apresentadas na Figura 7. Tanto a precisão do resultado obtido quanto o custo computacional do problema serão definidos pelo nível de refinamento da malha empregada. O processamento propriamente dito é obtido através da aplicação de métodos numéricos que discretizem e resolvam as equações do escoamento. No caso do presente trabalho é utilizado o método dos volumes finitos (MVF). O pós-processamento é a etapa de extração e análise de resultados através da visualização dos elementos apontados na Figura 7, com os resultados obtidos na etapa anterior.

Neste trabalho foi utilizado o *OpenFOAM* para execução das etapas já descritas e definidas anteriormente. Além do *OpenFOAM*, para a etapa de pré-processamento, foi utilizado o programa livre de código aberto *SALOME 8.3*, um programa de CAD (*Computer Aided Design*), que é uma plataforma genérica de pré e pós-processamento para simulação numérica. Para a etapa de pós-processamento foi utilizado o programa livre de código aberto *Paraview 5.4.1* que é destinado a visualização e análise dos dados provenientes das simulações.

## 5.1 OPENFOAM

O *OpenFOAM* (*Open Source Field Operation and Manipulation*), é um programa livre de código aberto desenvolvido em C++ com vários utilitários e uma vasta biblioteca de *solvers* implementados para diversos problemas como transferência de calor, escoamentos compressíveis, incompressíveis, multifásicos, análise de tensão em mecânica estrutural, eletromagnetismo, combustão, modelagem de turbulência, entre outras aplicações. A versão do *OpenFOAM* utilizada neste trabalho é a 4.1, distribuída pela *The OpenFOAM Foundation* (<https://openfoam.org/>).

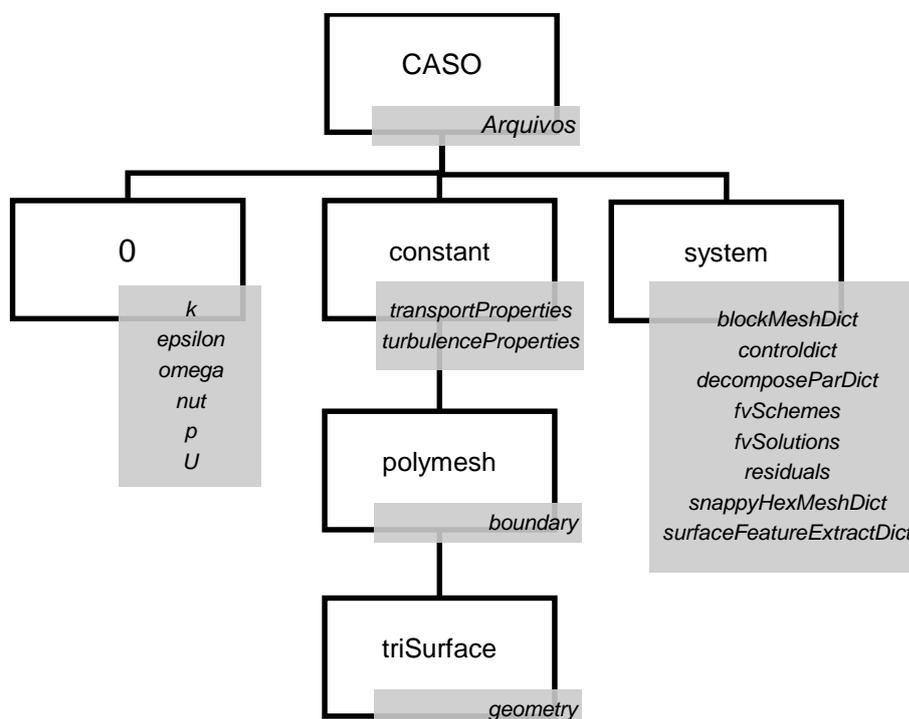
A escolha do *OpenFOAM* como ferramenta principal em face a outros programas comerciais se deu pelo fato do programa estar licenciado sobre GNU (*General Public License*), ou seja, não é necessário o pagamento de licenças para usufruir de todas as opções disponibilizadas no programa. Além disso, apresenta outras vantagens como a possibilidade da implementação de modelos de turbulência através da linguagem orientada para objeto em C++ que, porventura, não esteja contemplado em suas bibliotecas. O programa sempre recebe contribuições de pesquisadores e usuários de todo mundo, otimizando o que já está implementado. O fato de ser um programa robusto com diversas aplicações em DFC (FLORES, GARREAUD e MUÑOZ, 2014; FIATES e VIANNA, 2016; BADAS *et al.*, 2017; TOJA-SILVA, PREGEL-HODERLEIN e CHEN, 2017; GÓMEZ *et al.*, 2018; PISCAGLIA *et al.*, 2019) e conter ferramentas de pré e pós-processamento e a utilização de processamento em paralelo pesou em sua escolha.

Existem algumas desvantagens da utilização do *OpenFOAM*. O fato de o programa não possuir uma interface gráfica, sendo direcionado apenas por linha de comando em um terminal, dificulta a interação inicial com o usuário. Outro fator que afeta a utilização do software reside no fato do *user guide* às vezes não apresentar facilmente as informações importantes e necessárias para as simulações, sendo necessário muitas vezes recorrer a fóruns e grupos que tratam sobre o programa *OpenFOAM*. Por fim, a curva de aprendizado do *OpenFOAM* é mais íngreme em comparação aos programas comerciais, ou seja, precisa-se de mais tempos para conseguir analisar exemplos complexos.

### 5.1.1 Estrutura de um caso

Inicialmente, para configurar um caso no *OpenFOAM*, é necessário criar um diretório com o nome do caso desejado e dentro desse diretório cria três subdiretórios básicos a qualquer simulação conforme apresentado na Figura 8: *0*, *constant* e *system*. É válido ressaltar que os arquivos dentro de cada subdiretório apresentado podem variar de acordo com a necessidade do caso.

Figura 8– Estrutura de arquivos do *OpenFOAM*



Fonte: AUTOR, 2019

O subdiretório *0* contém informações relativas as condições de contorno e iniciais definidas para o problema estudado em arquivos dos campos analisados como *k* (energia cinética turbulenta), *epsilon* (dissipação de energia cinética turbulenta) *omega* (dissipação específica de energia cinética turbulenta), *nut* (viscosidade turbulenta), *p* (pressão) e *U* (velocidade), a depender de outras configurações definidas a seguir. Junto a esse subdiretório, estão os subdiretórios de tempo referentes à simulação com informações sobre os campos já mencionados.

O subdiretório *constant* contém arquivos que definem propriedades físicas da simulação, como o tipo de modelagem de transporte do escoamento, valor da viscosidade cinemática (*transportProperties*) e informações referentes ao modelo de

turbulência selecionado (*turbulenceProperties*). Além desses arquivos, dentro do subdiretório *constant* estão presentes outros subdiretórios. O *polymesh* contém todas as informações referente à malha e o subdiretório *triSurface*, quando necessário, contém uma geometria que é modelada a partir de um programa externo ao *OpenFOAM* e inserida dentro dos diretórios do programa para fazer parte do domínio computacional.

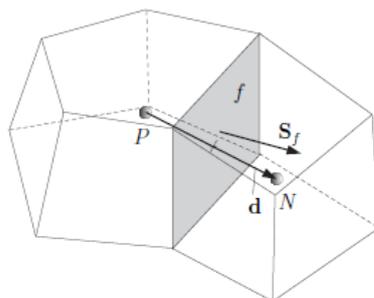
O subdiretório *system* serve para definir as configurações associadas ao processo de solução do problema propriamente dito. O *blockMeshDict* é um utilitário para geração de malha uniformes com elementos hexaédricos, dividindo o domínio em blocos onde é gerada a malha; *controlDict* compreende parâmetros de controle de execução no início e fim da simulação, intervalo de tempo, e parâmetros para saídas de dados; *decomposeParDict* estabelece um método para divisão da malha e dos campos analisados para processar a simulação em paralelo, ou seja, cada parte do domínio é resolvida por um processador; *fvSchemes* apresenta os esquemas de discretização selecionados; *fvSolutions* estabelece os solucionadores das equações, parâmetros de tolerância e outros parâmetros de controle dos algoritmos utilizados; *residuals* estabelece os campos que serão guardados e os valores de resíduos a cada iteração do *OpenFOAM*; *snappyHexMeshDict* é um utilitário de geração de malha tridimensional automática a partir de geometrias inseridas na estrutura do caso, onde a malha é gerada iterativamente a partir de uma malha base gerada pelo *blockMeshDict*. Finalmente, no arquivo *surfaceFeatureExtractDict* identificam-se os contornos da geometria utilizada no processo anterior.

### 5.1.2 Abordagem do Método dos Volumes Finitos

O Método dos Volumes Finitos (MVF) é uma técnica que transforma as equações diferenciais parciais em equações discretas e as resolve em um sistema algébrico (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007). O domínio de interesse do estudo é discretizado em volumes de controles contíguos. Um volume típico é apresentado na Figura 9. Variáveis dependentes e outras propriedades são armazenadas nos centroides dos volumes, embora, possam ser armazenadas nas faces e vértices.  $P$  e  $N$  são centroides dos volumes vizinhos e  $d$  é a distância entre os centroides. O volume é limitado por um conjunto de faces planas, onde  $f$  representa a face que separa os volumes e  $S_f$  é o vetor normal de área dessa superfície. No MVF, não há limitação no

número de faces que limitam cada volume, nem qualquer restrição no alinhamento de cada face. Esse tipo de malha é frequentemente denominada como “arbitrariamente não estruturada” para diferenciá-la das malhas nas quais as faces do volume têm um alinhamento prescrito.

Figura 9 – Parâmetros na discretização de volumes finitos



FONTE: USER GUIDE OPENFOAM, 2015

Após a discretização, as equações são integradas em cada volume e em seguida, as variáveis são interpoladas até a face da célula, ou seja, o MVF transforma a equação de conservação em fluxo de superfície e avalia os gradientes no centroide do volume. As expressões resultantes apresentam a conservação (exata) de propriedades relevantes para cada célula de tamanho finito. Essa relação clara entre o algoritmo numérico e o princípio de conservação física constitui uma das principais vantagens do MVF (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007; MOUKALLED, MANGANI e DARWISH, 2015). Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), a conservação de uma variável de fluxo geral  $\phi$  dentro de um volume de controle finito pode ser expressa como um balanço entre os vários processos tendendo a aumentar ou diminuir, logo tem-se que:

Figura 10 – Conservação de uma variável dentro em um volume de controle

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Taxa de variação de} & & \text{Taxa líquida de} & & \text{Taxa líquida de} & & \text{Taxa líquida de} \\ \phi \text{ no volume de} & & \text{variação de } \phi \text{ devido a} & & \text{variação de } \phi \text{ devido} & & \text{variação de } \phi \text{ devido a} \\ \text{controle com relação} & = & \text{convecção no volume} & + & \text{a difusão no volume} & + & \text{termos de fonte no} \\ \text{ao tempo} & & \text{de controle} & & \text{de controle} & & \text{volume de controle} \end{array}$$

FONTE: VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007

É importante ressaltar que pelas características apresentadas, o MVF pode ser aplicado num espaço físico de malhas poligonais não estruturadas, bem como inserir uma ampla variedade de condições de contorno tendo em vista que as incógnitas são

avaliadas nos centroides dos volumes e não em suas faces. Estas características tornaram o MVF bastante adequado para a simulação numérica de uma variedade de aplicações envolvendo escoamento de fluido e transferência de calor e massa.

O MVF do *OpenFOAM* utiliza o arranjo co-localizado, no qual todas as variáveis do escoamento são armazenadas no centroide do volume de controle. Os valores de fluxos nas faces são calculados através de interpolação a partir dos valores dos volumes de controle adjacentes. (MOUKALLED, MANGANI e DARWISH, 2015).

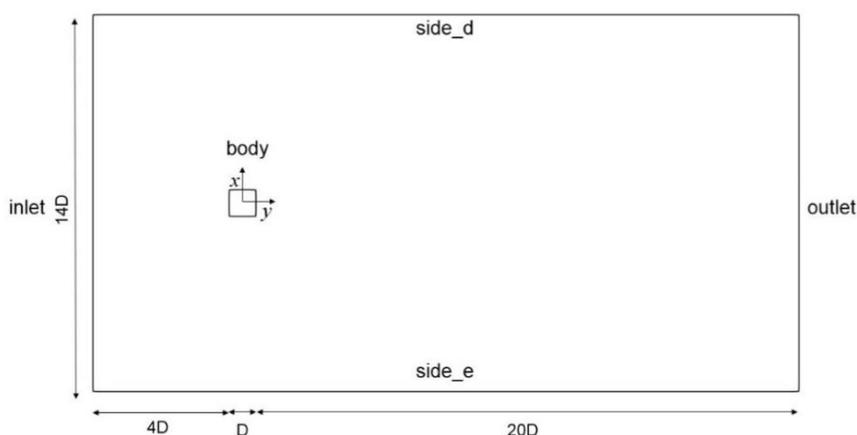
### 5.1.3 Configuração dos casos estudados

A seguir serão apresentados os casos analisados neste trabalho, incluindo as dimensões do domínio e as condições de contorno.

#### 5.1.3.1 Cilindro Quadrado 2D

O primeiro caso estudado é referente ao escoamento bidimensional transiente em corpo rombudo de seção transversal quadrada com número de Reynolds igual a 22.000.

Figura 11 – Domínio computacional e condições de contorno do cilindro quadrado 2D



Fonte: AUTOR, 2019

As dimensões do domínio expressas em função do comprimento característico  $D$  do quadrado e as condições de contorno são apresentadas na Figura 11. Todo o domínio tem as dimensões  $25D \times 14D$ , sendo que a entrada (*inlet*) está localizada a

4,5D do centro do corpo (*body*), onde está localizado o sistema de coordenadas. A superfície de saída (*outlet*) está localizada a 20,5D do centro do corpo, enquanto que ambos os lados (*side\_e*, *side\_d*) estão localizados a 7D do centro do corpo. A razão de bloqueio (razão entre a dimensão característica do corpo e a largura do domínio) é de 0,07 (RAISEE e JAFARI, 2006). Para a simulação desse escoamento foram utilizados dois modelos de turbulência: o modelo *Low-Re*  $k - \varepsilon$  Launder e Sharma, doravante denominado LS e o modelo  $k - \omega$  SST, doravante denominado SST. Ambos os modelos foram testados sem função de parede e com função de parede.

Um resumo das condições de contorno impostas no *OpenFOAM* pode ser observado nas Tabelas 5 e 6. Nas tabelas fV significa *fixedValue* e é imposta quando há a necessidade de prescrever um valor fixo; zG significa *zeroGradient* e é imposta quando é necessário prescrever uma condição de gradiente zero; iO significa *inletOutlet* e é semelhante a condição zG, porém quando há uma recirculação ele é alterado para fV; sP significa *symmetryPlane* e é utilizada para aplicar condições de simetria; *empty* é uma condição aplicada para tornar o caso bidimensional. Essa última condição é aplicada nas faces frontal e anterior que é denominada nesse caso de *frontAndBack*; as nomenclaturas terminadas em WF fazem referência as funções de parede (*wall functions*) utilizadas nesse caso.

Tabela 5 – Condições de contorno aplicadas ao domínio do cilindro quadrado para os modelos SST e LS sem função de parede

Superfície	$U$	$k$	$\varepsilon$	$\omega$	$\nu_t$	$p$
Inlet	fV	fV	fV	fV	zG	zG
outlet	iO	iO	iO	iO	zG	fV Zero
side_d	sP	sP	sP	sP	sP	sP
side_e	sP	sP	sP	sP	sP	sP
frontAndBack	empty	empty	empty	empty	empty	empty
body	fV Zero	zG	zG	zG	zG	zG

Fonte: AUTOR, 2019

Tabela 6 – Condições de contorno aplicadas ao domínio do cilindro quadrado para os modelos SST e LS com função de parede

Superfície	$U$	$k$	$\varepsilon$	$\omega$	$\nu_t$	$p$
Inlet	fV	fV	fV	fV	zG	zG
outlet	iO	iO	iO	iO	zG	fV Zero
side_d	sP	sP	sP	sP	sP	sP
side_e	sP	sP	sP	sP	sP	sP
frontAndBack	empty	empty	empty	empty	empty	empty
body	fV Zero	kLowReWF	epsilonLowReWF	omegaWF	nutUSpaldingWF	zG

Fonte: AUTOR, 2019

De acordo com o experimento realizado por Lyn e Rodi (1994), condições uniformes do escoamento são prescritas na entrada do domínio. A velocidade é uniforme e as componente em x é igual a velocidade da corrente livre ( $u = U_\infty$ ) que é igual a 1 m/s, enquanto que a componente em y é igual a 0 ( $v = 0$ ). A pressão e viscosidade turbulenta são especificadas como gradiente zero. A energia cinética turbulenta é dada por:

$$k = \frac{3}{2}(IU_\infty)^2 \quad (42)$$

onde  $I$  é a intensidade de turbulência, que é igual a 2% pra o presente caso.

A dissipação de energia cinética turbulenta e a dissipação específica na entrada são definidas a seguir respectivamente:

$$\varepsilon = C_\mu \frac{\rho k^2}{\mu} \left( \frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (43)$$

$$\omega = \frac{\rho k}{\mu} \left( \frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (44)$$

No plano de saída as variáveis são prescritas como gradiente zero, exceto a pressão que é igual a 0. Nos planos laterais são impostas condições de simetria, assim como nas faces anterior e frontal são impostas condições para o que o escoamento seja bidimensional. No corpo, é imposta a condição de não deslizamento (velocidade nula), pressão é especificada como gradiente zero e as demais variáveis são

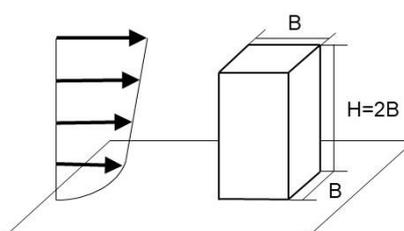
configuradas como gradiente zero (Tabela 5) caso não haja utilização das funções de parede (Tabela 6).

### 5.1.3.2 Prédio Isolado 1:1:2

O próximo estudo considera o *benchmark* proposto pelo Instituto Japonês de Arquitetura ([https://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index\\_e.htm](https://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index_e.htm)), que é analisado experimental e numericamente por vários autores. No exemplo estuda-se o escoamento permanente ao redor de um prédio isolado com razão de aspecto 1:1:2 (comprimento:largura:altura) com camada limite atmosférica em túnel de vento por Meng e Hibi (1998), número de Reynolds igual a 47.000 e velocidade de referência igual a 4,4 m/s. Na Figura 12, apresenta-se em detalhe a geometria prismática que será analisada, com B igual a 0,08 m.

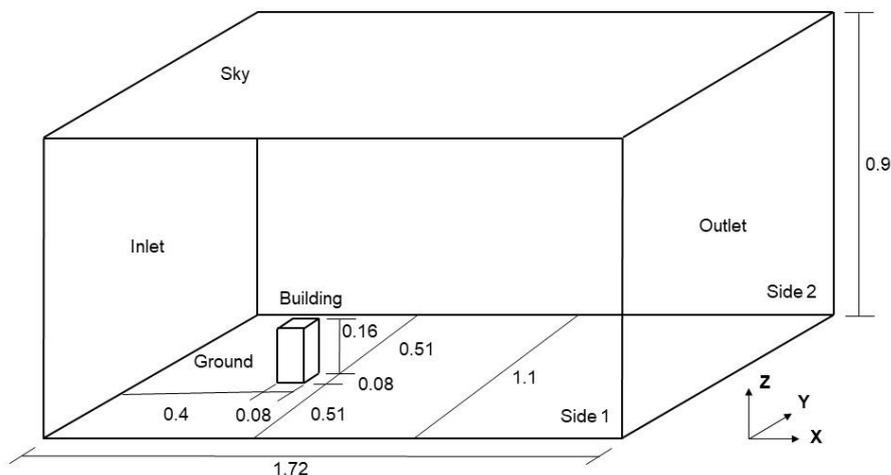
Na Figura 13, apresenta-se o domínio computacional utilizado na presente simulação, com todas as unidades expressas em metros, tendo em vista que foram utilizadas as medidas reais do túnel de vento. O centro de coordenadas está localizado no centro da base do prédio em z igual a 0.

Figura 12 – Detalhe da geometria



Fonte: AUTOR, 2019

Figura 13 – Domínio computacional para o caso do prédio isolado



Fonte: AUTOR, 2019

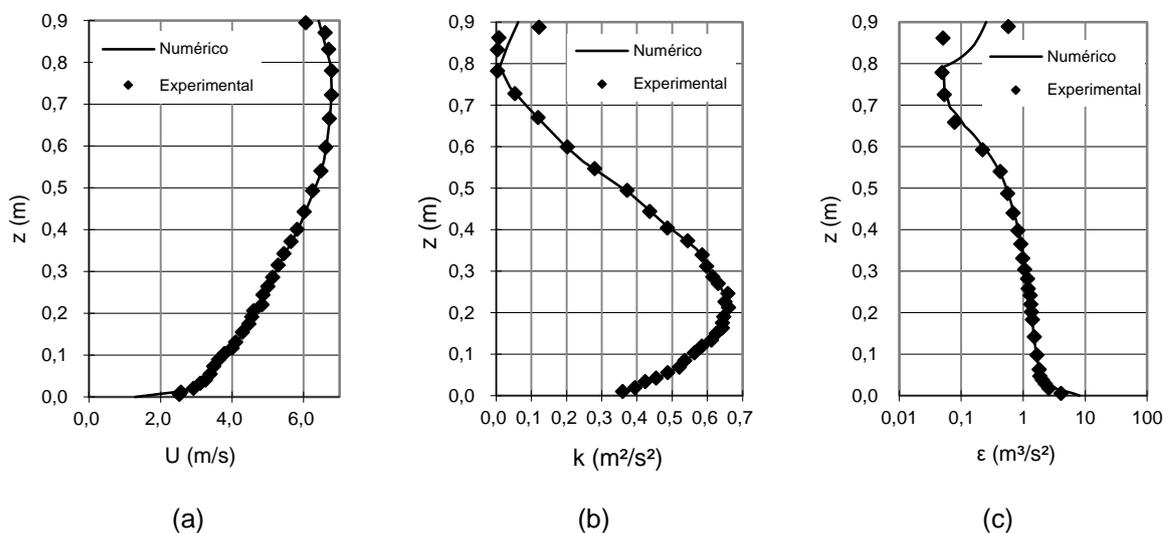
Na Tabela 7, apresentam-se as condições de contorno aplicadas a cada superfície do domínio em concordância com Tominaga *et al.* (2008), Toja-Silva *et al.* (2015a) e Toja-Silva *et al.* (2015b). Os valores iniciais de velocidade, energia cinética turbulenta e dissipação de energia foram impostos através de valores experimentais, conforme apresentado na Figura 14, logo a sigla iP significa *InletProfile*, e refere-se aos perfis de entrada das variáveis. Já a viscosidade é uma propriedade calculada diretamente pelo *OpenFOAM*, logo C significa *Calculated*. A simulação foi realizada com o modelo de turbulência RNG  $k - \varepsilon$ , doravante denominado RNG.

Tabela 7 – Condições de contorno aplicadas ao domínio do prédio isolado

Superfície	$U$	$k$	$\varepsilon$	$\nu_t$	$p$
Inlet	iP	iP	iP	C	zG
outlet	zG	zG	zG	C	fV Zero
ground	fV Zero	kqRWF	epsilonWF	nutkRoughWF	zG
building	fV Zero	kqRWF	epsilonWF	nutkWF	zG
sky	fV Zero	kqRWF	epsilonWF	nutkRoughWF	zG
sides	sP	sP	sP	sP	sP

Fonte: AUTOR, 2019

Figura 14 – Comparação entre os perfis de entrada numérico (presente estudo) e experimental de Meng e Hibi (1998): (a) Velocidade, (b) energia cinética turbulenta e (c) dissipação turbulenta de energia



Fonte: AUTOR, 2019

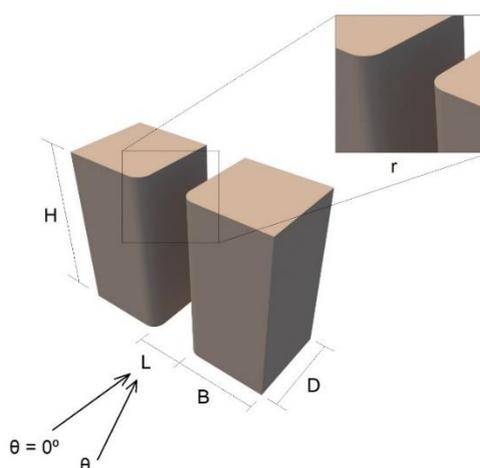
No plano de entrada (*inlet*) foi imposta a condição experimental para a velocidade, energia cinética turbulenta e dissipação turbulenta de energia. Já a viscosidade turbulenta, será calculada pelo *OpenFOAM* e a pressão foi prescrita como gradiente zero. No plano de saída (*outlet*) foi imposta a condição gradiente zero para a velocidade, energia cinética turbulenta e dissipação turbulenta de energia, a viscosidade turbulenta calculada pelo *OpenFOAM* e a pressão com valor fixo igual a 0. Para o prédio (*building*), o plano inferior (*ground*) e o plano superior (*sky*) foram impostas as condições de não deslizamento para a velocidade, gradiente zero para pressão e as funções de parede. Para os planos laterais (*sides*) foram impostas condições de simetria.

### 5.1.3.3 Estudo de caso: Prédios Paralelos 1:1:4

Para o estudo de caso da aerodinâmica ao redor de um sistema eólico integrado entre prédios paralelos, adota-se um dos modelos presentes no banco de dados da Universidade Politécnica de Tóquio (TPU, *Tokyo Polytechnic University*) (<http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/eng/contents/code/tpu>). Conforme apresentado na Figura 15, as principais variáveis do problemas são: altura ( $H$ ), comprimento ( $B$ ), largura ( $D$ ), distância entre as edificações ( $L$ ), raios de curvatura nos

cantos vivos dos edifícios ( $r$ ) e a direção incidente do escoamento em relação aos edifícios ( $\theta$ ). É importante lembrar que das variáveis apresentadas, apenas o raio de curvatura não está presente no banco de dados da TPU. No exemplo, estuda-se o escoamento permanente ao redor das edificações com razão de aspecto (comprimento:largura:altura) B:D:H = 1:1:4, distância  $L = B$  onde B é igual a 0,07m, número de Reynolds igual a 153.000 e velocidade de referência igual a 8,2 m/s, medida na altura máxima da edificação. Foram simulados com o modelo de turbulência RNG oito casos, onde varia-se: o raio de curvatura e a direção do escoamento conforme mostrado na Tabela 8. No estudo, analisa-se como as modificações afetam o escoamento em torno das edificações com relação à distribuição de velocidade, distribuição de pressão e intensidade de turbulência.

Figura 15 – Configuração das edificações que serão analisadas



Fonte: AUTOR, 2019

Tabela 8 – Disposição dos casos analisados

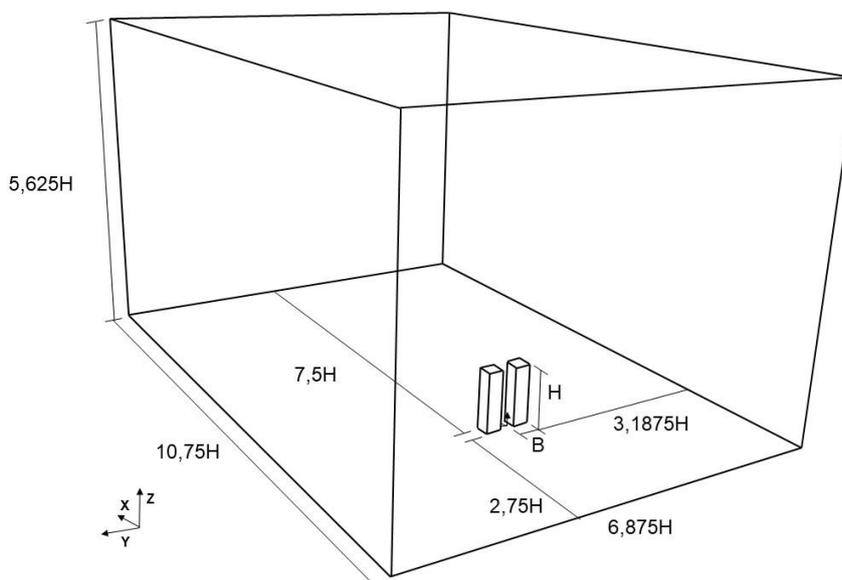
$r/B$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$
0	r0_0	r0_15
0,10	r1_0	r1_15
0,20	r2_0	r2_15
0,30	r3_0	r3_15

Fonte: AUTOR, 2019

Na Figura 16, apresenta-se o domínio computacional utilizado na presente simulação, com todas as unidades expressas em metros, tendo em vista que foram

utilizadas medidas proporcionais em relação ao caso do prédio isolado, apresentado na seção anterior. O centro de coordenadas está localizado no plano de simetria localizado entre os prédios a partir do chão em  $z$  igual a 0.

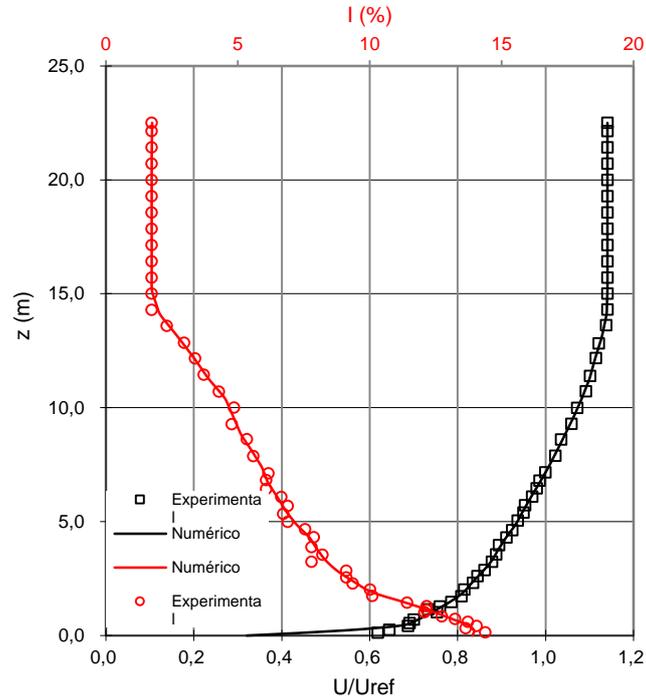
Figura 16 – Domínio computacional para o caso da passagem entre prédios paralelos



Fonte: AUTOR, 2019

As condições de contorno são as mesmas utilizadas para o caso do edifício isolado (Tabela 7) com a diferença que são fornecidos os perfis de entrada da velocidade e da intensidade da turbulência conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Comparação entre os perfis de entrada numérico (presente estudo) e experimental de velocidade e intensidade de turbulência



Fonte: AUTOR, 2019

A partir dos valores fornecidos pelos perfis de entrada, os valores da energia cinética turbulenta e da dissipação de energia cinética turbulenta são calculados conforme as expressões abaixo:

$$k = \frac{3}{2} (IU_{REF})^2 \quad (45)$$

$$\varepsilon = \frac{C_{\mu}^{0.75} k^{1.5}}{B} \quad (46)$$

onde  $U_{REF}$  é a velocidade de referência e  $B$  é o comprimento característico da edificação.

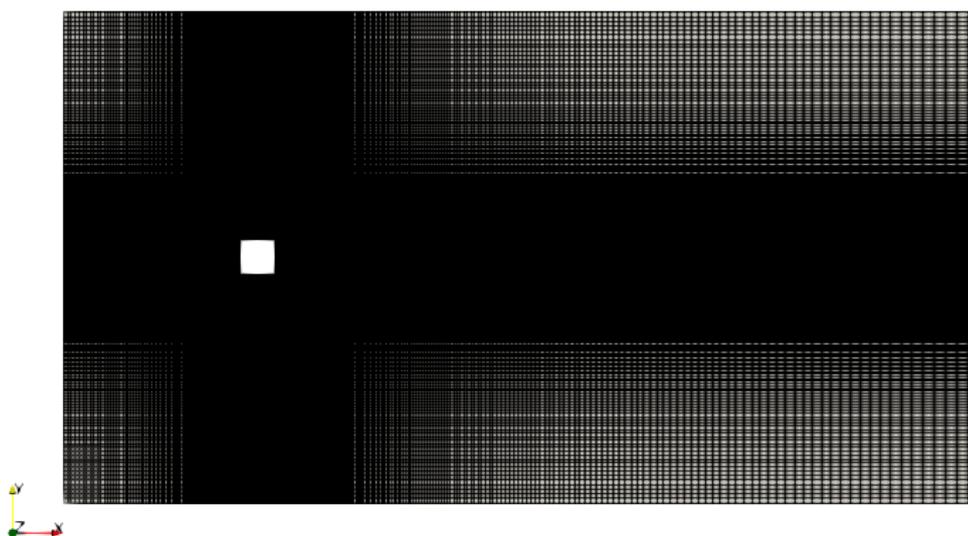
#### 5.1.4 Discretização Espacial

O primeiro passo para resolução de um problema é definir o domínio de estudo e em seguida dividir esse domínio em uma malha de volumes finitos onde as equações discretas serão resolvidas. É necessário um cuidado especial na construção da malha

para garantir a qualidade que não comprometa o resultado obtido, nem eleve desnecessariamente o custo computacional. Por essa razão, emprega-se o estudo de convergência de malha, para garantir o melhor resultado possível com a menor quantidade de volumes possível. As malhas uniformes, aquelas que mantem uma conectividade regular e numeração consecutiva dos elementos (FERZIGER e PERIĆ, 2002) apresentam uma boa eficiência com relação ao tempo de processamento e em geral são preferíveis. No entanto, pela complexidade da geometria estudada, muitas vezes é necessário lançar mão de malhas não uniformes.

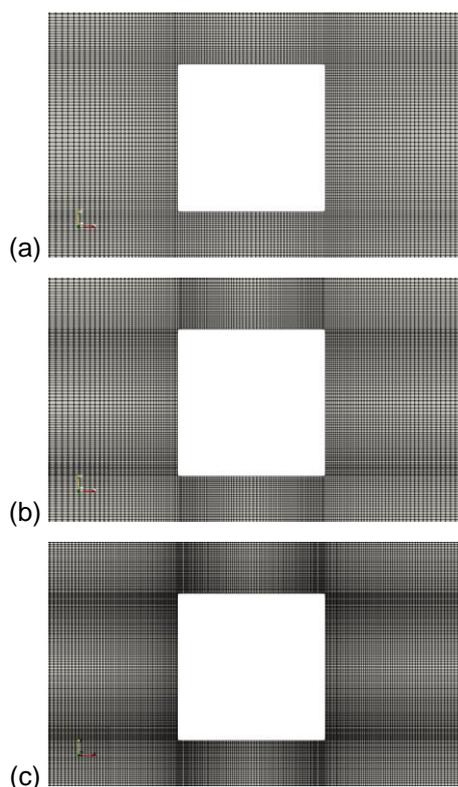
As malhas utilizadas no presente trabalho, foram feitas utilizando o programa livre de código aberto *SALOME* 8.3 ou uma função nativa do *OpenFOAM* denominada *snappyHexMesh*. As malhas foram criadas e em seguida exportadas e convertidas para o *OpenFOAM*. Para o caso do cilindro quadrado foram executadas três malhas com diferentes níveis de refinamento denominadas SC1, SC2 e SC3. O refinamento foi definido em função do número de elementos em cada aresta do corpo, sendo que a malha SC1 possui 50 elementos, a malha SC2 possui 75 elementos e a malha SC3 possui 100 elementos em cada aresta do corpo. A Figura 18 apresenta a visualização da malha SC3 enquanto que a Figura 19 apresenta o detalhe do nível de refinamento das três malhas próximo ao corpo. A Tabela 9 apresenta o número de volumes e os valores mínimo, médio e máximo do  $y^+$  de cada malha.

Figura 18 – Malha SC3



Fonte: AUTOR, 2019

Figura 19 – Detalhes das malhas SC1 (a), SC2 (b) e SC3 (c) do caso do cilindro quadrado 2D



Fonte: AUTOR, 2019

Tabela 9 – Valores da quantidades de volumes e  $y^+$  para as malhas SC1, SC2 e SC3 do caso do cilindro quadrado 2D

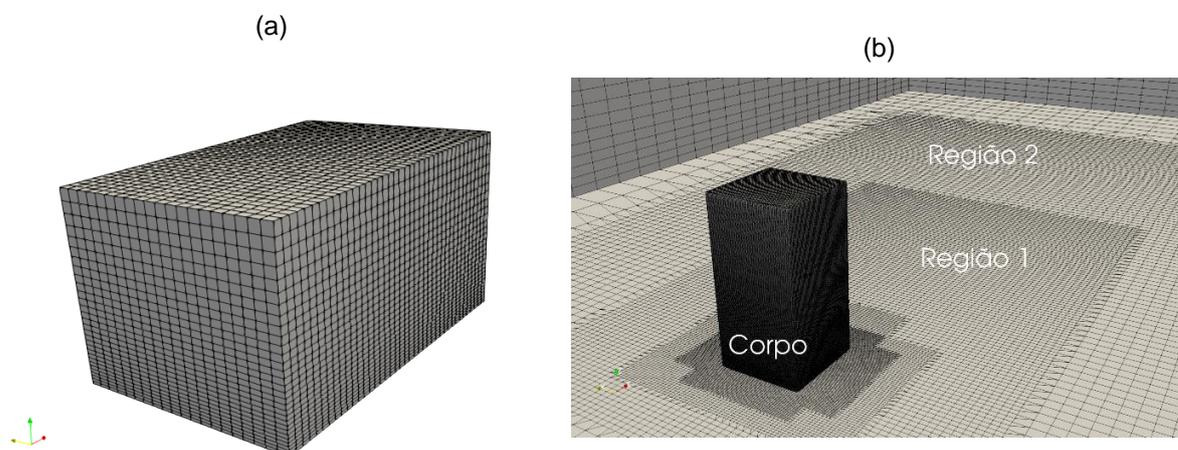
Malha	Nº de volumes	$y^+$ mín.	$y^+$ médio	$y^+$ máx.
SC1	66250	1,45	6,03	14,65
SC2	76875	0,86	6,07	15,04
SC3	161000	0,46	4,32	10,64

Fonte: AUTOR, 2019

Para o caso do prédio isolado, a geometria prismática foi gerada no *SALOME*, posteriormente exporta-se para *OpenFOAM* e para geração da malha emprega-se a função nativa *snappyHexMesh*. A função *snappyHexMesh* gera malhas tridimensionais contendo volumes hexaédricos e hexaédricos divididos automaticamente a partir de geometrias de superfícies trianguladas. A malha se ajusta aproximadamente à superfície refinando iterativamente uma malha base definida através do *blockMesh* que envolve todo o domínio, ver Figura 20(a). É possível especificar o nível de refinamento da malha através de regiões definidas no arquivo *snappyHexMesh*. O refinamento é feito dividindo cada célula por  $2^n$ , onde  $n$  representa o nível de refinamento desejado, sendo que o nível 0 é referente a malha base. Essa

operação é executada concomitantemente com uma etapa de balanceamento dos parâmetros de qualidade da malha que são atingidos iterativamente.

Figura 20 – Malha 3D realizada com o utilitário *snappyHexMesh* do *OpenFOAM* para o caso do prédio isolado



Fonte: AUTOR, 2019

Para o estudo de convergência de malha foram geradas três malhas: M1, M2 e M3, nas quais aplicam-se três diferentes níveis de refinamento. Na Figura 20, apresenta-se em detalhe a malha M3, onde (a) representa a malha base e (b) representa as regiões onde foram definidos os três níveis de refinamento: Corpo, Região 1 e Região 2. A malha base, conforme a Figura 20(a), possui 40 divisões na direção x, 20 divisões na direção y e 30 divisões na direção z, formando a malha tridimensional que abrange todo o domínio. A partir dessa malha e dos parâmetros de refinamento apresentados na Tabela 10 foram construídas as malhas tridimensionais. A quantidade de volumes de cada malha é apresentada na Tabela 11. A Figura 21 apresenta o detalhe do refinamento das malhas M1, M2 e M3 nas proximidades do corpo.

Tabela 10 – Parâmetros de refinamento para as malhas tridimensionais

Malha	Região	Nível de Refinamento
M1	Corpo	2
	1	3
	2	2
M2	Corpo	3
	1	4
	2	2
M3	Corpo	4
	1	5
	2	2

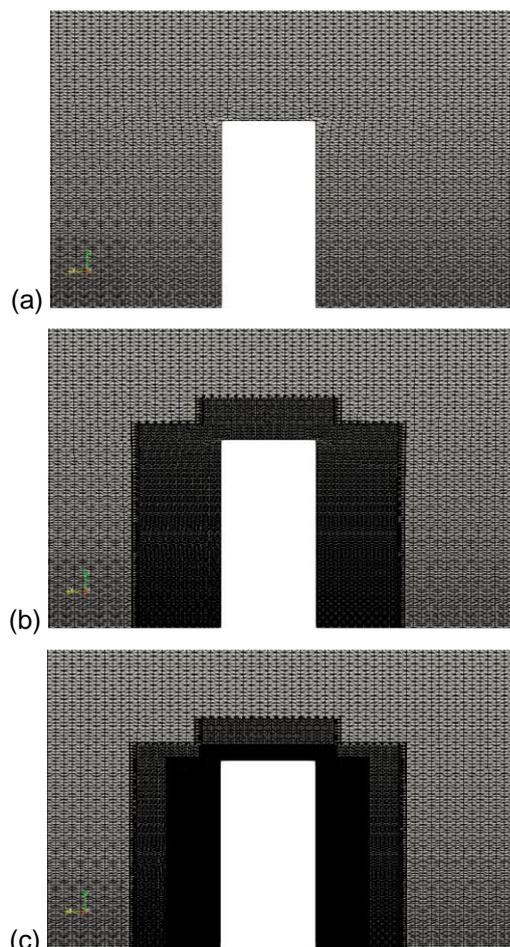
Fonte: AUTOR, 2019

Tabela 11 – Quantidade de volumes para as malhas M1, M2 e M3 do caso do prédio isolado

Malha	Nº de volumes
M1	1.463.756
M2	2.035.250
M3	3.985.664

Fonte: AUTOR, 2019

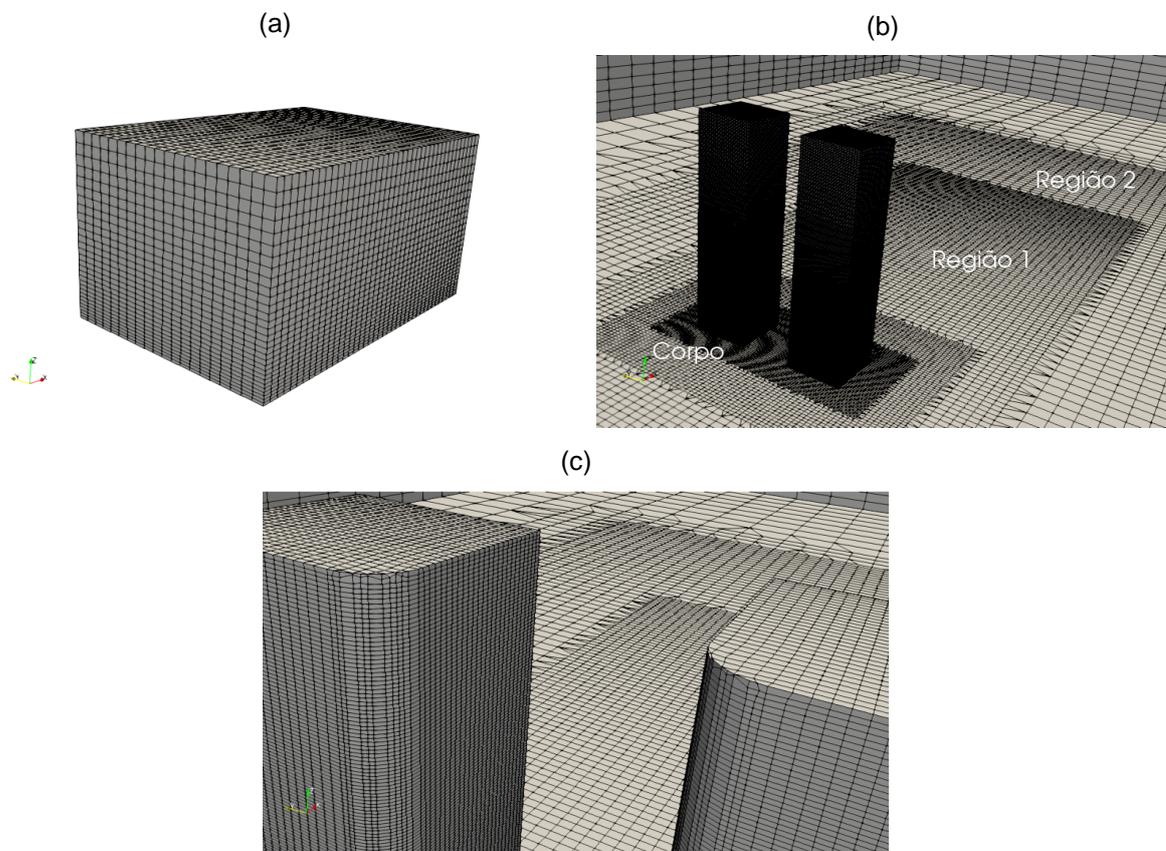
Figura 21 - Detalhes das malhas M1 (a), M2 (b) e M3 (c) do caso do prédio isolado



Fonte: AUTOR, 2019

Com relação ao caso dos edifícios paralelos a malha foi gerada de forma similar ao caso do prédio isolado, utilizando o mesmo nível de refinamento da Malha M3 apresentado na Tabela 10. Apesar do domínio dos edifícios paralelos ser maior, a discretização base usada também foi a mesma devida à restrição de recursos computacionais, logo, o número de volumes nesse caso foi 3.178.928. Detalhes da malha podem ser vistos na Figura 22.

Figura 22 – Malha 3D realizada com o utilitário *snappyHexMesh* do *OpenFOAM* para o caso do prédios paralelos



Fonte: AUTOR, 2019

Depois da geração da malha, sempre é importante realizar a verificação dos parâmetros de qualidade da malha. Essa verificação é possível através da função *checkMesh* no *OpenFOAM* que informa os valores dos parâmetros obtidos para a malha e também se houve algum erro durante a geração da mesma. Os principais parâmetros avaliados nesse ponto são: ortogonalidade da malha, razão de aspecto e assimetria das células. Também é importante utilizar a função *renumberMesh* que reduz a largura de banda das matrizes dos coeficientes obtidas a partir da discretização do domínio.

### 5.1.5 Esquemas Numéricos

Após a construção da malha é necessário definir os esquemas numéricos para a discretização dos termos das equações que serão resolvidas. No *OpenFOAM*, essa definição é feita no dicionário *fvSchemes* conforme as categorias apresentadas na Tabela 12..

Tabela 12– Categorias do *fvSchemes*

Palavra Chave	Categoria de termos matemáticos
<i>interpolationSchemes</i>	Interpolação ponto-a-ponto de valores
<i>snGradSchemes</i>	Componente do gradiente normal a face da célula
<i>gradSchemes</i>	Gradiente $\nabla$
<i>divSchemes</i>	Divergente $\nabla \cdot$
<i>laplacianSchemes</i>	Laplaciano $\nabla^2$
<i>timeScheme</i>	1ª e 2ª derivadas temporais $\partial/\partial t, \partial^2/\partial^2 t,$

FORNTE: USER GUIDE OPENFOAM, 2016

O subdicionário *interpolationSchemes* é utilizado para definir o esquema de interpolação entre o centroide do volume de controle e sua face, onde utilizou-se a interpolação linear. O subdicionário *snGradSchemes* avalia o gradiente normal a superfície do volume das faces que se conectam. O esquema utilizado é o *limited*, que se baseia numa correção da ortogonalidade da malha. Possui um fator limitante que varia entre 0 e 1, sendo 0 correspondente ao esquema *uncorrected* (sem correção de não-ortogonalidade) e 1 correspondente ao *corrected* (correção explícita da não ortogonalidade). O subdicionário *gradSchemes* está relacionado aos termos gradientes das equações discretizadas, onde é utilizada a integração gaussiana, que requer um esquema de interpolação. Neste trabalho foi utilizada a interpolação linear para os termos gradientes. O subdicionário *divSchemes* avalia os termos divergentes das equações discretizadas. É utilizada a integração gaussiana (único esquema disponível para este subdicionário) em conjunto com alguns esquemas de interpolação. Foram utilizados os seguintes esquemas: *linear* (segunda ordem), *upwind* (primeira ordem), *linearUpwind* (primeira/segunda ordem) e *linearUpwindV* (esquema específico para campos vetoriais onde calcula-se um limite para todo campo baseado na direção do gradiente que muda mais rapidamente). O subdicionário *laplacianSchemes* utiliza integração gaussiana com a utilização de esquemas de interpolação para os termos laplacianos das equações a serem resolvidas, ou seja, os termos difusivos. Utiliza-se o esquema de interpolação linear acrescido do mesmo termo que corrige a não ortogonalidade da malha apresentado no subdicionário *snGradSchemes*. Por fim, as derivadas temporais são discretizadas utilizando o método de Cranck Nicolson com fator limitante que varia de 0 (Euler Puro) a 1 (Cranck Nicolson puro) para casos transientes ou utilizando o esquema

steadystate que anula as derivadas temporais para os casos estacionários. Esses esquemas são escolhidos no subdicionário *timeScheme*.

As configurações utilizadas no *fvSchemes* para os casos transientes e estacionários no presente trabalho são as mesmas empregas por TOJA-SILVA *et al.* (2015a) e TOJA-SILVA *et al.* (2015b) e estão apresentadas na Tabela 13 e Tabela 14, respectivamente.

Tabela 13– Esquemas numéricos para o caso transiente

<b>Palavra Chave</b>	<b>Tipo</b>
<i>interpolationSchemes</i>	linear
<i>snGradSchemes</i>	corrected
<i>gradSchemes</i>	Gauss linear
<i>divSchemes</i>	Gauss linear
	Gauss linearUpwindV
	Gauss upwind
<i>laplacianSchemes</i>	Gauss linear corrected
<i>timeScheme</i>	CrankNicolson 0.9

Fonte: AUTOR, 2019

Tabela 14 – Esquemas numéricos para o caso estacionário

<b>Palavra Chave</b>	<b>Tipo</b>
<i>interpolationSchemes</i>	Linear
<i>snGradSchemes</i>	limited 0.777
<i>gradSchemes</i>	cellMDLimited Gauss linear 0.5
<i>divSchemes</i>	bounded Gauss linear
	bounded Gauss linearUpwindV
	bounded Gauss linearUpwind
<i>laplacianSchemes</i>	Gauss linear limited 0.777
<i>timeScheme</i>	steadyState

Fonte: AUTOR, 2019

É válido ressaltar que, na Tabela 14, o item *gradSchemes* possui um limitador *cellMDLimited*, onde o valor do gradiente é limitado na direção normal a face do volume. Essa limitação é associada a um coeficiente que varia entre 0 (sem limitação) a 1 (limitação total). Nessa mesma tabela, os esquemas divergentes utilizam uma variante do esquema de Gauss, o *bounded Gauss*, que é utilizado especificamente para casos estacionários para manter a limitação da solução e promover uma melhor convergência.

### 5.1.6 Resolução dos sistemas algébricos

No *OpenFOAM*, existem diversos algoritmos que podem ser utilizados a depender da situação estudada. No presente estudo foram utilizados dois tipos de algoritmos que realizam o acoplamento pressão-velocidade: o *simpleFOAM*, para escoamentos estacionários, turbulentos e incompressíveis e o  *pisoFOAM*, para escoamentos transientes, turbulentos e incompressíveis.

No algoritmo SIMPLE (MALISKA, 2013) (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), os fluxos convectivos por unidade de massa através das faces dos volumes são avaliados a partir das componentes de velocidade impostas como condições iniciais para o problema. Além disso, um campo de pressão inicial é usado para resolver as equações de momento, e uma equação de correção de pressão, deduzida a partir da equação de continuidade, é resolvida para obter um campo de correção de pressão, que é usado para atualizar os campos de velocidade e pressão. Para iniciar o processo de iteração, utiliza-se estimativas iniciais para os campos de velocidade e pressão. À medida que o algoritmo avança, os campos estimados inicialmente progredem até uma solução convergida. Já o algoritmo PISO (MALISKA, 2013) (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*) é uma extensão do algoritmo SIMPLE, com a diferença que, após a estimativa inicial dos campos de velocidade e pressão, da resolução da equação do momento e da correção da equação da pressão, ele corrige a pressão novamente. O algoritmo transiente pode ser aplicado a um caso estacionário, desde que o problema seja resolvido por um longo período de tempo até que a solução estacionária seja alcançada. (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

As configurações sobre os algoritmos utilizados, solucionadores dos sistemas de equações, tolerâncias e outros parâmetros são definidos no dicionário *fvSolutions*. Para ambos algoritmos utilizados existe a opção *nNonOrthogonalCorrectors* que está relacionada a correção da não ortogonalidade da malha, sendo que, se a malha utilizada for completamente ortogonal, o valor dessa opção deve ser igual a 0. No presente caso, como a malha utilizada para o  *pisoFOAM* é completamente ortogonal esse valor foi igual a 0. Já para o caso onde se utilizou o  *simpleFOAM*, como a malha tem um índice médio de não ortogonalidade igual a 50, o valor dessa opção foi igual a 2. Isso significa que a equação da pressão será resolvida 2 vezes dentro do mesmo passo de tempo para reduzir a influência da malha no resultado.

Com relação ao *pisoFOAM*, existe a opção *nCorrectors* que indica quantas vezes o algoritmo irá resolver as seguintes etapas: computar o fluxo de massa nas faces do volume, resolver a equação da pressão, corrigir o fluxo de massa, corrigir o campo de velocidade a partir do campo de pressão corrigido, atualizar as condições de contorno para os novos valores encontrados. Para o presente trabalho, essa opção é igual a 4 para o início da simulação transiente, sendo alterada para 2 após 150 segundos físicos de simulação.

Ainda para o *simpleFOAM*, foram estabelecidos fatores de relaxação para garantir a estabilidade numérica do algoritmo estacionário, ou seja, para evitar oscilações o valor da variável é limitado por esse fator para a próxima iteração. Por isso o valor desses fatores varia entre 0 e 1, sendo que valores próximos a 0 indicam estabilidade numérica e valores próximos a 1 indicam velocidade na simulação. No presente estudo o valor da relaxação para pressão foi de 0,3 e para as outras variáveis de 0,7.

Para resolução dos sistemas lineares de equações, são atribuídos solucionadores em função da variável a ser resolvida. Para os casos em que se utilizou o *simpleFOAM*, para a pressão foi utilizado o *solver* GAMG (*Generalised Geometric-Algebraic Multigrid*) com suavizador baseado no método de Gauss-Seidel. Para as outras variáveis foi utilizado o *solver* PBiCG (*Preconditioned Bi-Conjugate Gradient*) e o pré condicionador DILU (*Diagonal-based Incomplete LU*). Essas condições são aplicadas por TOJA-SILVA *et al.*, 2015a e TOJA-SILVA *et al.*, 2015b.

Para os casos em que se utilizou o *pisoFOAM*, para a pressão foi utilizado o *solver* PCG (*Preconditioned Conjugate Gradient*) com pré condicionador DIC (*Diagonal-based Incomplete Cholesky*). Para as outras variáveis foi utilizado o *solver* PBiCG e o pré condicionador DILU. Para ambos os casos foi utilizado o suavizador baseado no método de Gauss Seidel. É importante observar que para o *pisoFOAM* é necessário informar as definições da resolução de sistemas para a variável *pfinal* para que se complete o processo iterativo.

Para controlar os erros e definir um ponto de parada para os algoritmos, são estipulados alguns critérios de tolerância, sendo eles: *tolerance* (a simulação finaliza se o resíduo ficar abaixo do especificado), *relTol* (a simulação finaliza se o resíduo inicial ficar abaixo da tolerância relativa definida) e *maxIter* (a simulação finaliza se atingir a quantidade de iterações máximas são atingidas). Para os casos simulados com *simpleFoam* os valores utilizados foram:  $10^{-6}$  para a tolerância de todas as

variáveis, tolerância relativa de 0,005 para a pressão e 0,05 para as outras variáveis e número máximo de iterações igual a 10000. Já os casos simulados com  *pisoFoam* os valores utilizados foram:  $10^{-6}$  para a tolerância da pressão e  $10^{-5}$  para o restante das variáveis, tolerância relativa de 0,001 para a pressão e 0,01. Não foi estabelecido número máximo de iterações para este caso.

## 6 RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos com o programa *OpenFOAM* no caso do escoamento 2D ao redor de um cilindro quadrado e o escoamento 3D sobre um prédio isolado. Finalmente, apresenta-se o estudo 3D do escoamento ao redor de dos prédios paralelos.

### 6.1 CILINDRO QUADRADO 2D

Inicialmente, realiza-se um estudo de refinamento de malha com três discretizações identificadas como SC1, SC2 e SC3. Para todas as malhas utiliza-se os modelos de turbulência LS e SST com função de parede (WF – *Wall Functions*) e sem função de parede, totalizando doze casos. Na Tabela 15, apresenta-se para cada caso os coeficientes aerodinâmicos  $C_{L,RMS}$  (coeficiente de sustentação RMS – *Root Mean Square*),  $C_{D,MÉD}$  (coeficiente de arrasto médio) e St (número de Strouhal). Quando se compara os casos com e sem função de parede, é possível notar que os casos com função de parede sempre apresentam valores maiores de  $C_{L,RMS}$  e  $C_{D,MÉD}$  e valores menores de St. Observa-se que o St não variou para os casos com o modelo LS, enquanto que para os casos com SST a variação foi muito pequena. Para os casos SST WF, os valores dos coeficientes aumentam de SC1 para SC2 e diminuem de SC2 para SC3.

Tabela 15– Resultados dos coeficientes aerodinâmicos das diferentes malhas para o caso do cilindro quadrado 2D

Re		Referências	$C_{L,RMS}$	$C_{D,MÉD}$	St	
22000	Presente Estudo (2019)	LS	SC1	0,081	1,402	0,156
			SC2	0,079	1,397	0,156
			SC3	0,077	1,393	0,156
		LS WF	SC1	0,870	2,043	0,144
			SC2	0,976	2,087	0,144
			SC3	1,023	2,113	0,144
		SST	SC1	0,357	1,640	0,143
			SC2	0,340	1,622	0,143
			SC3	0,333	1,597	0,140
	SST WF	SC1	1,451	2,196	0,126	
		SC2	1,493	2,209	0,129	
		SC3	1,377	2,176	0,128	

Fonte: AUTOR, 2019

Na Tabela 16, apresentam-se os resultados dos modelos LS e SST com e sem funções de parede da malha SC3 comparados com resultados numéricos e experimentais obtidos na literatura. Os valores de St e de  $C_{D,MÉD}$  obtidos apresentam uma ótima concordância com os resultados experimentais e numéricos dados por outros autores. Já para o coeficiente  $C_{L,RMS}$  observa-se uma diferença nos valores apontados pelos autores e os resultados obtidos estão dentro desse intervalo, sendo que o caso SST WF está muito próximo do valor experimental apresentado por Lyn *et al.* (1995). É possível notar que os valores com funções de parede são os que mais se aproximam dos valores experimentais, no entanto, os valores sem função de parede estão aquém dos resultados apresentados na literatura técnica.

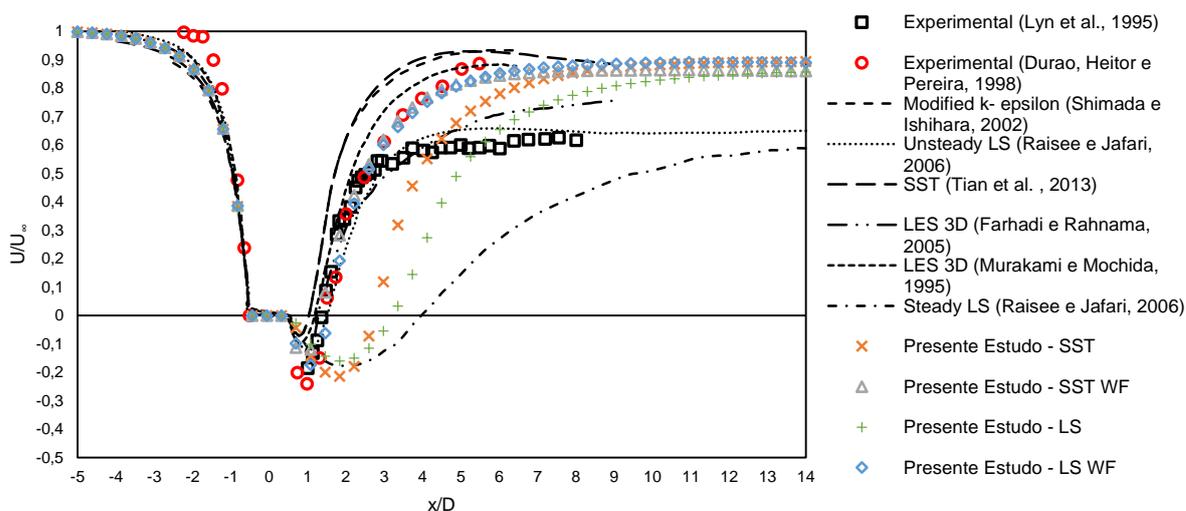
Tabela 16 – Comparação dos resultados dos coeficientes aerodinâmicos do presente trabalho com resultados experimentais e numéricos

Re	Referências	$C_{L,RMS}$	$C_{D,MÉD}$	St	
22000	Presente Estudo (2019)	LS	0,077	1,393	0,156
		LS WF	1,023	2,113	0,144
		SST	0,333	1,597	0,140
		SST WF	1,377	2,176	0,128
14000	Durao, Heitor e Pereira (1988) - EXP	-	-	0,1382	
20000	Bearman e Obasaju (1982) - EXP	1,200	2,100	0,130	
21400	Lyn <i>et al.</i> (1995) - EXP		1,370	2,100	0,132
		Farhadi e Rahnama (2005) - LES 3D	0,984	2,306	0,138
		Minguez <i>et al.</i> (2011) - EXP	-	2,100	0,130
		Tian <i>et al.</i> (2013) - SST	1,492	2,060	0,138
22000	Franke e Rodi (1991) - RSE		2,110	2,150	0,136
		Murakami e Mochida (1995) - LES 3D	1,600	2,090	0,132
		Bosch e Rodi (1998) - k-epsilon	1,012	2,108	0,146
		Raisse e Jafari (2006) - KK Model Low Re k-ε	-	1,900	0,123
		Raisse e Jafari (2006) - LS Model Low Re k-ε	-	1,980	0,126
		Shimada e Ishirara (2002) Modified k-ε	1,430	2,050	0,141
		Arslan, Andersson e Petterson (2010) - LES 3D	1,160	2,110	0,132
		Bao <i>et al.</i> (2011) Spalart-Allmaras - SUPG	1,240	2,040	0,133
		Han <i>et al.</i> (2014) CBS Spalart Allmaras	1,307-1,403	1,945-2,027	0,130-0,139
		Trias, Gorobets e Oliva (2015) - DNS	1,710	2,180	0,132

Fonte: AUTOR, 2019

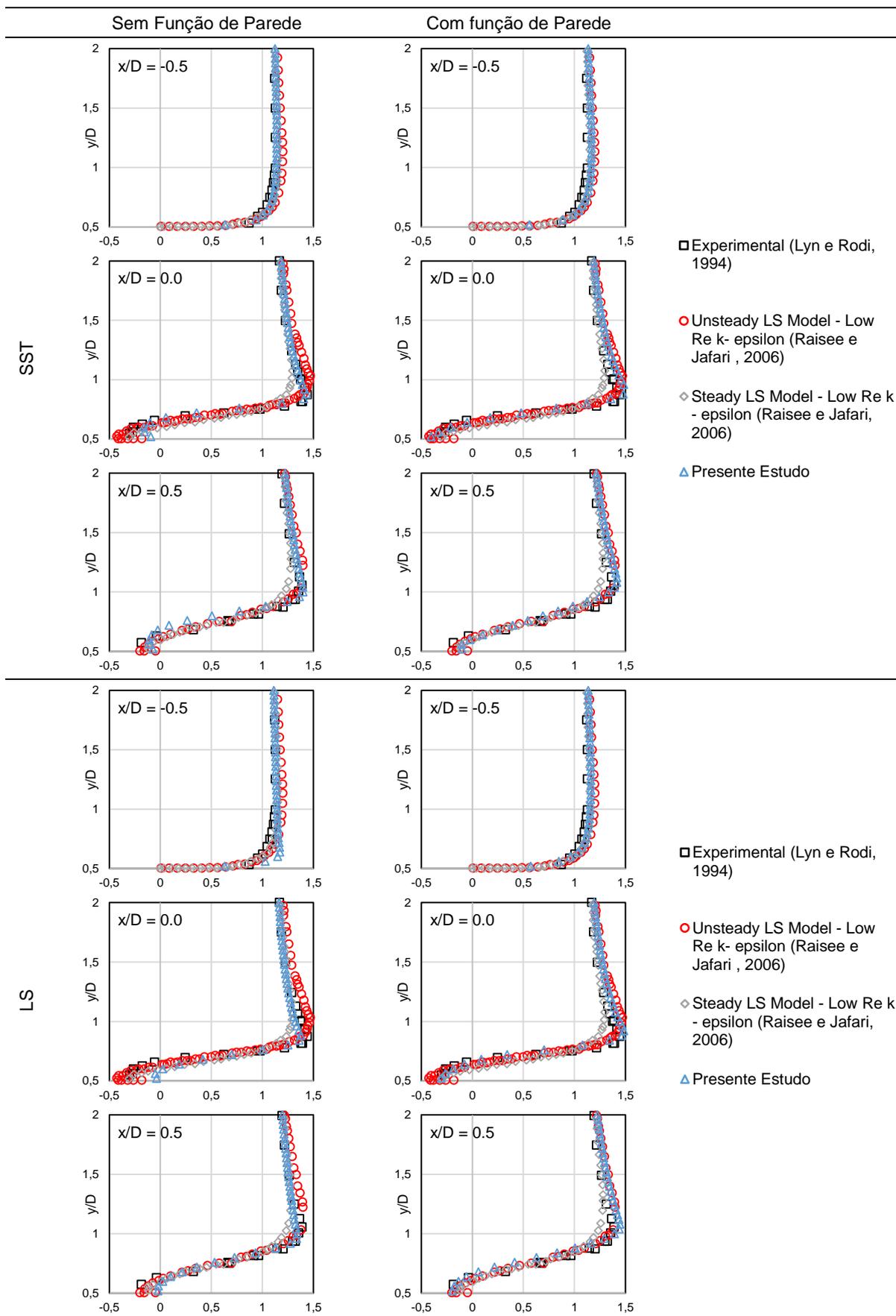
No Gráfico 1, apresenta-se a distribuição de velocidade média na direção x ao longo do eixo central do corpo. Observa-se uma boa concordância dos resultados na parte frontal do corpo e na região de esteira (exceto pelos casos sem função de parede), principalmente com os valores experimentais de Durão, Heitor e Pereira (1998) e com o LES 3D de Murakami e Mochida (1995), embora tenha superestimado os valores apresentados por Lyn *et al.* (1995).

Gráfico 1 – Distribuição da velocidade média em x ao longo da linha central do corpo

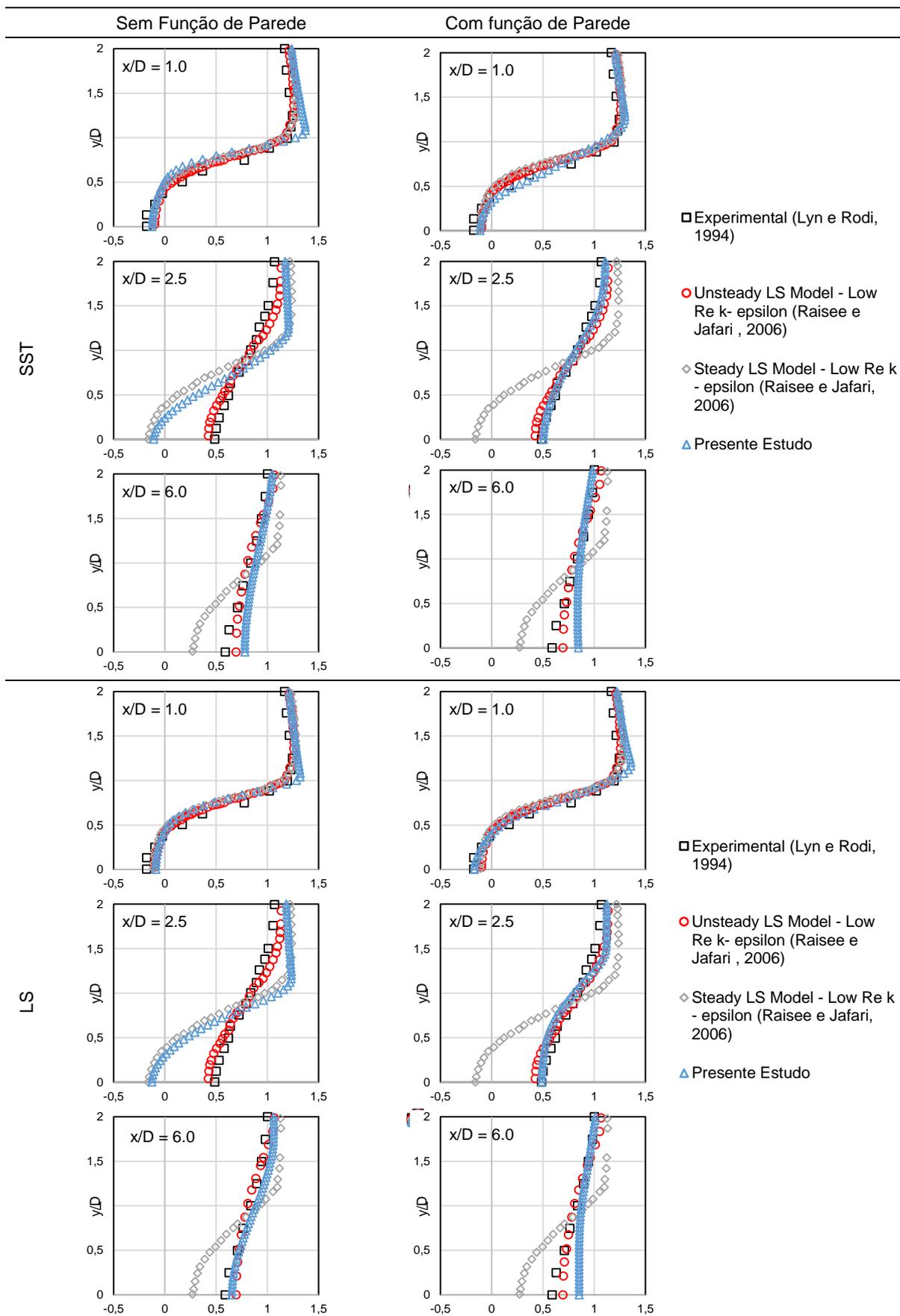


Fonte: AUTOR, 2019

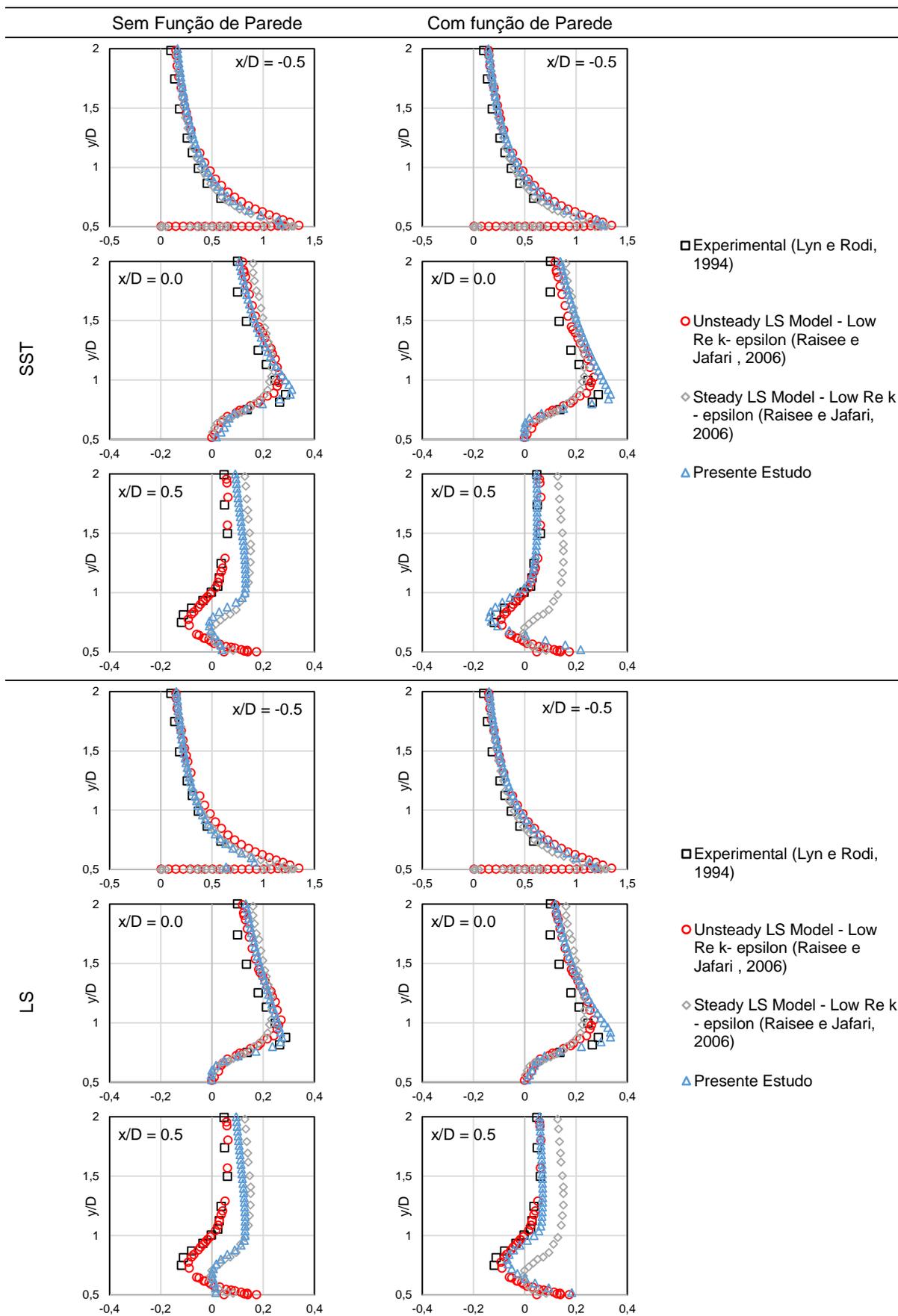
Os perfis de velocidade próximos ao corpo e na região da esteira comparam-se nas Tabelas 17 a 20. Na Tabela 17, apresentam-se os perfis de velocidade na direção x (U) para  $x/D = -0,5, 0,0$  e  $0,5$  e na Tabela 18 para  $x/D = 1,0, 2,5$  e  $6,0$ . Os perfis de velocidade na direção y (V) são apresentados na Tabela 19 para  $x/D = -0,5, 0,0$  e  $0,5$  e na Tabela 20 para  $x/D = 1,0, 2,5$  e  $6,0$ . Os resultados apresentados são comparados com dados experimentais de Lyn e Rodi (1994) e dados numéricos do modelo *Low-Re* LS transiente e permanente de Raisee e Jafari (2006). Observou-se nos perfis de velocidade de U (Tabela 17) que para  $x/D = -0,5, 0,0$  e  $0,5$  tem-se uma boa concordância entre os dados numéricos e experimentais e as funções de parede praticamente não influenciam nos resultados do modelo SST e tem pouca influência nos resultados do modelo LS. Já para  $x/D = 1,0, 2,5$  e  $6,0$  (Tabela 18), à medida que se afasta do corpo a acurácia do resultado diminui, tendo uma melhor concordância para aqueles que consideram a função de parede. Para os perfis de velocidade de V (Tabela 19) em  $x/D = -0,5, 0,0$  e  $0,5$  observa-se a influência das funções de parede a partir de  $x/D = 0,5$  para ambos os modelos. Essa influência se estende para os casos  $x/D = 1,0, 2,5$  e  $6,0$  (Tabela 20), exceto para o modelo LS em  $x/D = 2,5$ , em que o resultado sem função de parede supera o resultado com função de parede. É possível avaliar que os resultados com função de parede (WF) ficaram mais próximos dos dados experimentais, implicando na sua adequação ao caso simulado, logo, os casos com função de parede são definidos como os resultados utilizados nas próximas comparações.

Tabela 17 – Perfis de Velocidade U para  $x/D = -0.5, 0.0$  e  $0.5$ 

Fonte: AUTOR (2019)

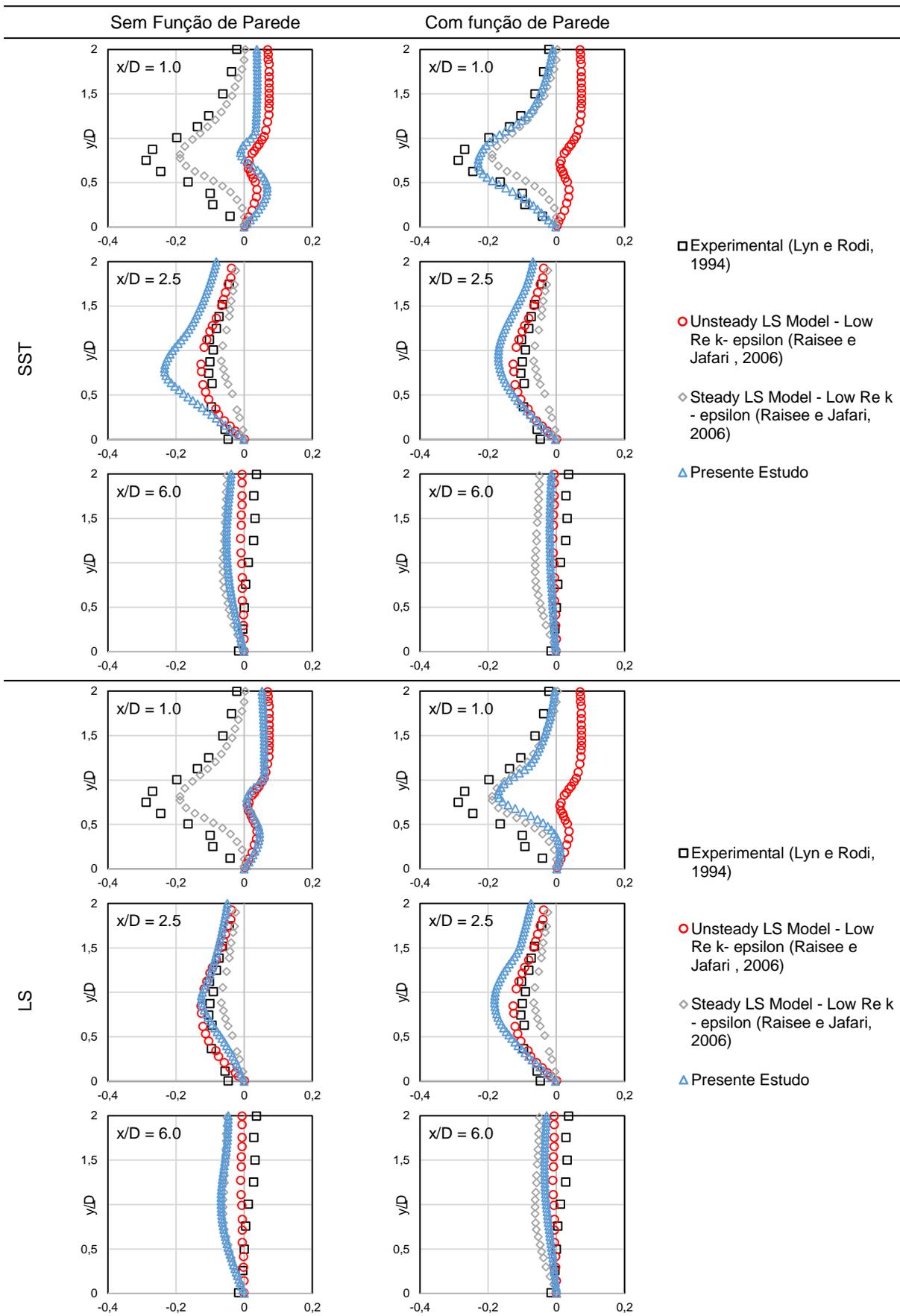
Tabela 18 – Perfis de Velocidade U para  $x/D = 1.0, 2.5$  e  $6.0$ 

Fonte: AUTOR (2019)

Tabela 19 – Perfis de Velocidade V para  $x/D = -0.5, 0.0$  e  $0.5$ 

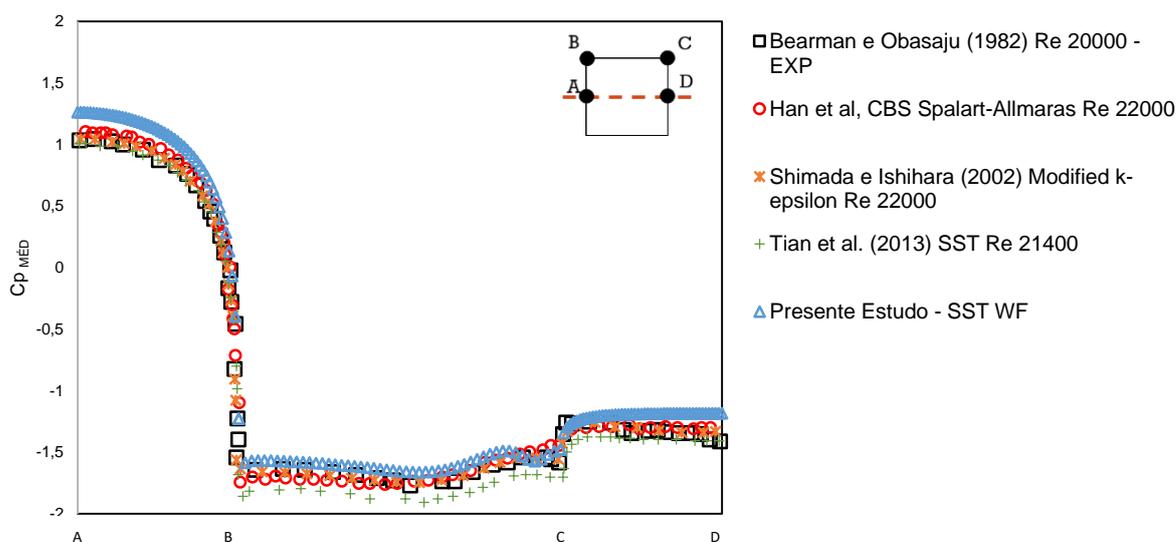
Fonte: AUTOR (2019)

Tabela 20 – Perfis de Velocidade V para  $x/D = 1.0, 2.5$  e  $6.0$



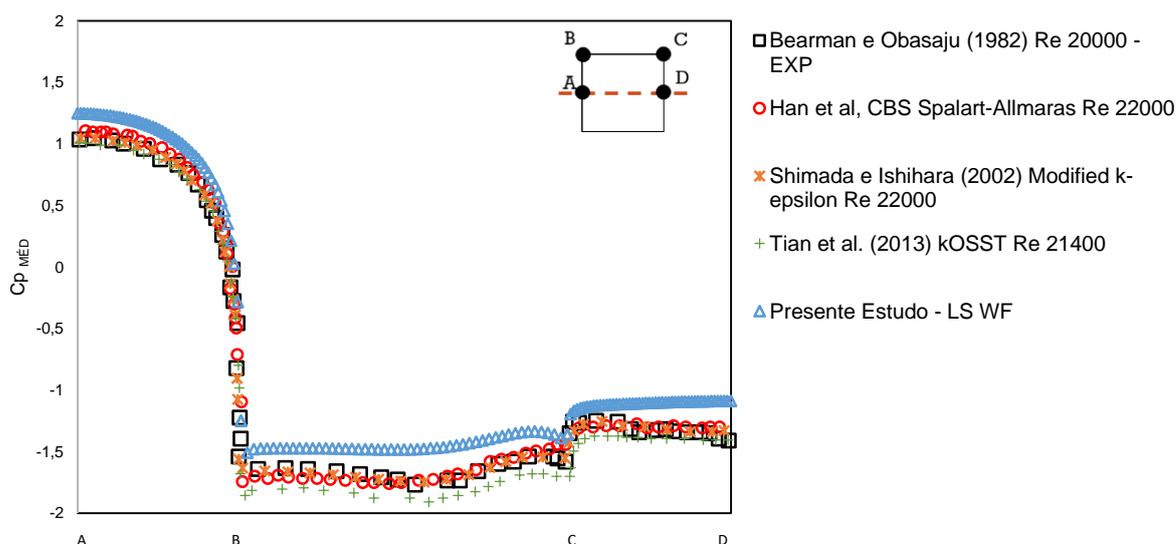
A seguir apresenta-se a distribuição do coeficiente médio de pressão ao longo da metade superior do corpo para os modelos de turbulência SST WF (Gráfico 2) e LS WF (Gráfico 3). Ambos os casos superestimam o ponto de estagnação ( $C_p = 1,0$ ) mas apresentam um bom resultado e acompanham a distribuição dos dados numéricos e experimentais, exceto para o caso LS que fica um pouco acima dos dados apresentados.

Gráfico 2 – Coeficiente de Pressão médio para o modelo SST



Fonte: AUTOR (2019)

Gráfico 3 – Coeficiente de Pressão médio para o modelo LS

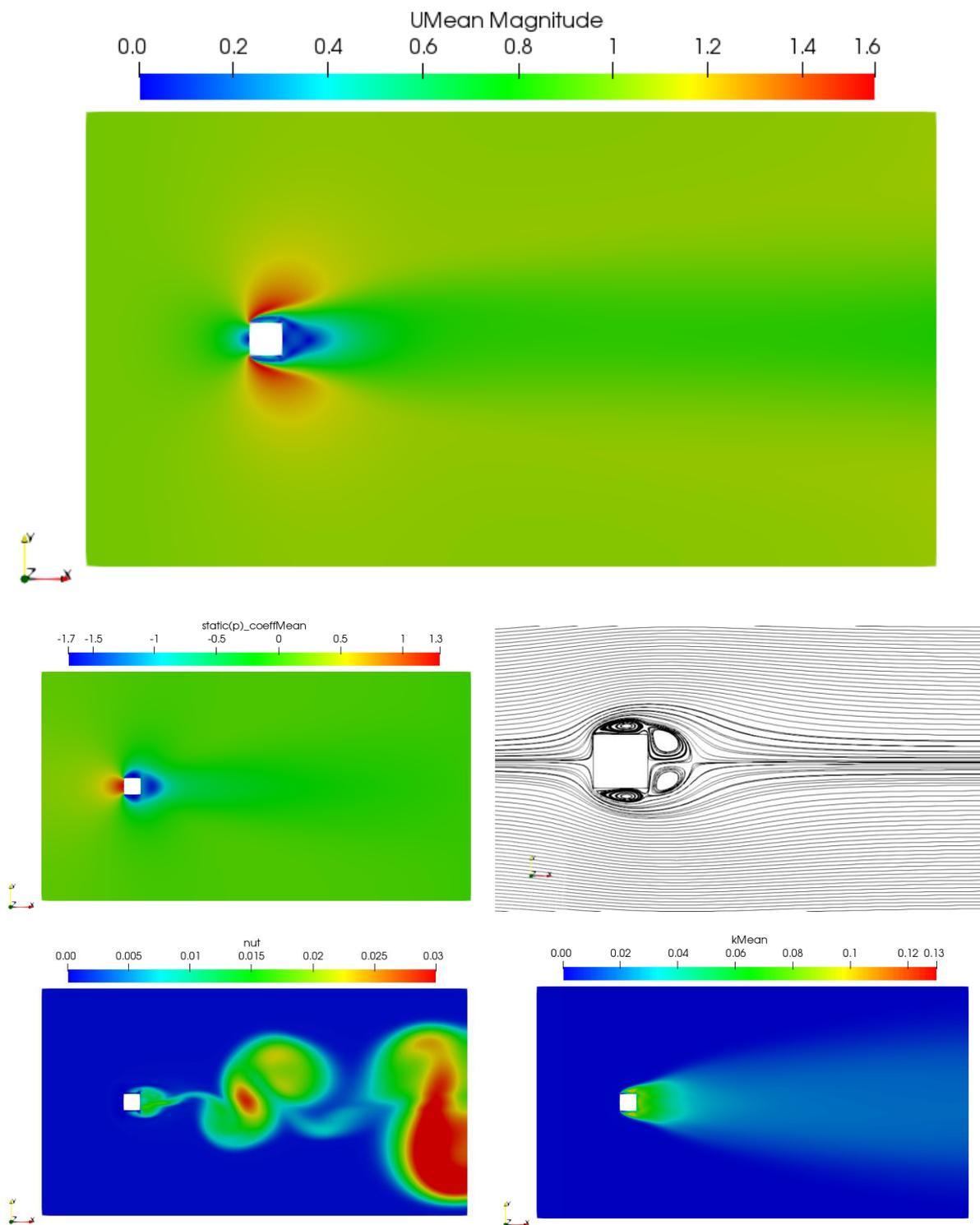


Fonte: AUTOR (2019)

Nas Figuras 23 e 24, apresentam-se as visualizações dos campos médios de velocidade, distribuição de coeficiente de pressão médio, linhas de corrente para o

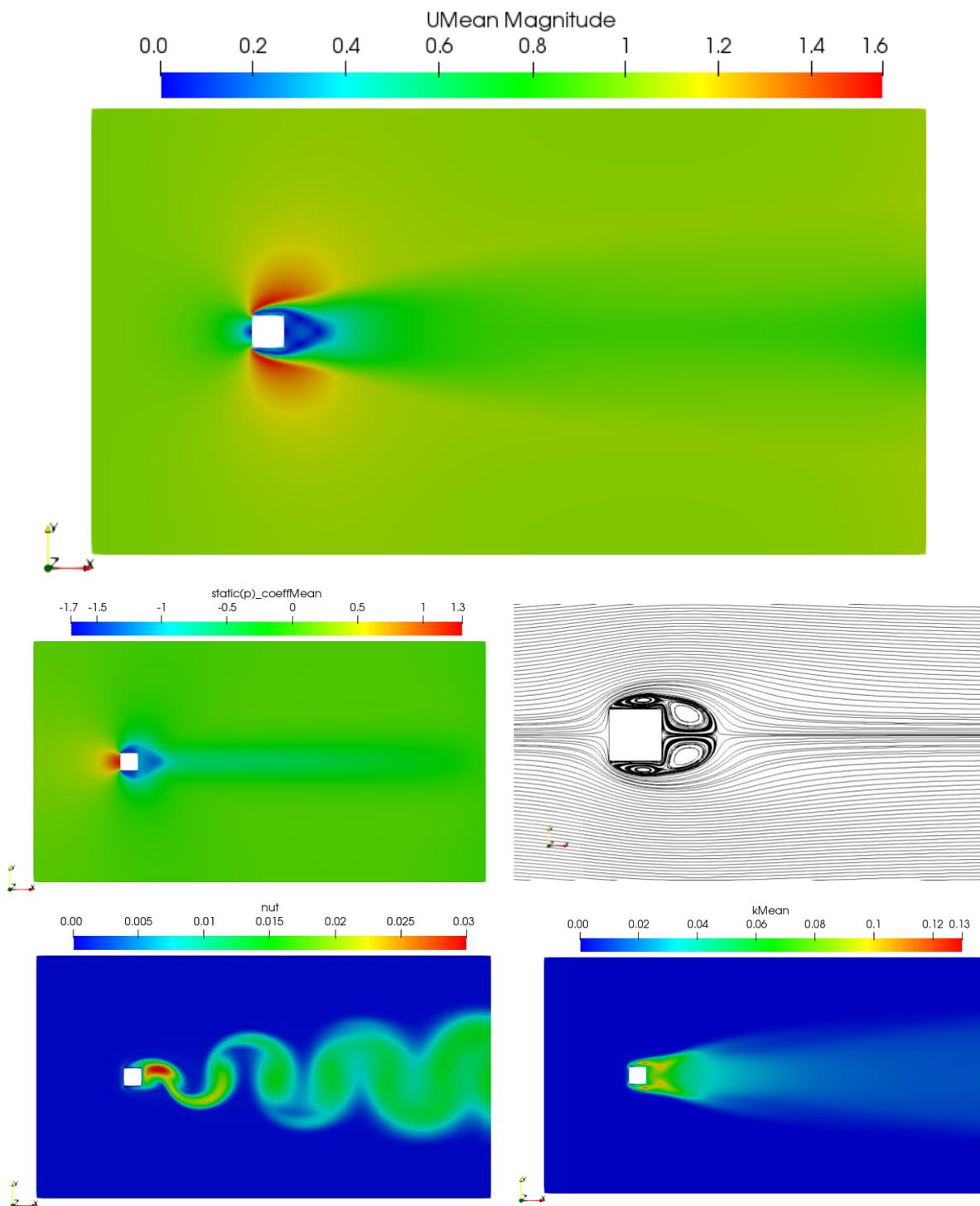
campo de velocidade médio, viscosidade turbulenta instantânea e a distribuição de energia cinética turbulenta média para os modelos SST WF e LS WF, respectivamente. É possível visualizar através das linhas de corrente a recirculação do escoamento à jusante do corpo, bem como a topologia do escoamento para os diferentes modelos apresentados. Nota-se o aparecimento de vórtices na parte superior e inferior do cilindro e um par de vórtices simétricos à jusante do corpo em ambos os casos. O modelo LS apresenta energia cinética turbulenta mais elevada próxima ao corpo. A viscosidade turbulenta apresenta maior difusividade no modelo SST em relação ao modelo LS, e para ambos os casos, os campos de velocidade e pressão tem comportamento esperado, sendo máxima pressão e velocidade nula no ponto de estagnação na parte frontal do corpo.

Figura 23 – Visualização dos campos de velocidade média, coeficiente de pressão médio, linhas de corrente, viscosidade turbulenta instantânea e distribuição de energia cinética turbulenta média para o modelo SST WF



Fonte: AUTOR, 2019

Figura 24 – Visualização dos campos de velocidade média, coeficiente de pressão médio, linhas de corrente, viscosidade turbulenta instantânea e distribuição de energia cinética turbulenta média para o modelo LS WF



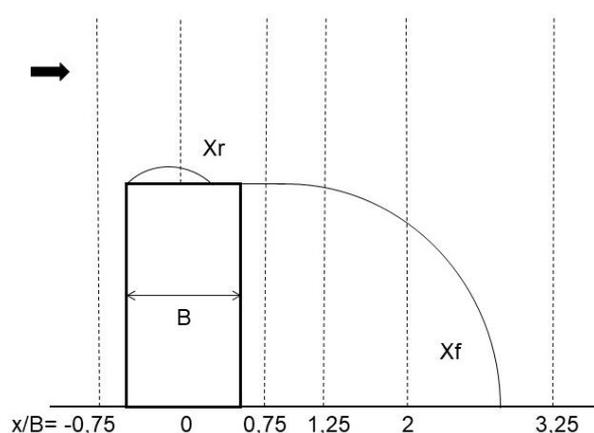
Fonte: AUTOR, 2019

## 6.2 PRÉDIO ISOLADO 1:1:2

Para o estudo da convergência de malha em um problema tridimensional com o *OpenFOAM* analisa-se o caso do prédio isolado com razão de aspecto 1:1:2 simulado com o modelo de turbulência RNG.

Foram utilizadas as medidas das regiões de recirculação conforme apresentado na Figura 25, onde  $X_r$  é referente a região de recirculação da parte superior do prédio relativa ao telhado e  $X_f$  é referente a região de recirculação que se forma à jusante do prédio.

Figura 25 – Detalhe das regiões de recirculação e dos perfis de velocidade



Fonte: AUTOR 2019

Os resultados dos valores das regiões de recirculação obtidos com as malhas M1, M2 e M3 em comparação com resultados numéricos e experimental são apresentados na Tabela 21. Observa-se que para os três casos simulados há uma pequena diferença entre os valores de  $X_r$ , enquanto que para  $X_f$  é apresentado uma grande variação de M1 para M2, enquanto que o valor fica praticamente constante de M2 para M3. Quando comparado com os dados numéricos e experimentais apresentados por outros autores observa-se que em todos os casos onde foi empregado a modelagem RANS os valores de  $X_f$  foram superestimados, enquanto que a modelagem LES apresentou uma melhor concordância com os resultados experimentais em relação à modelagem RANS.

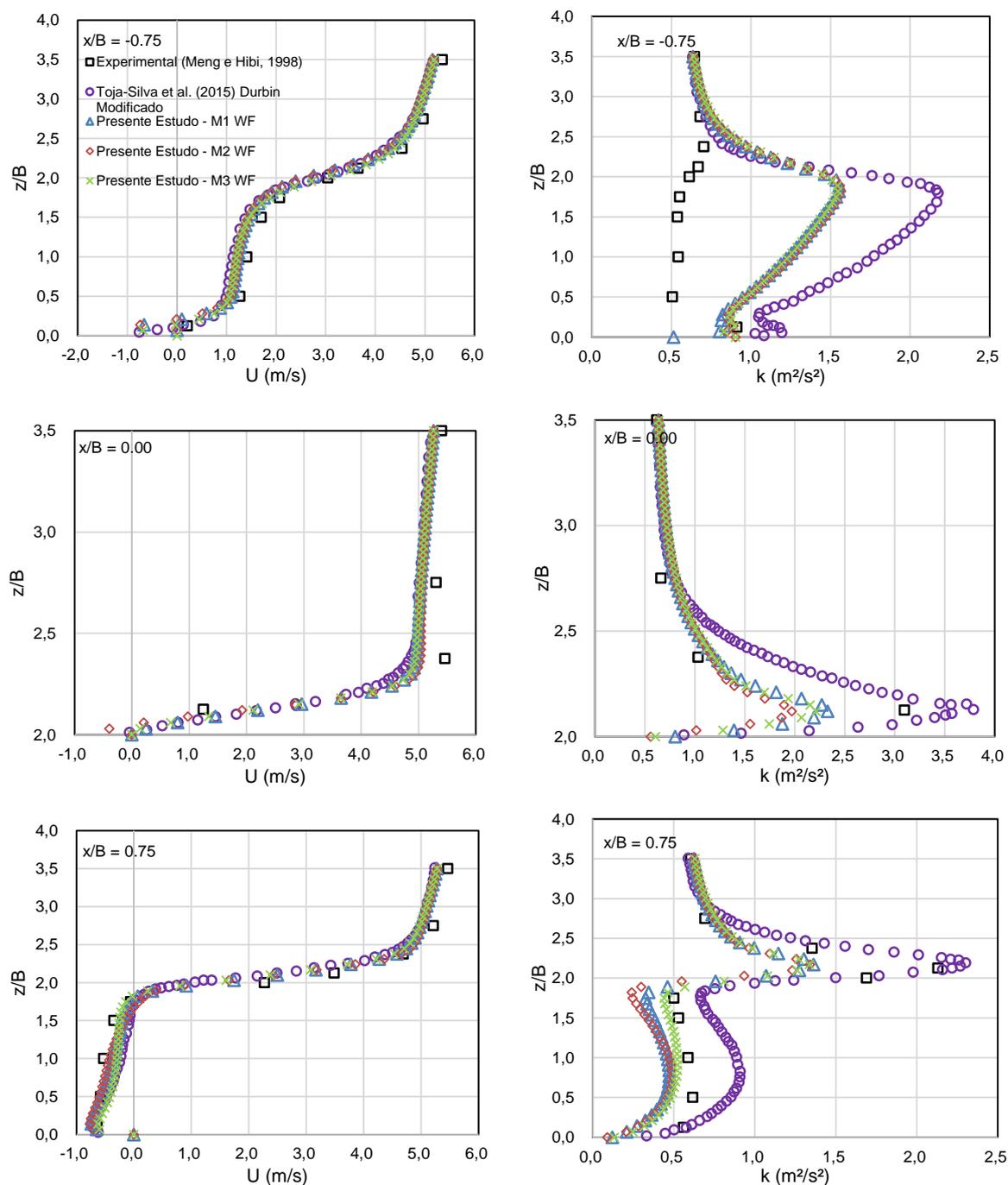
Tabela 21 – Comparação dos resultados das regiões de recirculação do presente trabalho com resultado experimental e numéricos

Referência		Xr/B	Xf/B
Presente Estudo - RNG WF (2019)	M1	0,70	3,23
	M2	0,67	2,98
	M3	0,64	3,00
Experimental - Meng e Hibi (1998)		0,52	1,42
Tominaga <i>et al.</i> (2008) - LES		0,50	2,10
Gousseau, Blocken e Van Heijst (2013) - LES		0,59-0,75	1,57-1,90
Tominaga (2015) - RNG modificado URANS		0,84	2,90
Tominaga (2015) - RNG SRANS		0,60	3,05
Toja-Silva <i>et al.</i> (2015a) - RNG		0,62	-
Toja-Silva <i>et al.</i> (2015a) - Durbin Modificado		0,52	-

Fonte: AUTOR, 2019

Na Figura 26, mostram-se para as três malhas os perfis de velocidade e de energia cinética turbulenta no plano  $y/B = 0$  para  $x/B = -0,75, 0,0$  e  $0,75$ . Também, foram traçados os resultados experimentais de Meng e Hibi (1998) e numérico de Toja-Silva *et al.* (2015a). Os resultados de velocidade apresentam uma boa concordância com dados experimentais e numéricos, enquanto que existe dificuldade na predição da energia cinética turbulenta devido as limitações da modelagem RANS empregada. No entanto, observa-se que a malha M3 apresenta a melhor concordância com os dados experimentais, sendo por isso utilizada para comparação com outros trabalhos.

Figura 26 – Comparação dos resultados dos perfis de Velocidade U e energia cinética turbulenta k com resultado numérico e experimental no plano  $y/B=0,0$  para  $x/B = -0,75, 0,0$  e  $0,75$

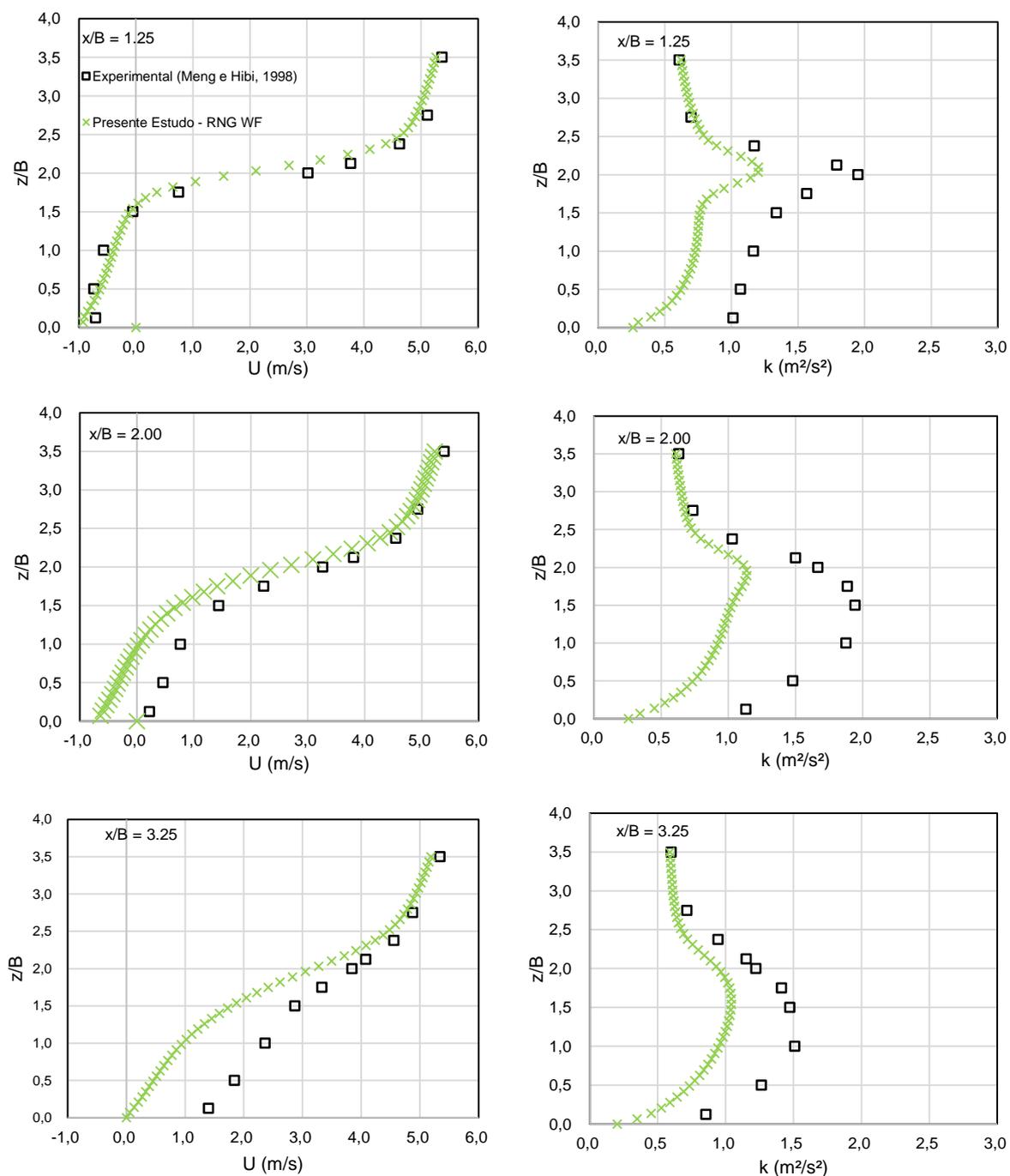


Fonte: AUTOR, 2019

Mostram-se na Figura 27, os perfis de velocidade e de energia cinética turbulenta obtidos com a malha M3 no plano  $y/B = 0,0$  para  $x/B = 1,25, 2,0$  e  $3,25$  e sua comparação com o resultado experimentais de Meng e Hibi (1998). Os resultados de velocidade apresentam valores semelhantes aos experimentais nas proximidades do corpo, entretanto, observa-se uma divergência em relação ao resultado

experimental quando afasta-se do corpo. Com relação a energia cinética turbulenta observa-se que apesar do perfil numérico ter uma forma parecida com o perfil experimental, o modelo não consegue capturar com acurácia os picos apresentados.

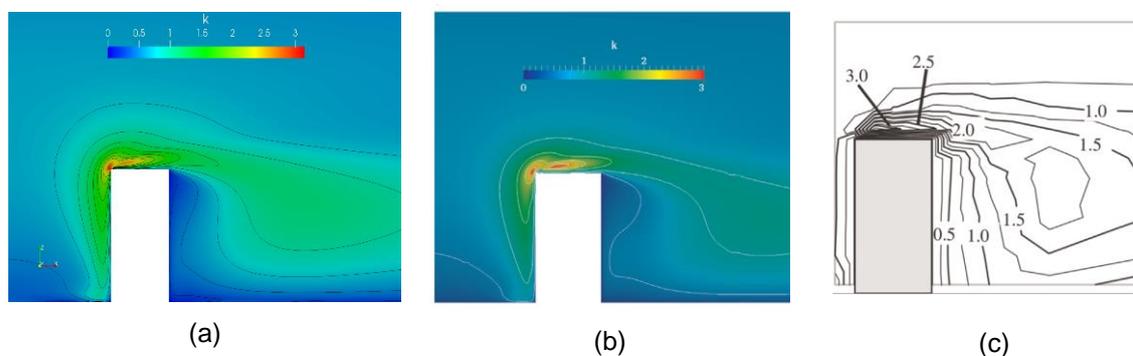
Figura 27 - Comparação dos resultados dos perfis de Velocidade U e energia cinética turbulenta k com resultado experimental no plano  $y/B=0,0$  para  $x/B = 1,25, 2,0$  e  $3,25$



Fonte: AUTOR, 2019

Na Figura 28, apresenta-se no plano  $y/B=0$  a distribuição de energia cinética turbulenta próximo ao corpo e a comparação com o resultado numérico do modelo RNG empregado por Toja-Silva *et al.* (2015a) e o resultado experimental apresentado por Tominaga *et al.* (2008) baseado nos dados de Meng e Hibi (1998). Observa-se que os valores da escala dos resultados numéricos concordam e variam entre 0 (cor azul escuro) e 3 (cor vermelha). É possível notar a captura de um pico de energia na parte superior do corpo (telhado do prédio), sendo também observado no resultado experimental com o mesmo valor.

Figura 28 – Comparação do resultado energia cinética turbulenta (a) no plano  $y/B= 0,0$  com resultado numérico de Toja-Silva *et al.* (2015a) (b) e experimental de Meng e Hibi (1998) (c)



Fonte: AUTOR, 2019

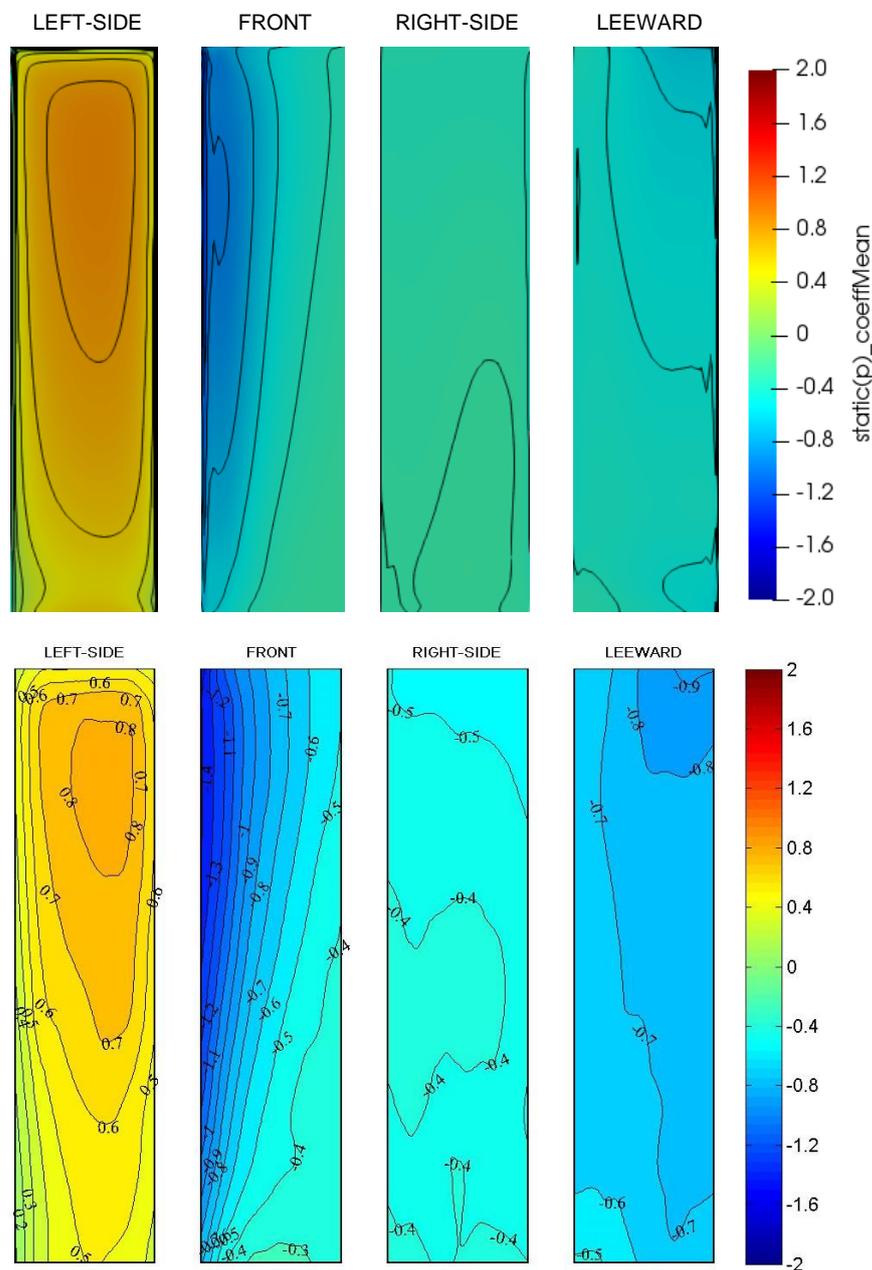
### 6.3 ESTUDO DE CASO: PRÉDIOS PARALELOS 1:1:4

No estudo do escoamento entre dois prédios paralelos analisa-se como as distribuições de velocidade, pressão e intensidade de turbulência são influenciadas pelos raios de curvatura inseridos na parte interna dos edifícios e o ângulo incidente do escoamento. O banco de dados da TPU fornece para o prédio principal os valores da distribuição de pressão induzida pela presença do prédio vizinho. As faces da edificação são nomeadas como *front*, *leeward*, *left side* e *right side* de acordo com o sistema de referência adotado pela TPU. Para facilitar a comparação dos resultados, as faces do resultado numérico foram nomeadas de acordo com o resultado experimental.

Inicialmente, comparam-se as distribuições do coeficiente médio de apresentadas pelo TPU e os resultados numéricos obtidos no presente trabalho para

$\theta = 0^\circ$  (Figura 29) e  $15^\circ$  (Figura 30) com  $r/B = 0,0$ . Os resultados numéricos apresentam isolinhas de pressão constante que variam num intervalo de 0,20 para as faces *left side* e *front* e 0,10 para as faces *right side* e *leeward*.

Figura 29 – Comparação do resultado numérico com o experimental para  $r/B = 0,0$  e  $\theta = 0^\circ$

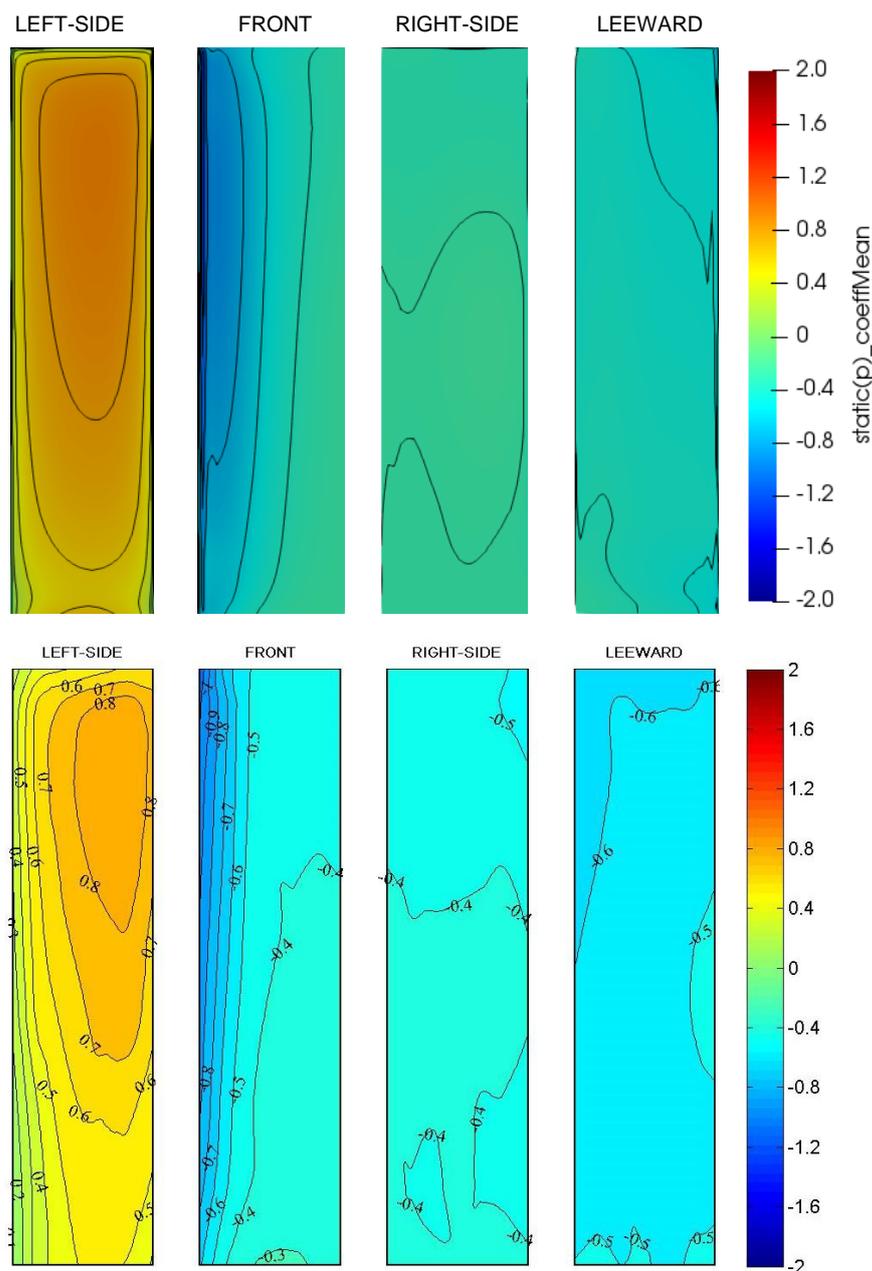


Fonte: AUTOR, 2019

É possível observar, na Figura 29, a simetria das isolinhas de pressão constante nas faces frontais dos prédios e a boa concordância entre o resultado numérico e experimental. Os valores de pico do resultado experimental e a topologia do escoamento são eficientemente capturados. Já para a Figura 30, devido ao ângulo

de incidência do escoamento observam-se pequenas diferenças entre as isolinhas de pressão apresentadas nas faces dos prédios. O resultado numérico obtido, apresenta uma boa concordância com o resultado experimental principalmente na distribuição de pressão ao longo das faces onde encontram-se os maiores gradientes de pressão, *Left Side* e *Front*.

Figura 30 – Comparação do resultado numérico com o experimental para  $r/B=0,0$  e  $\theta = 15^\circ$

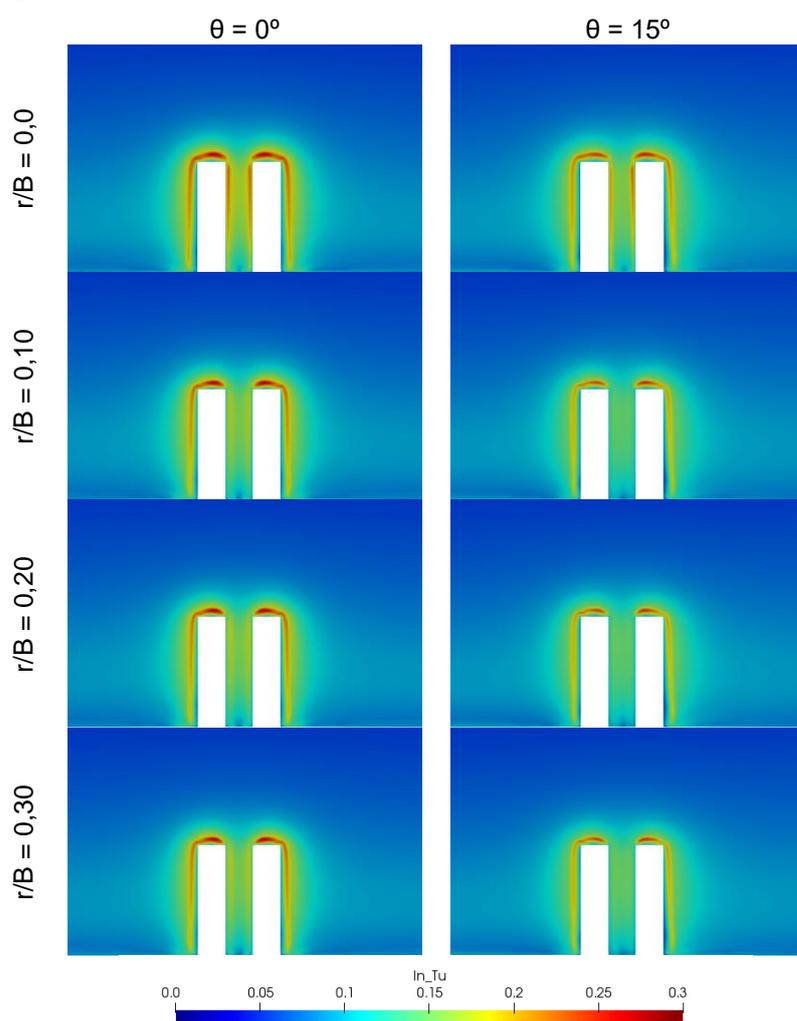


Fonte: AUTOR, 2019

Na Figura 31, apresentam-se no plano de simetria  $zy$  em  $x = 0$  a intensidade de turbulência para os dois ângulos de incidência e as quatro arestas laterais

arredondadas ( $r/B = 0,0, 0,10, 0,20$  e  $0,30$ ). Pode-se perceber que no topo dos prédios existe uma região de alta turbulência. Essa região não é afetada pelo valor de  $r/B$  e diminui levemente à medida que o ângulo incidente aumenta. Na passagem entre os prédios observa-se uma diminuição da intensidade de turbulência conforme o valor de  $r/B$  aumenta. Pierik *et al.* (1999) aborda que quando a intensidade da turbulência ultrapassa 15%, os esforços de fadiga devem ser reavaliados no local aonde os aerogeradores foram instalados. Toja-Silva *et al.* (2015a) recomenda para índice de turbulência menores a 15% o emprego de turbinas do tipo *HAWT*, já quando esse valor ultrapassar 15% recomenda-se a instalação de turbinas do tipo *VAWT*. Isso ocorre porque turbinas do tipo *VAWT* não são afetadas pela direção do vento e resistem melhor as flutuações da velocidade.

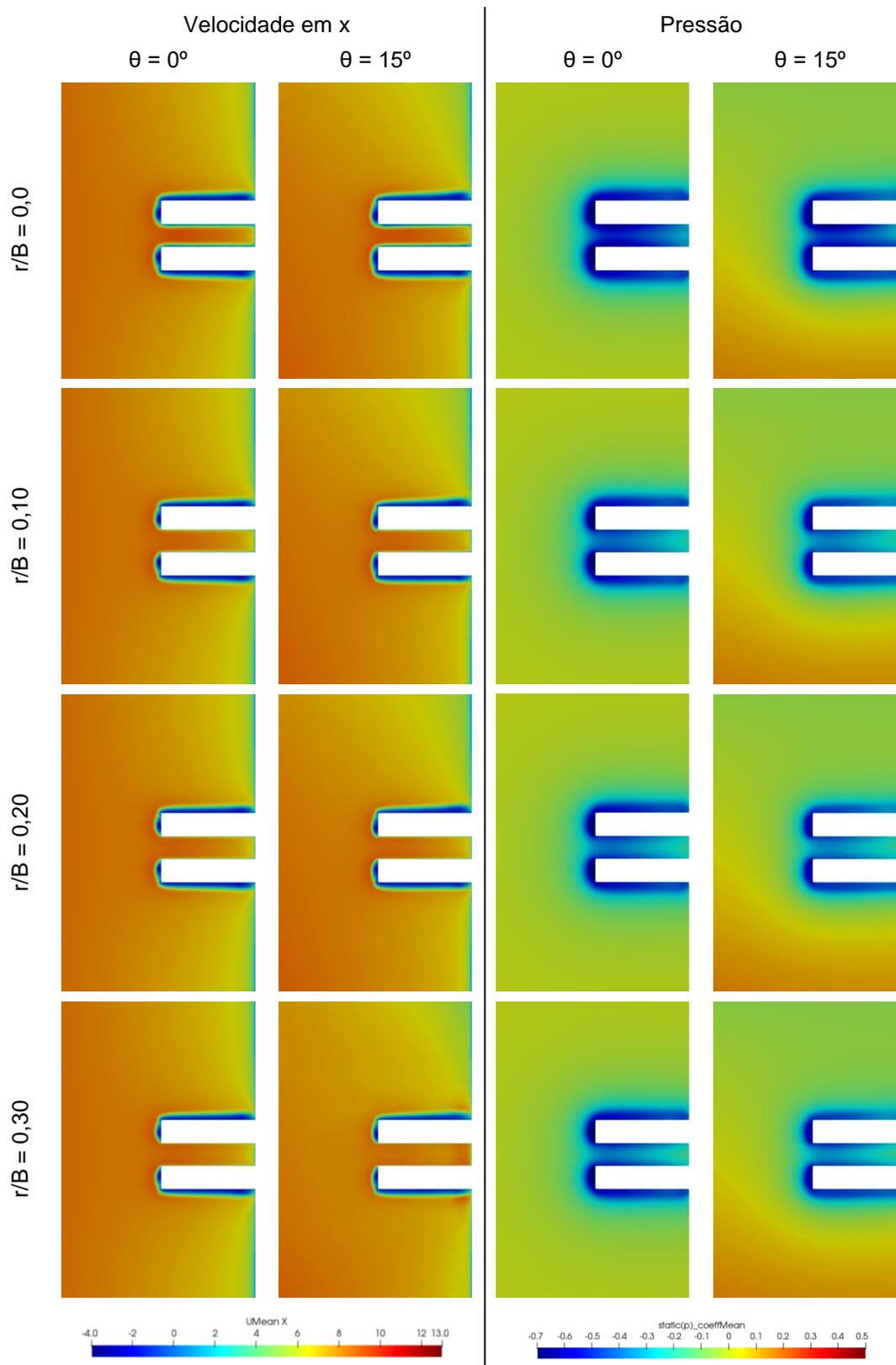
Figura 31– Intensidade de turbulência no plano de simetria  $zy$  em  $x=0$



Fonte: AUTOR, 2019

Para o plano de simetria  $zy$  em  $x = 0$ , também apresentam-se a distribuição de pressão através do coeficiente de pressão médio e a distribuição da velocidade na direção  $x$ , (Figura 32). Nota-se que existe uma região de baixa pressão ao redor da edificação. Também, observa-se que existe assimetria na distribuição de pressão devido ao ângulo incidente. Com relação a velocidade, observa-se uma região de recirculação formada no topo e nas laterais externas das edificações sendo menos intensa ou inexistente na região entre os prédios.

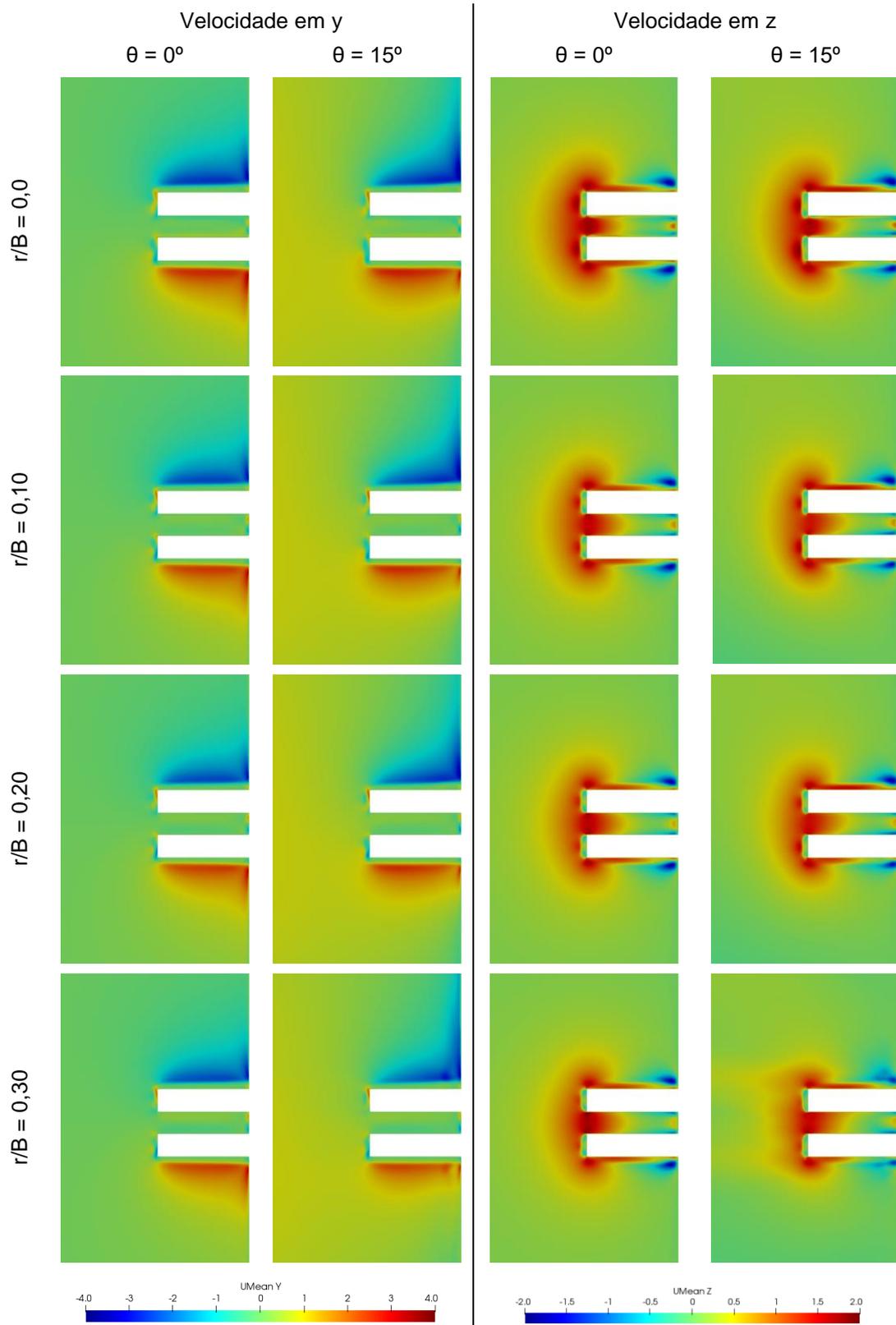
Figura 32 – Distribuição de velocidade em x e distribuição de pressão no plano de simetria zy em x=0



Fonte: AUTOR, 2019

Na Figura 33, mostram-se as distribuições das componentes da velocidade nas direções  $y$  e  $z$  no plano de simetria  $zy$  para  $x = 0$ . Para a componente da velocidade na direção em  $y$ , percebe-se no topo das edificações regiões com velocidade em sentidos contrários indicando a formação de vórtices nessa região. Observa-se nos casos de  $\theta = 15^\circ$  a assimetria do escoamento. Para a componente da velocidade na direção em  $z$ , observa-se nos casos de  $\theta = 15^\circ$  a assimetria do escoamento. Nota-se no topo e na base das edificações regiões onde a velocidade tem sentidos contrários indicando a formação de vórtices nessa região.

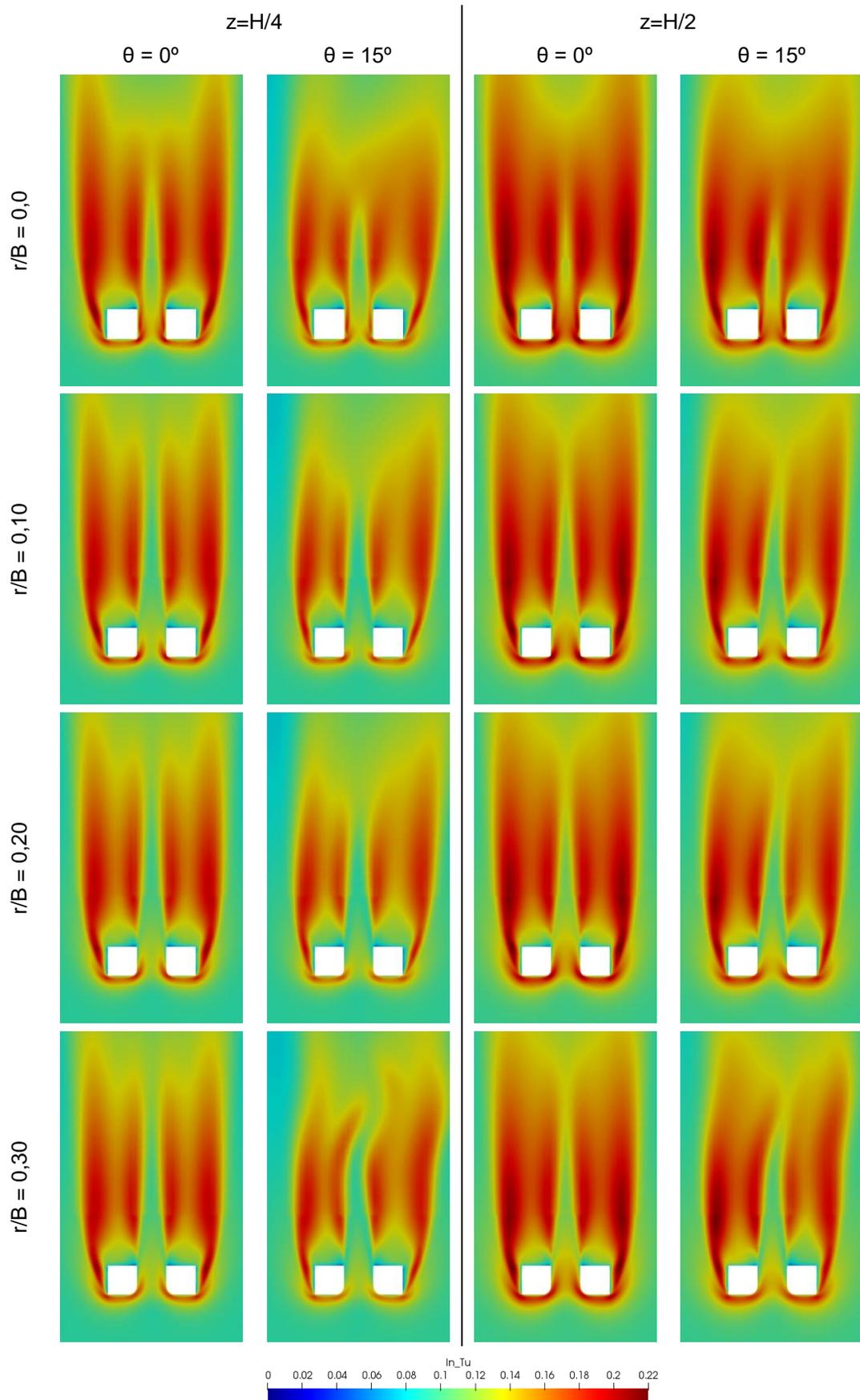
Figura 33 – Distribuição de velocidade em y e z no plano de simetria zy em  $x=0$



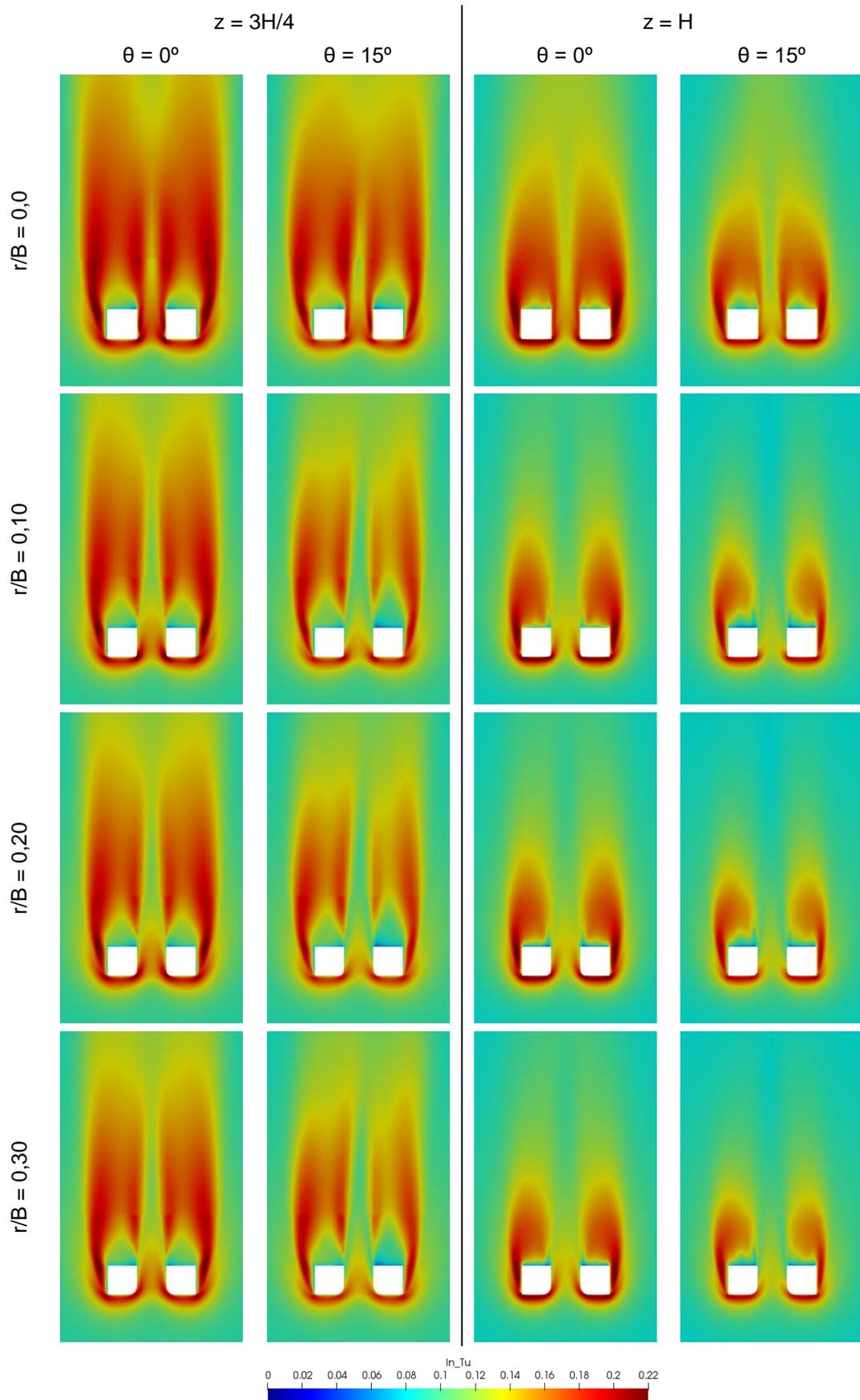
Fonte: AUTOR, 2019

Analisa-se a topologia do escoamento ao longo de quatro planos  $xy$  com  $z$  igual a  $H/4$ ,  $H/2$ ,  $3H/4$  e  $H$ . Nas Figuras 34 e 35, apresenta-se a intensidade da turbulência para os quatro planos com valores de  $z$  constante em função do ângulo de incidência e do raio adimensional ( $r/B$ ). Pode-se observar, que a intensidade aumenta de  $H/4$  para  $H/2$  e diminui nos planos seguintes,  $3H/4$  e  $H$ . À medida que o valor do raio aumenta a turbulência diminui. Com o aumento do ângulo de incidente observa-se a assimetria na distribuição da intensidade ao longo da região da esteira.

Figura 34 – Intensidade de turbulência para o plano xy em  $z = H/4$  e  $H/2$

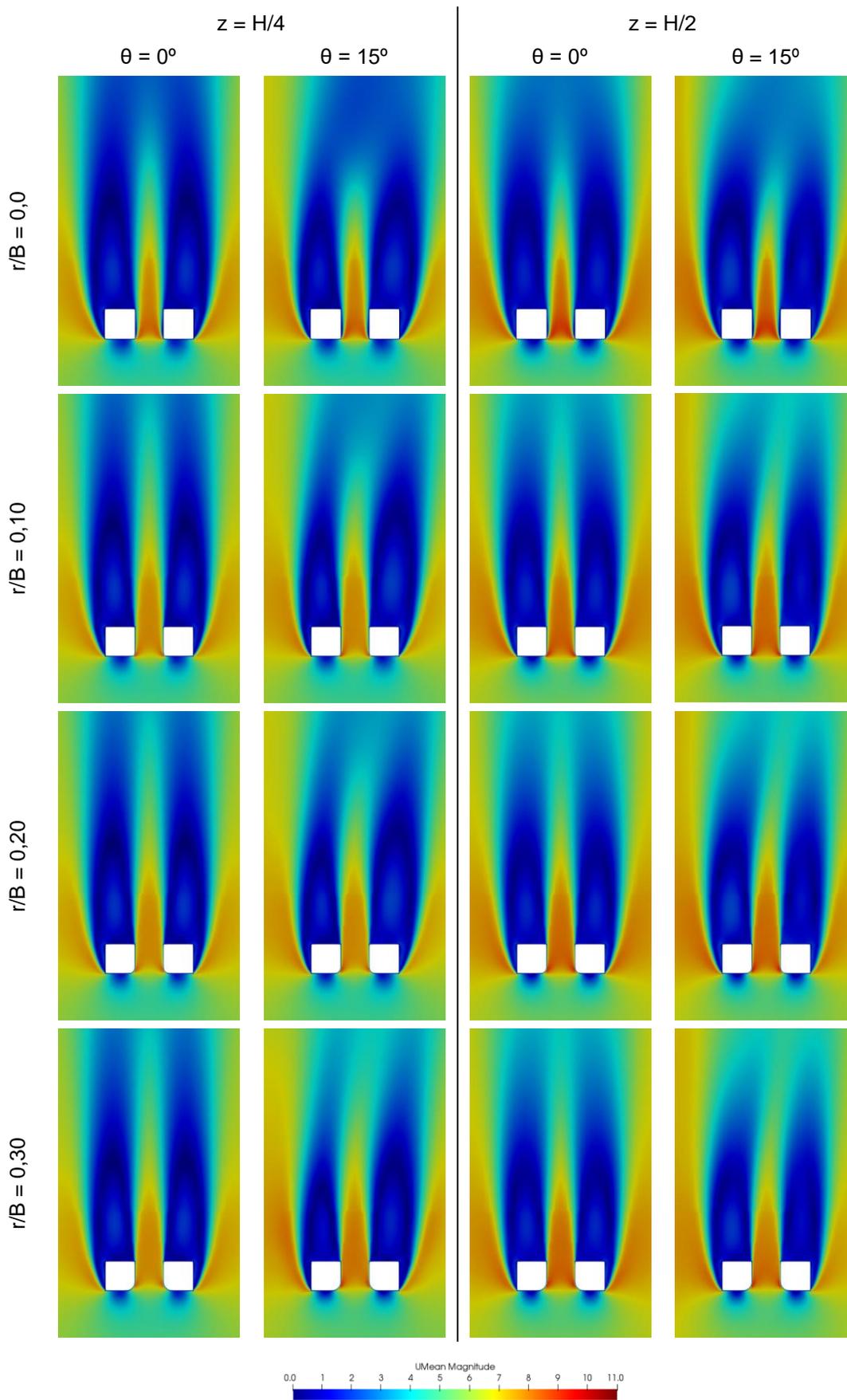


Fonte: AUTOR, 2019

Figura 35 - Intensidade de turbulência para o plano xy em  $z = 3H/4$  e  $H$ 

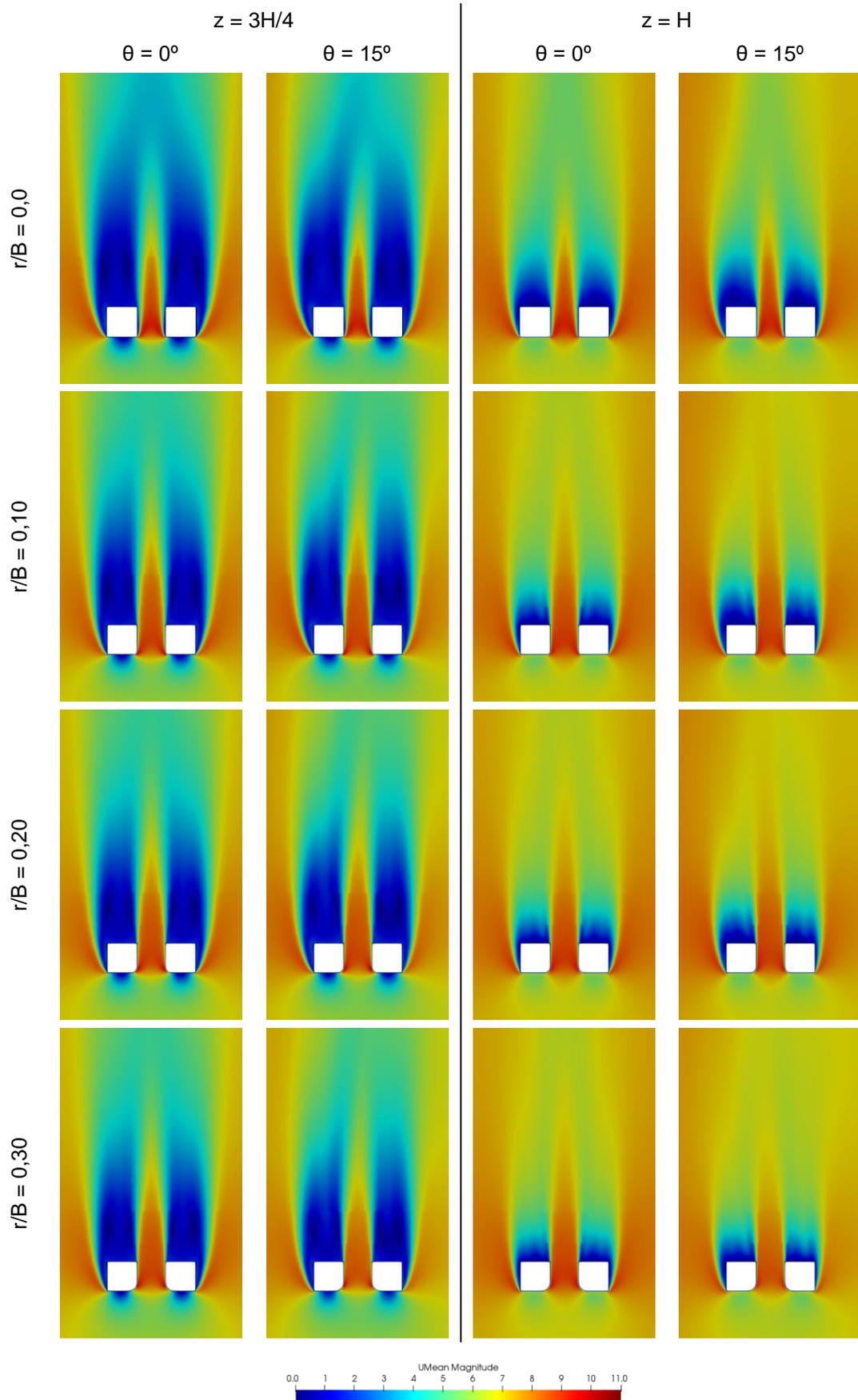
Fonte: AUTOR, 2019

A distribuição de velocidade nos planos  $xy$  com  $z$  igual a  $H/4$ ,  $H/2$ ,  $3H/4$  e  $H$  em função do ângulo de incidência e do raio adimensional ( $r/B$ ) mostram-se nas Figuras 36 e 37. Observa-se que à medida que a altura dos planos cresce, os valores de velocidade aumentam. Com o aumento do valor de  $r/B$  é possível notar uma diminuição na velocidade na passagem entre os prédios. Pode-se observar que a região de baixa velocidade na região da esteira das edificações diminui à medida que se aumenta a altura e o raio adimensional ( $r/B$ ).

Figura 36 – Distribuição da velocidade média para o plano xy em  $z = H/4$  e  $H/2$ 

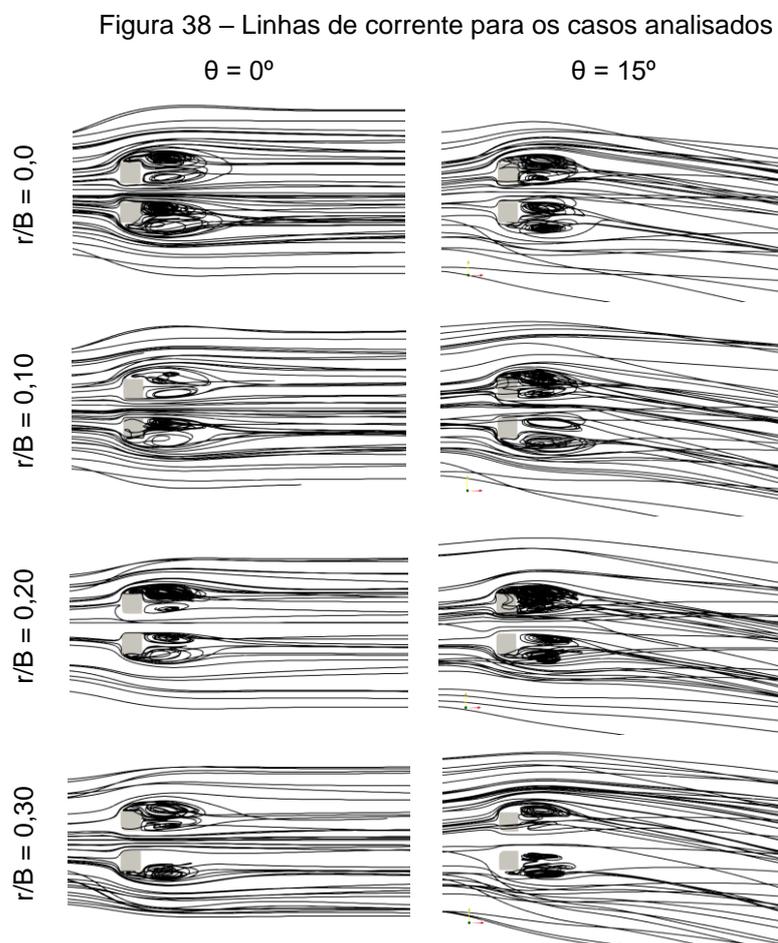
Fonte: AUTOR, 2019

Figura 37 – Distribuição da velocidade média para o plano xy em  $z = 3H/4$  e  $H$



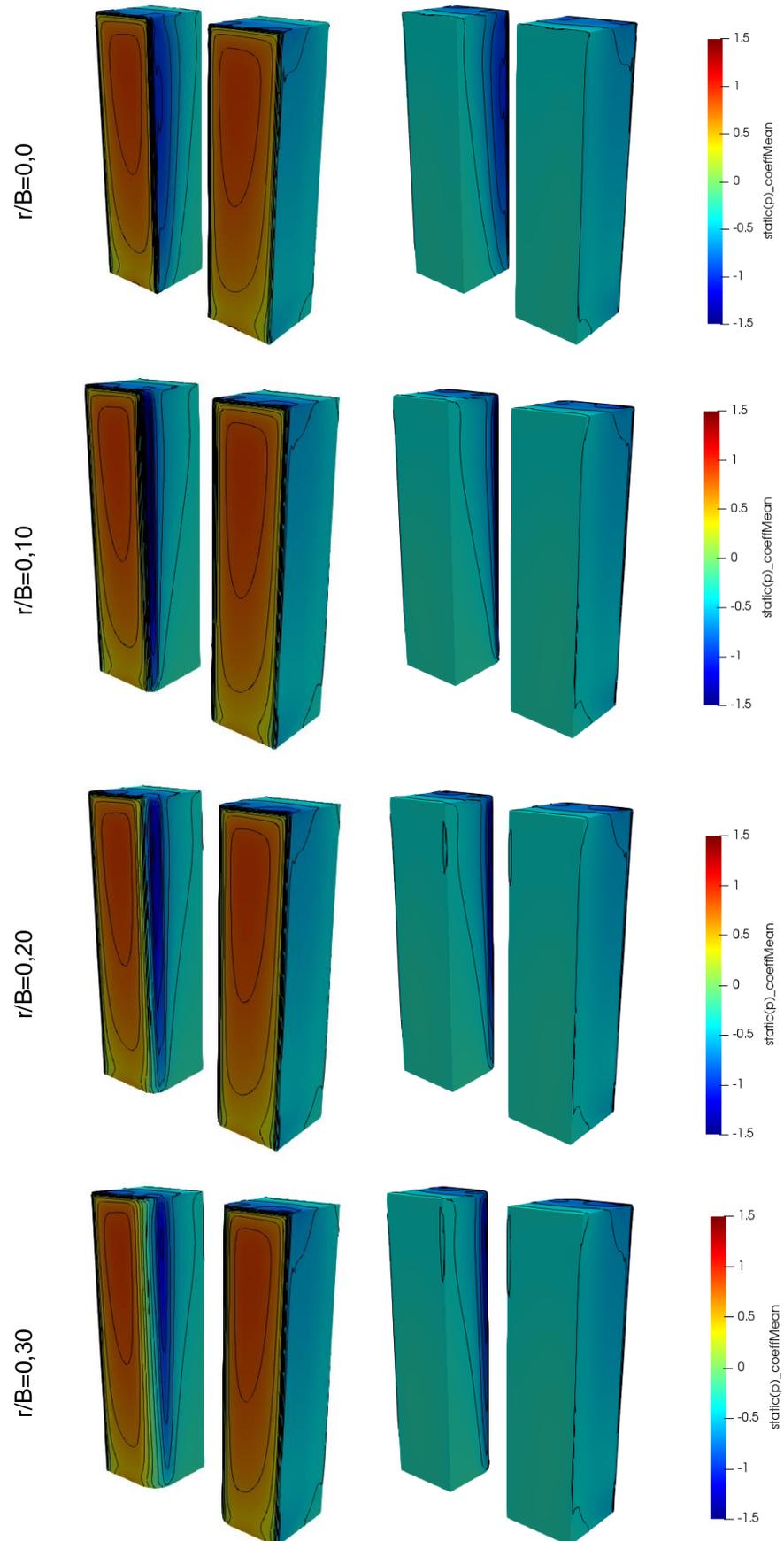
Fonte: AUTOR, 2019

Na Figura 38, mostram-se as linhas de corrente para os oito casos estudados. Observa-se a mudança na região de recirculação à jusante das edificações e a assimetria das linhas de corrente para o ângulo de incidência diferente de zero.

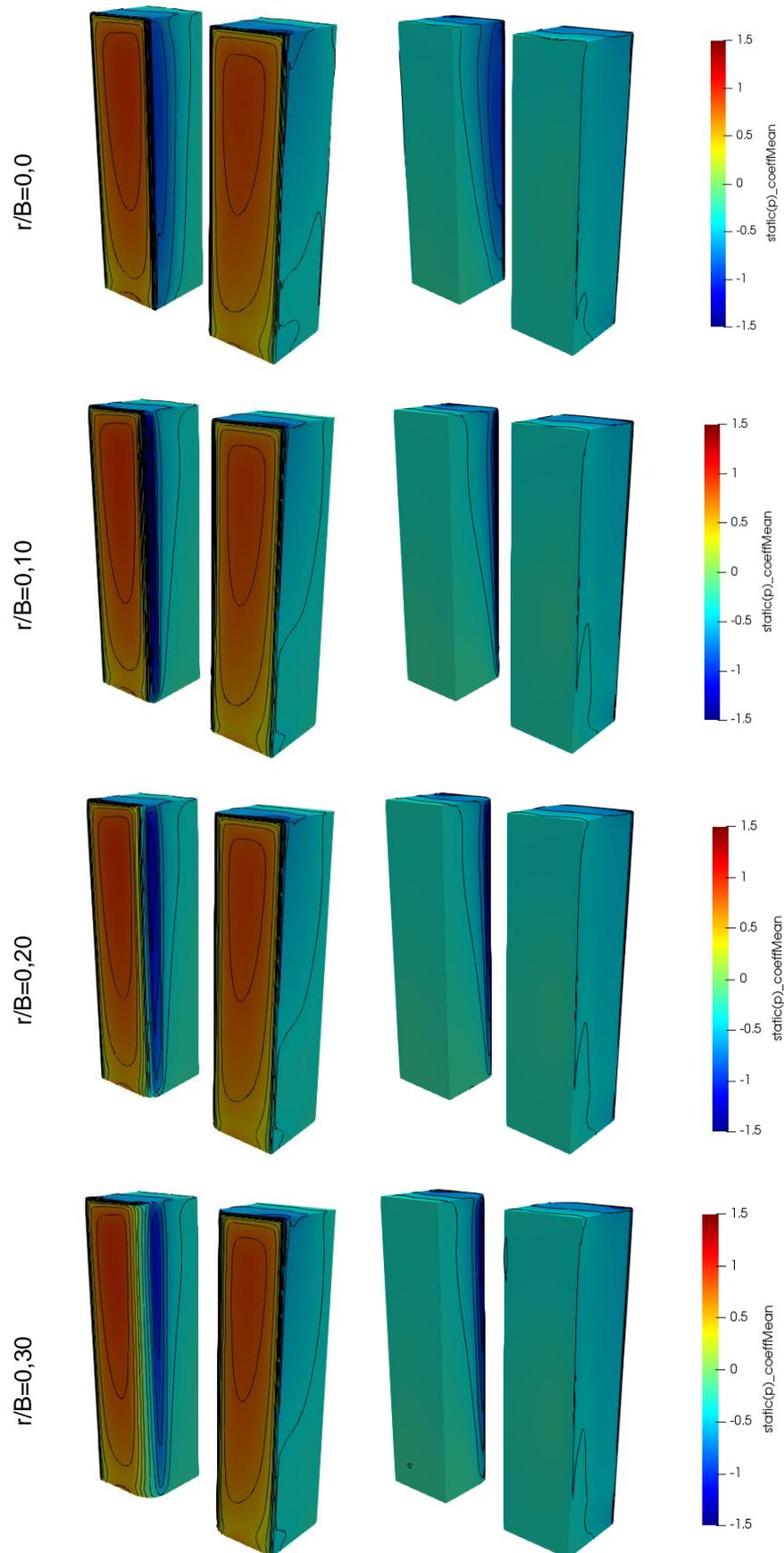


Fonte: AUTOR, 2019

Nas Figuras 39 e 40, apresentam-se as distribuições do coeficiente de pressão nos edifícios em função dos quatro valores dos raios ( $r/B$ ) e dos dois ângulos de incidência  $\theta = 0^\circ$  e  $15^\circ$ . Os resultados apresentam isolinhas de pressão constante que variam num intervalo de 0,20.

Figura 39 – Coeficiente médio de pressão para  $\theta = 0^\circ$ 

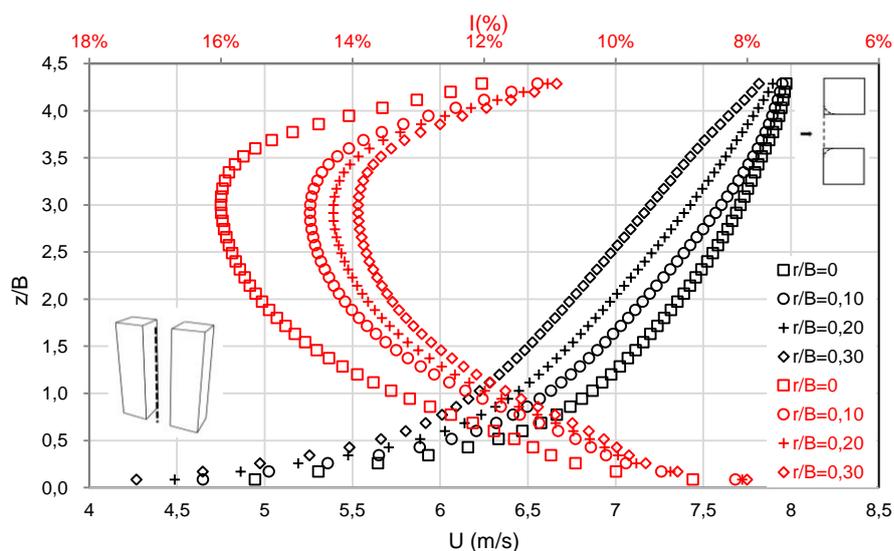
Fonte: AUTOR, 2019

Figura 40 – Coeficiente médio de pressão para  $\theta = 15^\circ$ 

Fonte: AUTOR, 2019

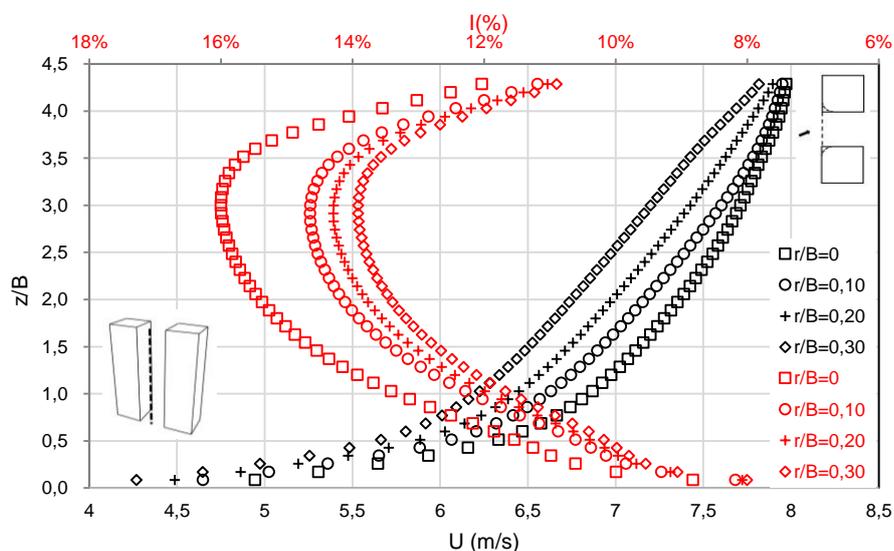
A fim de identificar qual região apresenta as melhores características para a localização dos aerogeradores foram analisados os perfis de velocidade e intensidade de turbulência na passagem entre os dois prédios, ou seja, no plano de simetria  $zx$ . A altura adimensionalizada máxima do prédio está em  $z/B = 4$ . Nos Gráficos 4 e 5, mostram-se ambos perfis para  $x/B = -0,50$  e  $\theta = 0^\circ$  e  $15^\circ$ . Pode-se observar que há uma redução dos valores de velocidade e intensidade de turbulência conforme aumenta-se o raio,  $r/B$ . É importante ressaltar que o menor valor da intensidade da turbulência está localizado próximo a base das edificações. Percebe-se nesta posição ( $x/B = -0,50$ ), que o ângulo de incidência tem pouca influência nos perfis de velocidade e intensidade de turbulência.

Gráfico 4 – Distribuição de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura para  $x/B = -0,50$  e  $\theta = 0^\circ$



Fonte: AUTOR, 2019

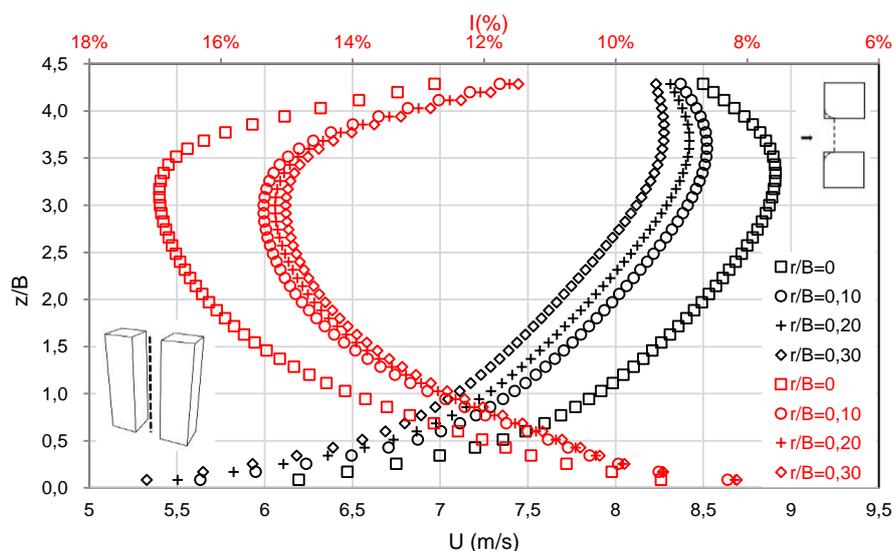
Gráfico 5 – Distribuição de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura para  $x/B=-0,50$  e  $\theta = 15^\circ$



Fonte: AUTOR, 2019

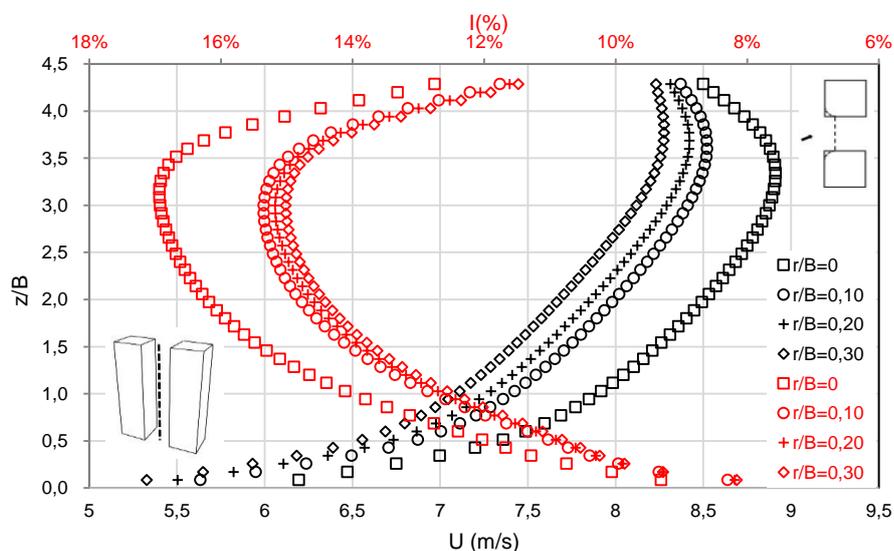
Nos Gráficos 6 e 7 apresentam-se os perfis de velocidade e intensidade de turbulência no plano de simetria  $zx$  para  $x/B=-0,25$  e  $\theta = 0^\circ$  e  $15^\circ$ . Observa-se que há uma redução nos valores de velocidade e turbulência à medida que aumenta-se o raio na borda da edificação. Também, pode-se perceber que os valores de velocidade e turbulência nos perfis são maiores em comparação com a localização  $x/B=-0,50$ .

Gráfico 6 – Distribuição de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura para  $x/B=-0,25$  e  $\theta = 0^\circ$



Fonte: AUTOR, 2019

Gráfico 7 – Distribuição de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura para  $x/B=-0,25$  e  $\theta = 15^\circ$

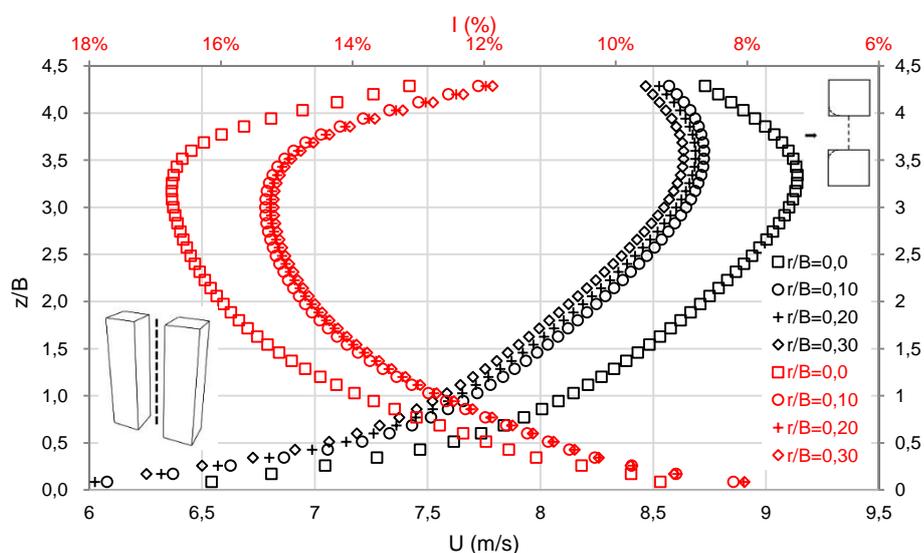


Fonte: AUTOR, 2019

Os perfis de velocidade e intensidade de turbulência no plano de simetria  $zx$  para  $x/B=0,0$  com  $\theta = 0^\circ$  e  $15^\circ$ , mostram-se nos Gráficos 8 e 9. O aumento no valor de  $r/B$ , induz uma redução significativa nos valores da velocidade e intensidade de turbulência independentemente do ângulo de incidência. Percebe-se que os perfis são muito próximos para os valores de raio  $r/B = 0,10, 0,20$  e  $0,30$ .

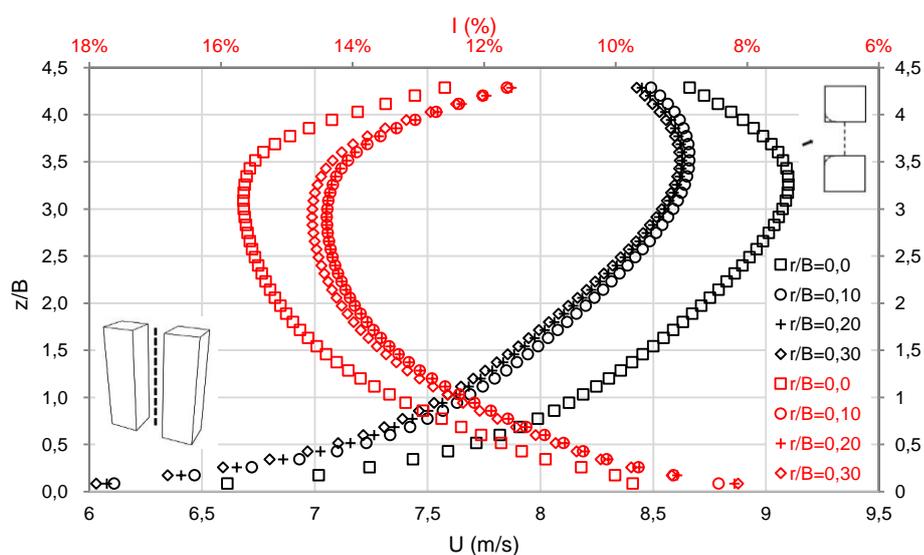
Os valores da velocidade são maiores em comparação com as posições  $x/B=-0,50$  e  $-0,25$ , por sua vez, a intensidade de turbulência não sofreu mudanças significativas com relação a  $x/B=-0,25$ . A intensidade de turbulência se reduz de forma significativa quando o ângulo de incidência aumenta.

Gráfico 8 – Distribuição de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura para  $x/B=0$  e  $\theta = 0^\circ$



Fonte: AUTOR, 2019

Gráfico 9 – Distribuição de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura para  $x/B=0$  e  $\theta = 15^\circ$

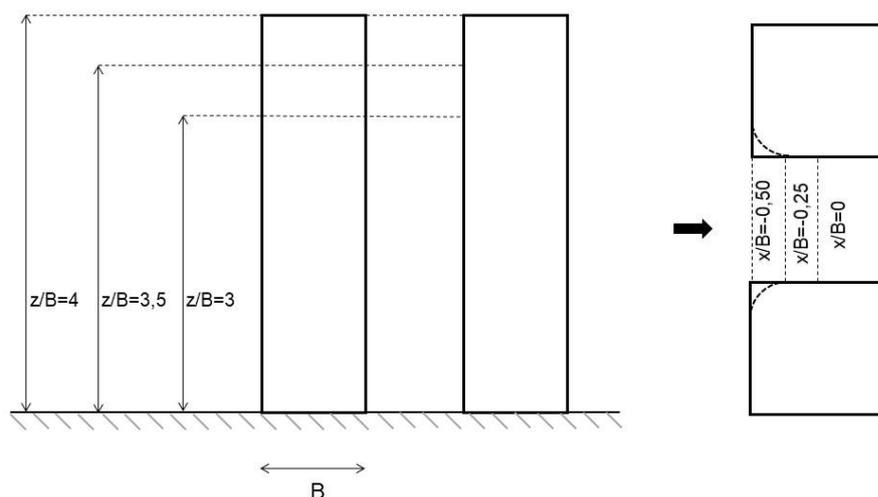


Fonte: AUTOR, 2019

Em função dos resultados apresentados, percebe-se que a melhor relação entre a velocidade e a intensidade de turbulência obtém-se para o caso em que o raio de arredondamento na aresta interna da edificação é igual a  $r/B = 0,10$ . Também, identifica-se que os maiores valores de velocidade encontram-se entre  $z/B = 3$  e  $4$ , portanto, esta região apresenta-se com uma ótima posição para a instalação de um aerogerador.

Com o intuito de verificar que posição de  $x/B$  apresenta as melhores características aerodinâmicas para a instalação de um aerogerador entre as duas edificações, analisam-se os perfis de velocidade e intensidade de turbulência para as cotas de alturas  $z/B = 3, 3,5$  e  $4,0$  nas posições  $x/B = 0, -0,25$  e  $-0,50$  (Figura 41).

Figura 41 – Detalhes do posicionamento dos perfis de velocidade e intensidade de turbulência

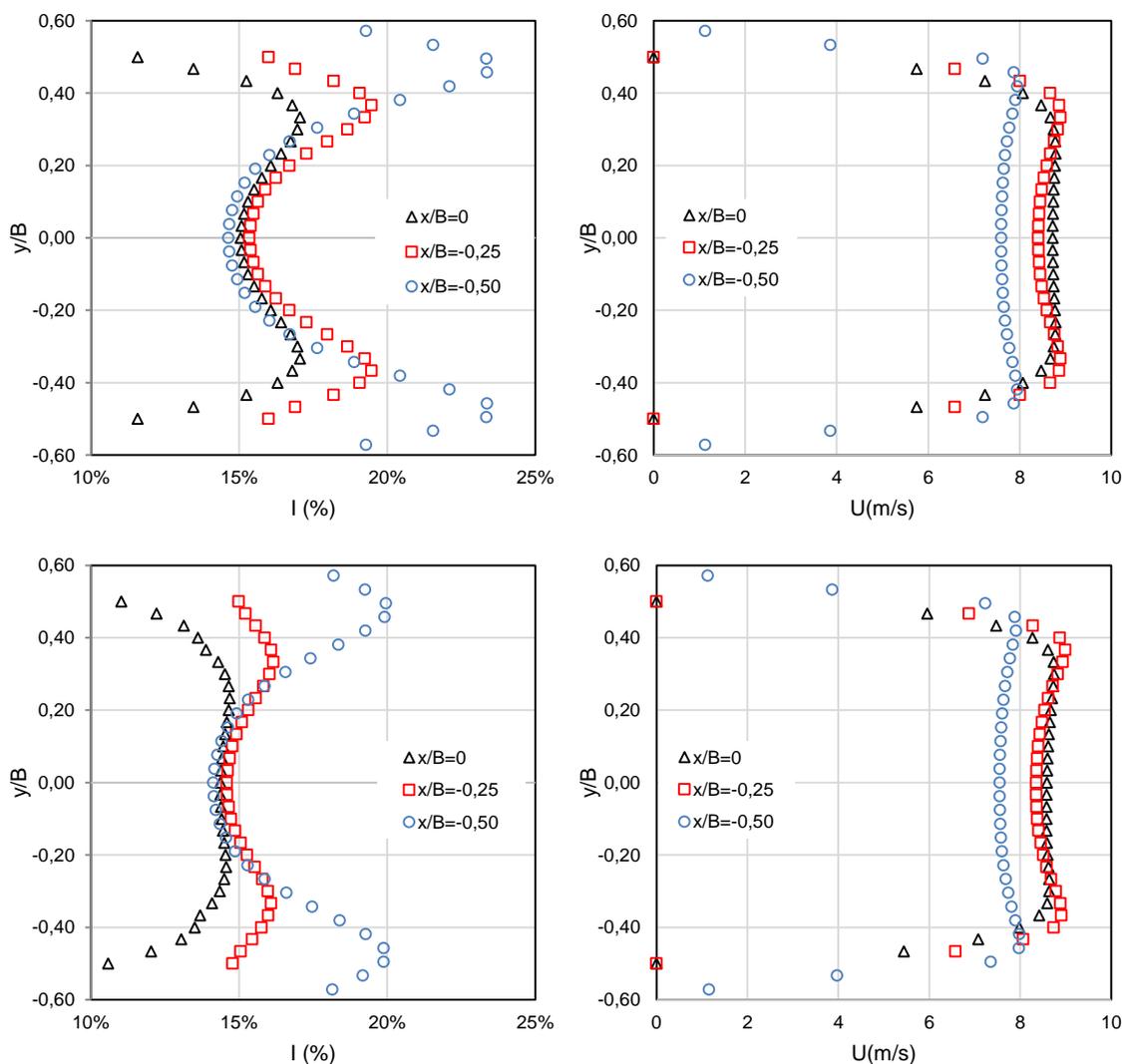


Fonte: AUTOR, 2019

No Gráfico 10, apresenta-se a intensidade de turbulência e a distribuição de velocidade na passagem entre os prédios para  $z/B = 3$  com  $\theta = 0^\circ$  e  $15^\circ$ . Analisando o eixo de simetria, observa-se que os menores valores da intensidade de turbulência ocorrem para  $x/B = -0,50$  com 14,63% enquanto que para  $x/B = 0$  e  $x/B = -0,25$  os valores são 15,09% e 15,40% respectivamente para  $\theta = 0^\circ$ . Já para  $\theta = 15^\circ$  os valores variam entre 14,60% e 14,14%, portanto, valores menores aos obtidos para o caso com  $\theta = 0^\circ$ . Nas proximidades das edificações a turbulência cresce à medida que se aproxima das faces frontais, sendo maiores para  $\theta = 0^\circ$  em relação a  $\theta = 15^\circ$ .

Por sua vez, para o ângulo de incidência nulo a velocidade diminui à medida que nos deslocamentos do centro para as faces frontais dos prédios com valores iguais a 8,73 m/s, 8,42 m/s e 7,60 m/s para  $x/B = 0$ ,  $x/B = -0,25$  e  $x/B = -0,50$ , respectivamente. Para  $\theta = 15^\circ$ , as velocidades no plano de simetria são 8,58 m/s, 8,36 m/s e 7,55 m/s para  $x/B = 0$ ,  $x/B = -0,25$  e  $x/B = -0,50$ , respectivamente. Nota-se que o caso que apresentou o menor valor da intensidade de turbulência também apresentou o menor valor de velocidade. Verifica-se que a mudança do ângulo incidente do escoamento provoca uma leve diminuição nos valores de velocidade e turbulência.

Gráfico 10 – Intensidade de turbulência (esquerda) e distribuição de velocidade (direita) na passagem entre prédios paralelos para o casos  $r/B=0,10$  em  $z/B=3$  e  $\theta = 0^\circ$  (superior) e  $15^\circ$  (inferior)

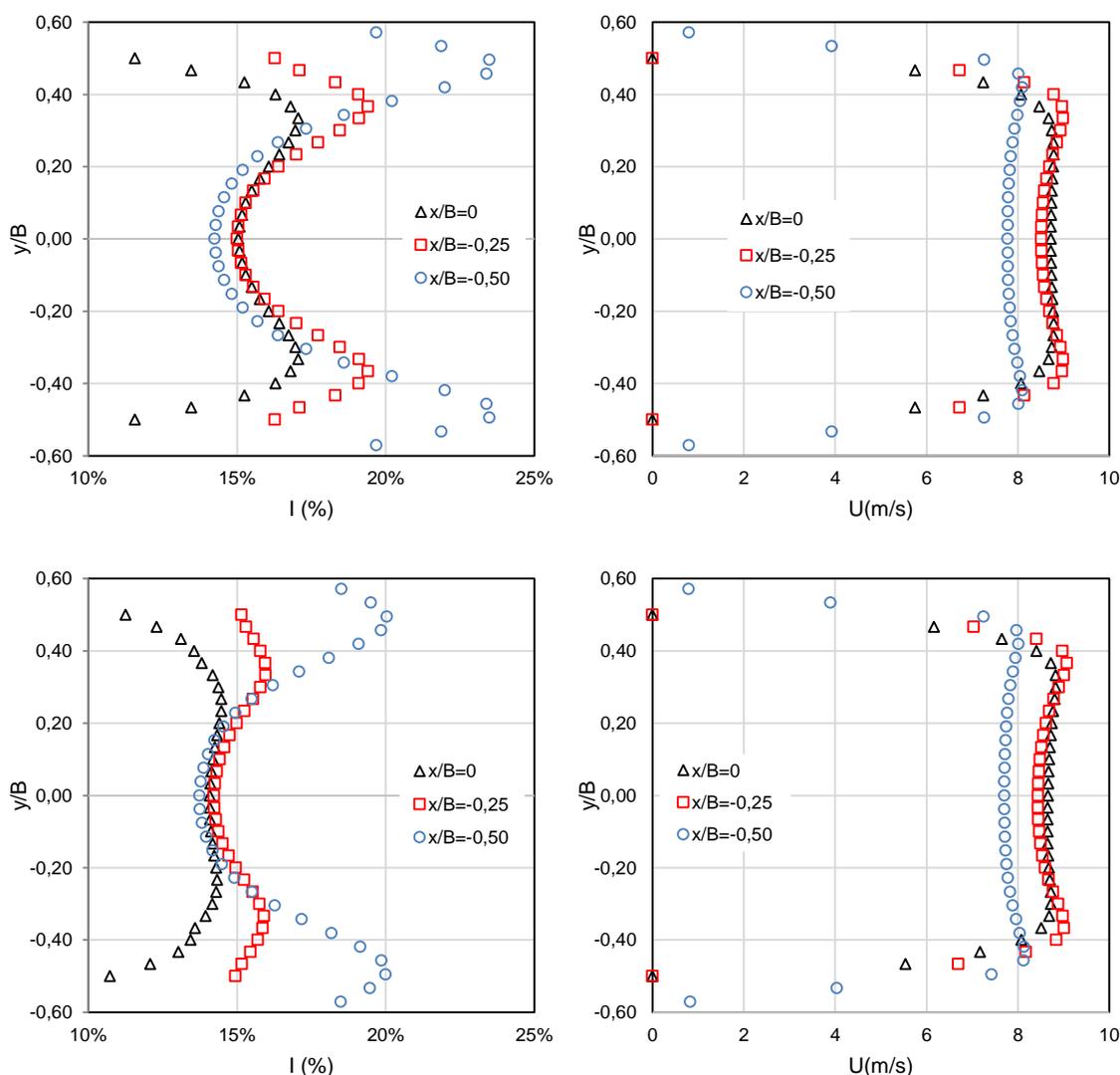


Fonte: AUTOR, 2019

Apresentam-se, no Gráfico 11, os resultados dos perfis de intensidade de turbulência e velocidade para a altura  $z/B= 3,50$  com  $\theta = 0^\circ$  e  $15^\circ$ . Analisando os valores no plano de simetria, observa-se que os menores valores da intensidade de turbulência ocorrem em  $x/B=-0,50$  com 14,29% enquanto que para  $x/B = 0$  e  $x/B= -0,25$  os valores são aproximadamente iguais a 15% para  $\theta = 0^\circ$ . Já para  $\theta = 15^\circ$ , percebe-se uma redução nos valores da intensidade de turbulência variando entre 13,74% e 14,23%. O valor da intensidade de turbulência cresce nas proximidades das edificações, sendo maior para  $\theta = 0^\circ$  em relação a  $\theta = 15^\circ$ . Com relação à velocidade no plano de simetria, observa-se que a mesma diminui conforme nos deslocamentos de  $x/B = 0$  para  $-0,50$ , ou seja, do centro das edificações para a face frontal. Para o

ângulo de incidência  $\theta = 0^\circ$  obteve-se os valores 8,73 m/s, 8,52 m/s e 7,78 m/s para  $x/B = 0$ ,  $x/B = -0,25$  e  $x/B = -0,50$ , respectivamente. Por sua vez, para o ângulo de incidência  $\theta = 15^\circ$  os valores são levemente inferiores, 8,66 m/s, 8,44 m/s e 7,70 m/s, respectivamente. Observa-se que o aumento da altura de  $z/B = 3,0$  para 3,5, provocou uma diminuição nos valores da intensidade de turbulência, enquanto que os valores de velocidade aumentaram para todos os valores de  $x/B$  analisados, exceto no caso de  $x/B = 0,0$  no qual manteve-se constante. Novamente, verifica-se que a mudança do ângulo incidente do escoamento provoca uma diminuição nos valores de velocidade e turbulência.

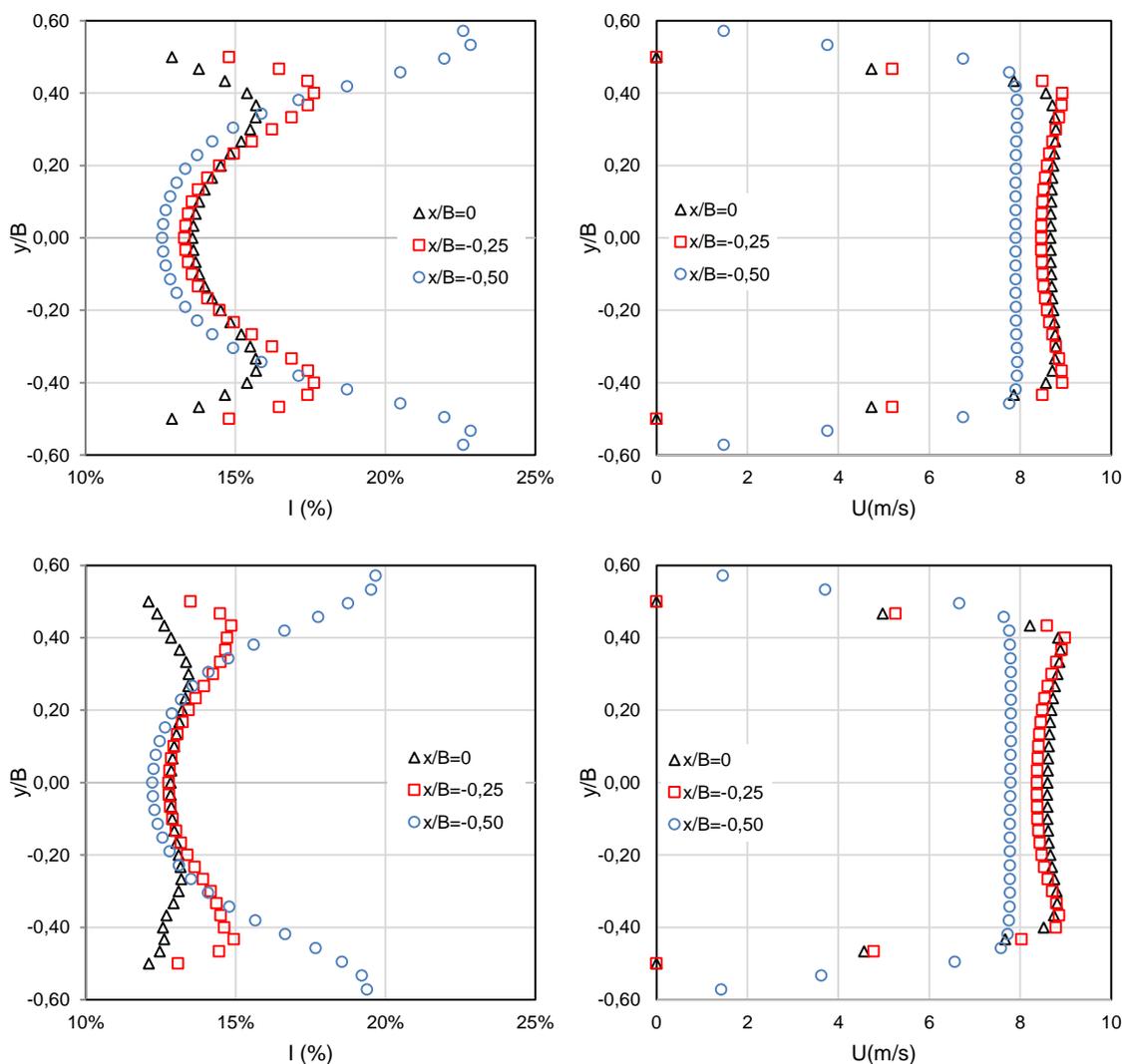
Gráfico 11 – Intensidade de turbulência (esquerda) e distribuição de velocidade (direita) na passagem entre prédios paralelos para o casos  $r/B=0,10$  em  $z/B=3,50$  e  $\theta = 0^\circ$  (superior) e  $15^\circ$  (inferior)



Fonte: AUTOR, 2019

Finalmente, no Gráfico 12, apresenta os resultados de velocidade e intensidade de turbulência para  $\theta = 0^\circ$  e  $15^\circ$  na altura da cobertura, ou seja,  $z/B = 4,0$ . Analisando os valores da intensidade de turbulência no plano de simetria para  $\theta = 0^\circ$ , percebe-se que o menor valor ocorre em  $x/B = -0,50$  com 12,57% enquanto que para  $x/B = 0$  e  $-0,25$  os valores são 13,58% e 13,31%, respectivamente. Para  $\theta = 15^\circ$  os valores são 12,84% e 12,77% para os casos  $x/B=0$  e  $-0,25$  e 12,23% para o caso  $x/B= -0,50$ . Os valores da velocidade no plano de simetria apresentam a mesma tendência observada para  $z/B = 3,0$  e  $3,50$ , ou seja, se reduz conforme nos deslocamos de  $x/B = 0$  até  $-0,50$ . Os valores da velocidade obtidos para o ângulo de incidência nulo são 8,67 m/s, 8,47 m/s e 7,90 m/s. Por sua parte, para  $\theta = 15^\circ$  obteve-se 8,60 m/s, 8,37 m/s e 7,79 m/s para  $x/B = 0$  até  $-0,50$ . Observa-se que devido aos efeitos tridimensionais do escoamento na região da cobertura,  $z/B = 4,0$ , tem-se uma diminuição nos valores da intensidade de turbulência, enquanto que os valores da velocidade diminuiriam para  $x/B = 0$  e  $-0,25$  e aumentaram para o caso  $x/B = -0,50$ .

Gráfico 12 – Intensidade de turbulência (esquerda) e distribuição de velocidade (direita) na passagem entre prédios paralelos para o casos  $r/B=0,10$  em  $z/B=4,0$  e  $\theta = 0^\circ$  (superior) e  $15^\circ$  (inferior)



Fonte: AUTOR, 2019

Tendo em vista todos os resultados apresentados para  $r/B = 0,10$ , observa-se que os máximos valores de velocidade no plano de simetria  $xz$  são muito próximos para  $z/B=3,50$  e  $4,0$  e os mínimos valores da intensidade de turbulência para  $z/B=4,0$ .

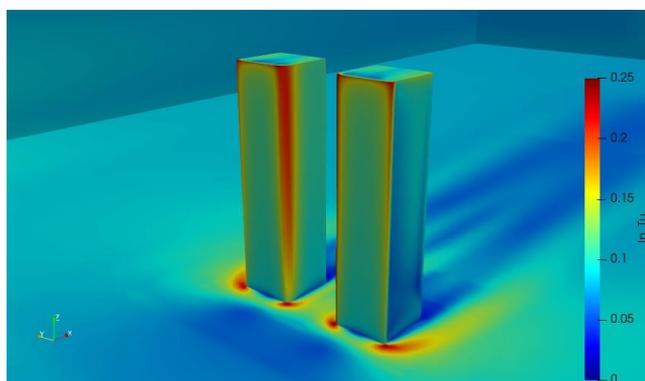
Com relação ao posicionamento ( $x/B$ ) do aerogerador, pode-se verificar que o caso  $x/B = -0,50$  sempre apresentou os menores valores de velocidade, portanto, não seria uma escolha viável desde o ponto de vista do rendimento e eficiência aerodinâmica (LU e IP, 2009). Além do mais, esta posição poderia apresentar dificuldades de instalação e manutenção. Os casos  $x/B = 0$  e  $-0,25$  sempre apresentam valores próximos em relação à intensidade de turbulência, sendo que na maior parte das simulações o caso  $x/B=0$  mostrou menores valores de turbulência

principalmente nas faces laterais das edificações. Com relação a velocidade, o caso  $x/B=0$  sempre apresentou os maiores valores independentemente da altura analisada ou do ângulo incidente. De acordo com Pierik *et al.* (1999), o valor máximo admissível para a intensidade de turbulência em uma turbina eólica do tipo *HAWT* é de 15%. Observando os resultados é possível perceber que os perfis em  $x/B=0$  praticamente respeitam esse limite dentro das alturas analisadas

Em função dos perfis de velocidade e de intensidade de turbulência apresentados, observa-se que a região definida por  $x/B = 0,0$ ,  $0,40 \leq y/B \leq 0,40$  e  $3,0 \leq z/B \leq 0,40$  mostra os melhores valores de alta velocidade e mínima turbulência para o disco atuador da turbina eólica de eixo horizontal. Essa região representa a área útil que o aerogerador deve operar, logo, o seu diâmetro máximo deveria ser igual a  $0,80B$ .

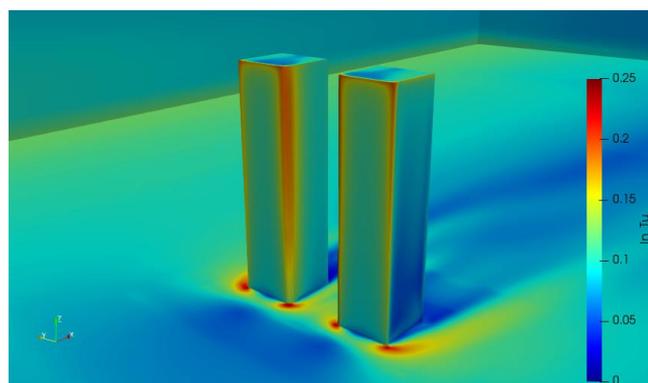
Nas Figuras 42 e 43, apresenta-se a distribuição 3D de intensidade de turbulência para o caso  $r/B = 0,10$  e ângulo de incidência  $\theta = 0^\circ$  e  $15^\circ$ . Pode-se verificar que os máximos valores estão localizados nas arestas, principalmente nas arestas internas com raio de arredondamento igual a  $r/B = 0,10$  e ângulo de incidência  $\theta = 0^\circ$ .

Figura 42 – Intensidade de turbulência para o caso  $r/B = 0,10$  e  $\theta = 0^\circ$



Fonte: AUTOR, 2019

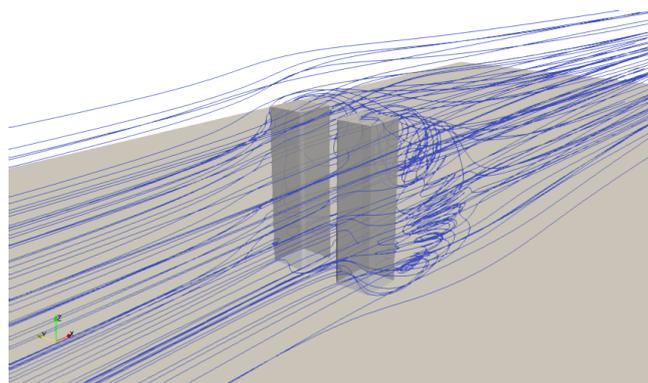
Figura 43 – Intensidade de turbulência para o caso  $r/B= 0,10$  e  $\theta = 15^\circ$



Fonte: AUTOR, 2019

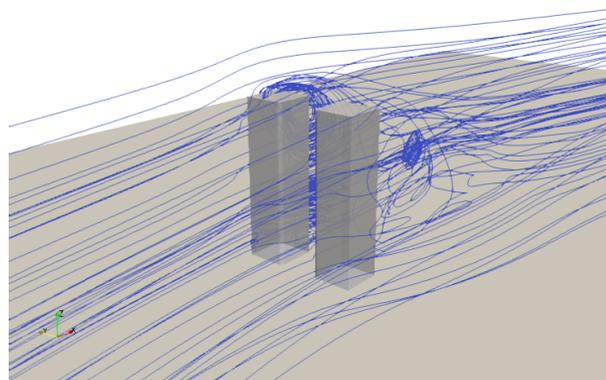
Para uma melhor visualização da topologia do escoamento em torno das edificações, mostra-se nas Figuras 44 e 45, as linhas de corrente para o caso com  $r/B=0,10$  e ângulo de incidência  $\theta = 0^\circ$  e  $15^\circ$ .

Figura 44 – Linhas de corrente para o caso  $r/B= 0,10$  e  $\theta = 0^\circ$



Fonte: AUTOR, 2019

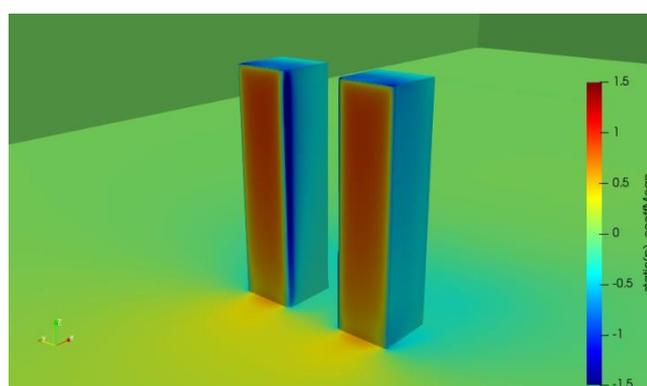
Figura 45 – Linhas de corrente para o caso  $r/B= 0,10$  e  $\theta = 15^\circ$



Fonte: AUTOR, 2019

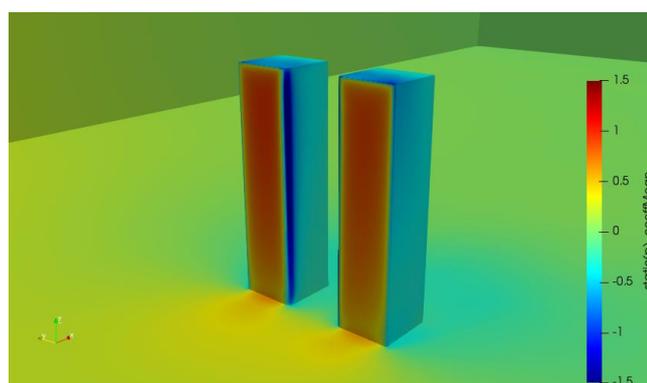
Nas Figuras 46 e 47, apresenta-se a distribuição 3D de pressão para o caso  $r/B = 0,10$  e ângulo de incidência  $\theta = 0^\circ$  e  $15^\circ$ . Pode-se verificar que os máximos valores estão localizados nas faces frontais das edificações, e a área do telhado possui valores menores de pressão para  $\theta = 0^\circ$  em relação a  $\theta = 15^\circ$ .

Figura 46 – Distribuição de pressão para o caso  $r/B = 0,10$  e  $\theta = 0^\circ$



Fonte: AUTOR, 2019

Figura 47 - Distribuição de pressão para o caso  $r/B = 0,10$  e  $\theta = 15^\circ$



Fonte: AUTOR, 2019

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 CONCLUSÕES

Neste estudo foi utilizado o programa livre de código aberto *OpenFOAM* para a resolução de problemas de Dinâmica dos Fluidos. Para a modelagem da turbulência foram empregados três modelos RANS (*Navier-Stokes com média de Reynolds*): LS (Low Reynolds  $k - \varepsilon$  Launder e Sharma), SST ( $k - \omega$  *Shear Stress Transport*) e RNG (*Re-Normalisation Group*  $k - \varepsilon$ ).

Inicialmente, simulou-se o escoamento bidimensional transiente em torno de um corpo prismático com os modelos de turbulência LS e SST. Para ambos modelos

analisa-se como a função de parede afeta os coeficientes aerodinâmicos e a topologia do escoamento. Posteriormente, analisou-se o escoamento 3D permanente ao redor de um prédio isolado com razão de aspecto 1:1:2 com o modelo de turbulência RNG com funções de parede.

Para o caso 2D, observou-se que:

- a) Os coeficientes aerodinâmicos apresentaram uma ótima concordância em comparação com os resultados experimentais e numéricos apresentados na literatura.
- b) Os resultados obtidos com os modelos de turbulência LS e SST com funções de parede apresentaram a melhor concordância em comparação com os autores citados.
- c) Os perfis de velocidade apresentam boa concordância com os resultados experimentais nas proximidades do cilindro quadrado, entretanto, a medida que nos afastamos do corpo observa-se uma divergência originada pelo nível de refinamento da malha utilizada nesta região.

Para o caso 3D, observou-se que:

- a) Os perfis de velocidade calculados apresentam uma boa concordância com relação aos resultados experimentais e numéricos apresentados por outros autores.
- b) O modelo de turbulência RNG consegue capturar qualitativamente as características físicas nos perfis da energia cinética turbulenta, porém existem diferenças consideráveis nos valores de pico.
- c) A região de recirculação foi eficientemente capturada no telhado, entretanto, foi superestimada à jusante do prédio. Esta divergência originada pelo modelo de turbulência RANS também foi observada em outros autores.

Após a verificação do programa *OpenFOAM* com exemplos clássicos da Engenharia do Vento, procedeu-se a análise do escoamento tridimensional em torno de dois prédios paralelos de relação B:D:L=1:1:4 afim de verificar as possíveis regiões para a instalação de um sistema de geração eólica. Para tal estudo, foi introduzido como modificação geométrica um raio de arredondamento nas bordas internas dos prédios que variam entre  $r/B = 0, 0,10, 0,20$  e  $0,30$ . No estudo considerou-se a instalação do aerogerador nas seguintes localizações  $x/B = -0,50, -0,25$  e  $0,0$ . Foram considerados dois ângulos de incidente do escoamento,  $0^\circ$  e  $15^\circ$ . O escoamento

incompressível foi simulado empregando o modelo de turbulência RNG com função de parede. As principais conclusões da simulação são:

- a) Verificou-se que o caso sem arredondamento das arestas ( $r/B = 0$ ) apresenta as condições mais críticas devido aos altos valores da intensidade de turbulência,
- b) O aumento no valor do raio de arredondamento provoca uma diminuição dos valores de velocidade e intensidade de turbulência,
- c) O valor do raio  $r/B = 0,10$ , apresenta o melhor rendimento aerodinâmico com relação à máxima velocidade e mínima intensidade de turbulência,
- d) Os valores de velocidade e intensidade de turbulência no plano de simetria diminuem levemente quando aumenta-se o ângulo de incidência de  $0^\circ$  para  $15^\circ$ ,
- e) A dimensão efetiva onde deveria instalar-se o disco do aerogerador se define em função das regiões que apresentem perfis regulares de alta velocidade e baixa turbulência, ou seja, procura-se a máxima eficiência aerodinâmica e a redução de possíveis problemas estruturais originados por fadiga. Em função das simulações, observou-se que os prédios com  $r/B = 0,10$  e com o aerogerador localizado em  $x/B = 0$ ,  $0,40 \leq y/B \leq 0,40$  e  $3,0 \leq z/B \leq 4,0$  apresentam os maiores valores de velocidade e um perfil mais regular independentemente do ângulo de incidência do escoamento. Praticamente em todos os casos a intensidade de turbulência fica abaixo do limite máximo de 15% sugerido para aerogeradores do tipo *HAWT*.

## 7.2 TRABALHO FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se a utilização de outras técnicas de simulação mais aprimoradas que a modelagem RANS, tais como a Simulação de Grandes Escalas (LES – *Large Eddy Simulation*) e a simulação DES (*Detached Eddy Simulation*). Sugere-se a utilização de edificações altas com geometrias complexas e o estudo da influência das edificações vizinhas no padrão do escoamento e, portanto, na escolha do aerogerador, bem como a simulação do aerogerador propriamente dito. Sugere-se ainda ampliar o estudo paramétrico da forma da edificação para otimizar a atuação do aerogerador.

## REFERÊNCIAS

ADAMI V. S., ANTUNES JÚNIOR J. A. V., SELITTO M. A., Regional industrial policy in the wind energy sector: The case of the State of Rio Grande do Sul, Brazil, *Energy Policy*, v. 111, p. 18-27, 2017.

ANTUNES A. R. E., LYRA P. R. M., WILLMERSDORF R. B., A Methodology and Computational System for the Simulation of Fluid-Structure Interaction Problem. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 22, n. 3, p. 255-265, 2005

ARAÚJO A. M., ASIBOR A. I., VALENÇA D. A. A., MEDEIROS A. L. R., ROSAS P. A. C., Vento Urbano para autoprodução de energia elétrica em edifícios. *Revista Pernambucana de Tecnologia*, Recife, v. 1, n. 1, p. 27-36, jun, 2013.

ARGYROPOULOS C. D., MARKATOS N. C., Recent advances on numerical modelling of turbulent flows, *Applied Mathematical Modelling*, n. 39, p. 693-732, 2015.

ARSLAN T., ANDERSSON H.I., PETTERSEN B., **Calculation of vortex shedding around the bluff bodies by using LES model**. In: ICCFD-6 of the Sixth International Conference on Computational Fluid Dynamics, St. Petersburg, Russia, p. 293–294, 2010.

AYHAN D., SAGLAM S., A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, p. 1040-1049, 2012.

BADAS M. G., FERRARI S., GARAU M., QUERZOLI G., On the effect of gable roof on natural ventilation in two-dimensional urban canyons. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, v. 162, p. 24-34, 2017.

BAO Y., ZHOU D., HUANG C., WU Q., CHEN X., Numerical prediction of aerodynamic characteristics of prismatic cylinder by finite element method with Spalart-Allmaras turbulence model, *Computers & Structures*, v. 89, n. 3-4, p. 325-338, 2011.

BEARMAN P. W., OBASAJU E. D., An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders, *Journal of Fluid Mechanics*, v. 119, p. 297-321, 1982.

BIANCHI S., BIACHINI A., FERRARA G., FERRARI L. Small Wind Turbines in the Built Environment: Influence of Flow Inclination on the Potential Energy Yield, *Journal of Turbomachinery*, v. 136, p. 1-8, 2014.

BLOCKEN B., 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present e future, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 129, p. 69-102, 2014.

BLOCKEN B., CARMELIET J., Pedestrian wind conditions at outdoor platforms in a high-rise apartment building: generic sub-configuration validation, wind comfort assessment and uncertainty issue, **Wind and Structures**, v. 11, p. 51-70, 2008.

BLOCKEN B., CARMELIET J., Pedestrian Wind Environment around Buildings: Literatura Review and Pratical Examples, **Journal of Thermal Envelope and Bulding Science**, v. 28, n. 2, p. 107-159, 2004.

BLOCKEN B., STATHOPOULOS T., VAN BEECK J. P. A. J., Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment, **Building and Environment**, v. 100, p. 50-81, 2016.

BOSCHI G., RODI W., Simulation of vortex shedding past a square cylinder with different turbulence models, **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v. 28, p. 601-616, 1998.

BRADSHAW P., LAUNDER B. E., LUMLEY J. L., Collaborative Testing of Turbulence Models, **Journal of Fluids Engineering**, v. 118, p. 243-247, 1996.

BREDBERG J., PENG S-H., DAVIDSON L., On the Wall Boundary Condition for Turbulence Models. In: Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, 2000.

ÇENGEL, Y., A., CIMBALA, J., M., **Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications**. 6ª Edição. McGraw-Hill, New York, 2007.

CHAUDHRY H. N., CALAUTIT J. K., HUGHES B. R. Design and aerodynamic investigation of dynamic architecture, **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 7, p.1-11, 2016.

COTTON M. A., JACKSON J. D., Vertical tube air flows in the turbulent mixed convection regime calculated using a low-Reynolds-number *k*- model, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 33, p. 275-286, 1990.

DADIOTI R., REES S., Performance of Detached Eddy Simulation applied to Analysis of a University Campus Wind Environment, **Energy Procedia**, v. 134, p. 366-375, 2017.

DAEMEI A. B., KHOTBEHSARA E. M., NOBARANI E. M., BAHRAMI P., Study on wind aerodynamic and flow characteristics of triangular-shaped tall buildings and CFD simulation in order to assess drag coeficiente. **Ain Shams Engineering Journal**, p. 1-8, 2019.

DE JONG P., DARGAVILLE R., SILVER J., UTEMBE S., KIPERSTOK A., TORRES E. A., Forecasting high proportions of wind energy supplying the Brazilian Northeast electricity grid, **Applied Energy**, v. 195, p. 538-555, 2017.

DU Y., MAK C. M., LIU J., XIA Q., NIU J., KWOK K. C. S., Effects os lift-up design on pedestrian level wind comfort in diferent building configurations under three wind direction, **Building and Environment**, v. 117, p. 84-99, 2017.

DUCOIN A., SAHDLOO M. S., ROY S., Direct Numerical Simulation of flow instabilities over Savonius style wind turbine blades, **Renewable Energy**, v. 105, p. 374-385, 2017.

DURÃO D. F. G., HEITOR M. V., PEREIRA J. C. F., Measurements of turbulent and periodic flows around a square cross-section cylinder, **Experiments in Fluids**, v. 6, n. 4, p. 298-304, 1988.

EDENHOFER O., PICHS-MADRUGA R., SOKONA Y., MINX J.C., FARAHANI E., KADNER S., SEYBOTH K., **Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change Summary for Policymakers and Technical Summary**, Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2015.

EL TAHRY,  $k-\epsilon$  Equation for Compressible Reciprocating Engine Flows, **Journal of Energy**, v. 7, n. 4, p. 345-353, 1983.

ELMOKADEM A. A., MEGAHED N. A., NOAMAN D. S., Towards a computer program for building-integrated Wind Technologies, **Energy and Buildings**, v. 117, p. 230-244, 2016.

Encraft, 2009. Warwick wind trials project. Final report. Disponível online: [http://www.microwindturbine.be/Rapportering\\_files/Warwick+Wind+Trials+Final+Rep](http://www.microwindturbine.be/Rapportering_files/Warwick+Wind+Trials+Final+Report+%281%29.pdf) [ort+%281%29.pdf](http://www.microwindturbine.be/Rapportering_files/Warwick+Wind+Trials+Final+Rep</a> <a href=) (Acesso em março/2019).

FARHADI M., RAHNAMA M., Three-dimensional study of separated flow over a square cylinder by large eddy simulation, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering**, v. 219, p. 225–234, 2005.

FAROUK M. I., Check the comfort of occupants in high rise building using CFD, **Aind Shamns Engineering Journal**, v. 7, p. 953-958, 2016.

FERZIGER J. H., PERIĆ M., **Computacional Methods for Fluids Dynamics**. 3<sup>th</sup> ed. Springer, 2002.

FIATES J., VIANNA S. S. V., Numerical modelling of gas dispersion using OpenFOAM. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 104, p. 277-293, 2016.

FLORES F., GARREAUD R., MUÑOZ R. C., OpenFOAM applied to the CFD simulation of turbulent buoyant atmospheric flows and pollutant dispersion inside large open pit mines under intense insolation. **Computers & Fluids**, v. 90, p. 72-87, 2014.

FOX, R., W., PRITCHARD, P., J., MCDONALD, A., T., **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8<sup>o</sup> Edição. LTC Editora, Brasil, 2010.

FRANKE R., RODI W., Calculation of vortex shedding past a square cylinder with various turbulence models, **Eighth Symposium on Turbulent Shear Flows**, Technical University of Munich, Germany, 1991.

GERRARD, J.H., The mechanics of the formation region of vortices behind bluff body, **J. Fluid Mech.**, v. 25, p. 69-84, 1966.

GHASEMIAN M., NEJAT A., Aerodynamic noise prediction of a Horizontal Axis Wind Turbine using Improved Delayed Detached Eddy Simulation and acoustic analogy, **Energy Conversion and Management**, v. 99, p. 210-220, 2015.

GLUMAC A. S., HEMIDA H., HOFFER R., Wind energy potential above a high-rise building influenced by neighboring buildings: An experimental investigation, **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**, v. 175, p. 32-42, 2018.

GÓMEZ A., MONTAÑÉS C., CÁMARA M., CUBERO A., FUEYO N., MUÑOZ J. M., An OpenFOAM-based model for heat-exchanger design in the Cloud. **Applied Thermal Engineering**, v. 139, p. 239-255, 2018.

GOUSSEAU P., BLOCKEN B., VAN HEIJST G. J. F., Quality assessment of Large-Eddy Simulation of wind flow around a high-rise building: Validation and solution verification, **Computers & Fluids**, v. 79, p. 120-133, 2013.

GRANT A., JHONSTONE C., KELLY N., Urban wind energy conversion: The potential of ducted turbines, **Renewable Energy**, v. 33, p. 1157-1163, 2008.

GUIMET V., LAURENCE D., A Linearised Turbulent Production in the  $k$ - $\epsilon$  Model for Engineering Applications, **Engineering Turbulence Modelling and Experiments**, v. 5, p. 157-166, 2002.

HAN Z., ZHOU D., TU J., FANG C., HE T., Flow over two side-by-side square cylinders by CBS finite element scheme of Spalart–Allmaras model, **Ocean Engineering**, v. 87, p. 40-49, 2014.

HELLSTEN A., Some Improvements in Menter's  $k$ - $\omega$  SST Turbulence Model, **In: 29th AIAA Fluid Dynamics Conference**, 1998.

IGCI A. A., ARICI M. E., A comparative study of four low-Reynolds-number  $k$ - $\epsilon$  turbulence models for periodic fully developed duct flow and heat transfer, **Numerical Heat Transfer**, v. 69, p. 234-248, 2016.

ISHUGAH T. F., LI Y., WANG R. Z., KIPLAGAT J. K., Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 37, p. 613-626, 2014.

KHAYRULLINA A., HOFF T., BLOCKEN B., A study on the wind energy potential in passages between parallel buildings, **In: 6<sup>th</sup> European and African Conference on Wind Engineering**, 2013.

KITSIOS V., ATKINSON C., SILLERO J. A., BORREL G., GUNGOR A. G., JIMÉNEZ J., SORIA J., Direct numerical simulation of a self-similar adverse pressure gradient turbulent boundary layer, **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 61, p. 129-136, 2016.

KUNDU P. K., COHEN I M., **Fluids Mechanics**. 2<sup>th</sup> ed. Academic Press, 2002.

LAUNDER B. E., SHARMA B. I., Application of the Energy-Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc, **Letters in Heat and Mass Transfer**, v. 1, p. 131-138, 1974.

LAUNDER B. E., SPALDING D. B., The Numerical Computation of Turbulence Flows, **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 3, p. 269-289, 1974.

LEDO L., KOSASIH P. B., COOPER P., Roof mounting site analysis for micro-wind turbines, **Renewable Energy**, v. 36, p. 1379-1391, 2011.

LI Q. S., CHEN F. B., LI Y. G., LEE Y. Y., Implementing wind turbines in a tall building for power generation: A study of wind loads and wind speed amplifications, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 116, p. 70-82, 2013.

LIU F., A Thorough Description Of How Wall Functions Are Implemented In OpenFOAM, In: **Proceedings of CFD with OpenSource Software**. Chalmers University of Technology, 2017.

LÖHNER R., HAUG E., MICHALSKI A., MUHAMMAD B., DREGO A., NANJUNDAIAH R., ZARFAM R. Recent advances in computational wind engineering and fluid–structure interaction, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 144, p. 14–23, 2015.

LU L., IP K. Y., Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 450-461, 2009.

LYN D. A., EINAIV S., RODI W., PARK J. H., A laser-Doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristics of the turbulent near wake of a square cylinder, **Journal of Fluid Mechanics**, v. 304, p. 285-319, 1995.

LYN D. A., RODI W., The flapping shear layer formed by flow separation from the forward corner of a square cylinder, **Journal of Fluid Mechanics**, v. 267, p. 353-376, 1994.

LYSENKO D. A., ERTESVAG I. S., RIAN K. E., Modelling of turbulent separated flows using OpenFOAM, **Computer and Fluids**, n. 80, p. 408-422, 2013.

MALISKA, C.R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2 ed. LTC: Rio de Janeiro, 2013.

MARIĆ T., HÖPKEN J., MOONEY K., **The OpenFOAM® Technology Primer**. SourceFlux, 2014.

MARZOUK O. A., HUCKABY E. D., Simulation of a Swirling Gas-Particle Flow Using Different k-epsilon Models and Particle-Parcel Relationships, **Engineering Letters**, v. 18, p. 56-67, 2010.

MENEGHINI J. R., BEARMAN P. W., Numerical Simulation of high amplitude oscillatory flow about a circular cylinder, **Journal of Fluids and Structures**, v. 9, p. 435-455, 1995.

MENG Y., HIBI K., Turbulent measurements of the flow field around a high-rise building, **Journal of Wind Engineering**, v. 76, p. 55-64, 1998.

MENTER F. R., KUNTZ M., LANGTRY R., Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, **Turbulence, Heat and Mass Transfer**, v. 4, p. 625-632, 2003.

MINGUEZ M., BRUN C., PASQUETTI R., SERRE E., Experimental and high-order LES analysis of the flow in near-wall region of a square cylinder, **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 32, n. 3, p. 558-566, 2011.

MITHRARATNE N., Roof-top wind turbines for microgeneration in urban houses in New Zealand, **Energy and Buildings**, v. 41, p. 1013-1018, 2009.

MITTAL H., SHARMA A., GAIROLA A., Numerical simulation of pedestrian level wind flow around buildings: Effect of corner modification and orientation, **Journal of Building Engineering**, v. 22, p. 314-326, 2019.

MOUKALLED F., MANGANI L., DARWISH M., **The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab®**. Springer, 2015.

MURAKAMI S., MOCHIDA A., On turbulent vortex shedding flow past 2D square cylinder predicted by CFD, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 54-55, p. 191-211, 1995.

NG E., YUAN C., CHEN L., REN C., FUNG J. C. H., Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong, **Landscape and Urban Planning**, v. 101, p. 59-74, 2011.

OKE T.R., 2006. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. **World Meteorological Organization**, n. 1250, p. 51.

OKE T.R., The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands, **Atmosphere**, v.4, p. 268-276, 1976.

OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox, version 3.0. London, UK: The OpenFOAM Foundation Ltd, 2015.

OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox, version 4.1. London, UK: The OpenFOAM Foundation Ltd, 2016.

OUAHABI M. H., ICHENIAL M. M., EL HAJJAJI A., BENABDELOUAHAB F., Application of the Turbulence Models at Low Reynolds Number for Horizontal-Axis Wind Turbine Design by using Computational Fluid Dynamics (CFD), **International Journal of Control and Automation**, v. 10, n. 7, p. 179-190, 2017.

PARK J., JUNG H., LEE S., PARK J., A New Building-Integrated Wind Turbine System Utilizing the Building, **Energies**, v. 8, p. 11846-11870, 2015.

PIERIK . J. T. G., DEKKER J. M. W., BRAAM H., BULDER B. H., WINKELAAR D., LARSEN G. C., MARFIADAKIS E., CHAVIAROPOULO A P., DERRICK A., MOLLY J. P. **European wind turbine standards II (EWTS-II)**. In: Wind energy for the next millennium. Proceedings. James and James Science Publishers, London, p. 568-571, 1999

PISCAGLIA F., GIUSSIANI F., MONTORFANO A., HÉLIE J., AITHAL S. M., A MultiPhase Dynamic-VoF solver to model primary jet atomization and cavitation inside high-pressure fuel injectors in OpenFOAM. **Acta Astronautica**, v. 158, p. 375-387, 2019.

POPE S. B., **Turbulent Flows**. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

RAISEE M., JAFARI A., Numerical study of turbulent flow around a square cylinder using two low-reynolds number  $k-\epsilon$  models, **European Conference on Computational Fluid Dynamics**, 2006.

RODI W., MANSOUR N. N., Low Reynolds number  $k-$  modelling with the aid of direct simulation data, **Journal of Fluid Mechanics**, v. 250, p. 509-529, 1993.

SANDBERG R. D., JONES L. E., SANDHAM N. D., JOSEPH P. F., Direct numerical simulations of tonal noise generated by laminar flow past airfoils, **Journal of Sound and Vibration**, v. 320, p. 838-858, 2009.

SEDAGHATIZADEH N., ARJOMANDI M., KELSO R., CAZZOLATO B., GHAYDESH M. H., Modelling of wind turbine wake using large eddy simulation, **Renewable Energy**, v. 115, p. 1166-1176, 2018.

SHIMADA K., ISHIHARA T., Application of a modified  $k-\epsilon$  model to the prediction of aerodynamic characteristics of rectangular cross-section cylinders, **Journal of Fluids and Structures**, v.16, n. 4, p. 465-485, 2002.

SILVA A. L., PIMENTA F. M., ASSIREU A. T., SPYRIDES M. H. C., Complementarity of Brazil's hydro and offshore wind power, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 413-427, 2016.

SIMIU E., **Design of buildings for wind: a guide for ASCE 7-10 standard users and designers of special structures**. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011.

SOUZA J. F. A., OLIVEIRA L. R., AZEVEDO J. L. L., SOARES I. D., MATA M.M., Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29(1), p. 21-41, 2011.

SPALART P. R., ALLMARAS S. R., A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. In: **30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit**, 1992.

STATHOPOULOS T., ALRAWASHDEH H., AL-QURAN A., BLOCKEN B., DILIMULATI A., PARASCHIVOIU M., PILAY P. Urban Wind energy: Some views on potential and challenges, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 179, p. 146-157, 2018.

STATHOPOULOS T., Computational wind engineering: Past achievements and future challenges, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 67-68, p. 509-532, 1997.

TANNEHILL J. C., ANDERSON D. A., PLETCHER R. H., **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**. 2<sup>nd</sup> ed. Taylor & Francis, Hoboken, Washington, DC, 1997.

TEMEL O., BRICTEUX L., BEEK J. V., Coupled WRF-OpenFOAM study of wind flow over complex terrain, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 174, p. 152-159, 2018.

TENNEKES H., LUMLEY J. L., **A first course in Turbulence**. The MIT Press, Londres, 1972.

THÉ J., YU H., A critical review on the simulations of wind turbine aerodynamics focusing on hybrid RANS-LES methods, **Energy**, v. 138, p. 257-289, 2017.

TIAN X., ONG M. C., YANG J., MYRHAUG D., Unsteady RANS simulations of flow around rectangular cylinders with different aspect ratios, **Ocean Engineering**, v. 58, p. 208-216, 2013.

TOJA-SILVA F., COLMENAR-SANTOS A., CASTRO-GIL M., Urban Wind energy exploitation systems: Behaviour under multidirectional flow conditions — Opportunities and challenges, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 24, p. 364-378, 2013.

TOJA-SILVA F., KONO T., PERALTA C., LOPEZ-GARCIA O., CHEN J., A review of computational fluid dynamics (CFD) simulations of the wind flow around buildings for urban wind energy exploitation, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 180, p. 66-87, 2018.

TOJA-SILVA F., PERALTA C., LOPEZ-GARCIA O., NAVARRO J., CRUZ I., Roof region dependent wind potential assessment with different RANS turbulence models,

**Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 142, p. 258-271, 2015a.

TOJA-SILVA F., PERALTA C., LOPEZ-GARCIA O., NAVARRO J., CRUZ I., Effect of roof-mounted solar panels on the wind energy exploitation on high-rise buildings, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 145, p. 123-138, 2015b.

TOJA-SILVA F., PREGEL-HODERLEIN C., CHEN J., On the urban geometry generalization for CFD simulation of gas dispersion from chimneys: Comparison with Gaussian plume model. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**, v. 177, p. 1-18, 2018.

TOMINAGA Y., Flow around a high-rise building using steady and unsteady RANS CFD: Effect of large-scale fluctuations on the velocity statistics, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 142, p. 93-103, 2015.

TOMINAGA Y., MOCHIDA A., MURAKAMI S., SAWAKI S., Comparison of vários revised  $k-\varepsilon$  models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape placed within the surface boundary layer, **Journal of Wind Engineering**, v. 96, p. 389-411, 2008.

TRIAS F. X., GOROBETS A., OLIVA A., Turbulent flow around a square cylinder at Reynolds number 22,000: A DNS study, **Computers and Fluids**, v. 123, p. 87-98, 2015.

UCHIDA T., OHYA Y., Micro-siting technique for wind turbine generators by using large-eddy simulation, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, p. 2121-2138, 2008.

VERSTEEG H. K., MALALASEKERA W., **Na Introduction to Computacional Fluid Dynamics: the Finite Volume Method**. Prentice Hall, Harlow, England, 2007.

WASALA S. H., STOREY R. C., NORRIS S. E., CARTER J. E., Aeroacoustic noise prediction for winds turbines using Large Eddy Simulation, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 145, p. 17-29, 2015.

WHITE F. M., **Fluids Mechanics**. 7<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, New York, 2011.

WILCOX D. C., **Turbulence Modeling for CFD**. DCW Industries, Inc., La Canãda, Califórnia, 2006.

YAKHOT V., ORSZAG S. A., THANGAM S., GATSKI T. B., SPEZIALE C. G., Development of turbulence model for shear flow by a double expansion technique, **Physics of Fluids**, v. 4, n. 7, p. 1510-1520, 1992.